

Н. Стефанов

**РЪКОВОДСТВО
ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА
ТОКОЗАХРАНВАЩИ
УСТРОЙСТВА**

София

В ръководството са дадени методи за изчисляване на най-употребяваните електронни стабилизаторни схеми за постоянно напрежение. Разгледани са параметричните и компенсационните стабилизатори. Дадени са и методи за топлинно оразмеряване на мощни транзистори и на техните охлаждащи радиатори. Показана е методика за изчисляване на токоизправители, филтри и трансформатори. Методите са илюстрирани с решени примери.

Ръководството е учебно пособие за студентите от Техническия университет – София по предмета токозахраниващи устройства. То може също да се използва от инженери, техници и любители при проектиране на маломощни токозахраниващи устройства.

ПРЕДГОВОР

Ръководството за проектиране на токозахраниващи устройства е предназначено да служи като учебно пособие при изработване на курсов проект и курсова задача по предмета токозахраниващи устройства от студентите от Факултет Електронна техника и технологии при Техническия университет – София. При неговото съставяне е взето предвид, че студентите вече са изучили учебния материал от курса лекции по токозахраниващи устройства и всички основни теоретични изводи са им известни. Затова в ръководството липсват теоретичните изводи на формулите и описание на действието на отделните схеми са съвсем кратки.

Последователността на проектирането е показана под формата на решение на примерни задачи. В началото е дадена последователността на изчисляване, после е решен конкретен пример. Понеже в някои решения се налага да се правят повторни итерационни изчисления, това също е обяснено и илюстрирано с примерите.

В ръководството са разгледани само случаите на проектиране на токозахраниващи устройства, захранвани от променливотокова мрежа с напрежение $220\text{ V}/50\text{ Hz}$ и съдържащи стабилизатори на напрежение с непрекъснато действие от последователен тип. Описано е проектирането на параметричните стабилизатори на напрежение като самостоятелни токозахраниващи устройства и като източници на еталонно напрежение. Показано е проектирането на охлаждащи радиатори за мощни транзистори и интегрални схеми, а също така и на схеми за защита от токово претоварване и от пренапрежения. Като завършващ етап от проектирането са показани методи за изчисляване на токоизправители, охлаждащи филтри и мрежови трансформатори.

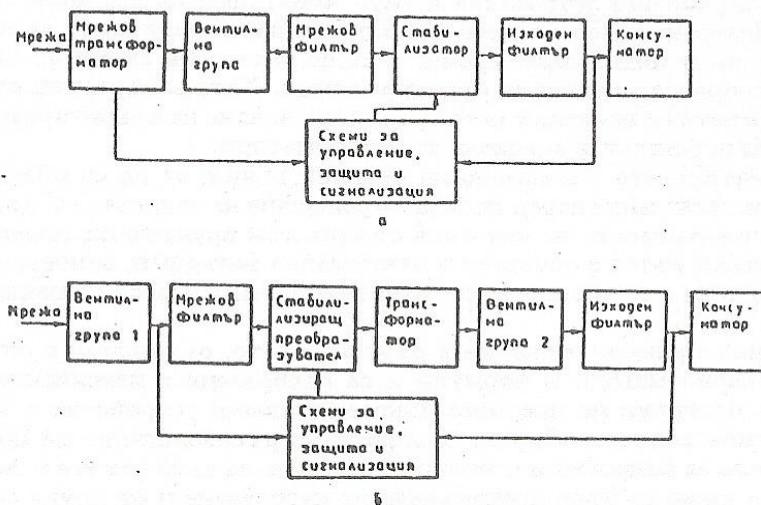
Проектирането е показано по отделни възли, за да се илюстрира действителният инженерен подход за решаване на задачата. С цел да се избегне препращането на читателя от една към друга точка проектирането на всеки възел е показано в максимално завършен, самостоятелен вид. При това е възможно в изложението да има известни малки повторения.

Всички примери, описани в ръководството, се решават с опростени инженерни методи и формули и са съобразени с изискванията на учебната програма по предмета Токозахраниващи устройства в Техническия университет – София. Въпреки че ръководството не може да претендира за подробно и пълно разглеждане на засегнатите в него въпроси, то може да бъде препоръчано за използване и от други специалисти, занимаващи се с проектиране на подобни устройства.

ВЪВЕДЕНИЕ

Токозахраниващите устройства, използващи енергията на електроизпределителната мрежа за захранване на електронна апаратура, представляват електронни преобразуватели на променливо в постоянно напрежение. Освен преобразуването те почти винаги извършват и регулиране или стабилизиране на изправеното напрежение и защита от екстремални стойности на токовете и на преженията. Преобразуването на променливото напрежение в постоянно се извършва от токоизправители, стабилизирането – от стабилизатори, а защитата – от вериги и елементи за защита. В едно комплексно токозахраниващо устройство обикновено са включени и трите вида възли, някои от тях могат да се повтарят многократно.

Възможни са много варианти на схеми на мрежови токозахраниващи устройства. На фиг. 0.1 са показвани два от най-често срещаните. На фиг. 0.1а е дадено токозахраниващо устройство с мрежов трансформатор и еднократно преобразуване на енергията. В този случай напрежението на мрежата се трансформира до необходимата стойност от мрежовия трансформатор, изправя се от вентилната група, изглежда се от филтър, стабилизира се от стабилизатор и през изходния филтър захранва консуматора.



Фиг. 0.1. Блокови схеми на токозахраниващи устройства
а – с мрежов трансформатор; б – без мрежов трансформатор и многократно преобразуване на енергията

И в двата варианта освен силовата схема съществуват схеми за управление, защита и сигнализация, които са с различна сложност в зависимост от предназначението им и изискванията към тях.

Във всички токозахраниващи устройства посоката на енергията е от източника към консуматора – в тази последователност от дидактични съображения се обяснява и изучава действието им. При проектирането им, обаче, изходни данни са данните на консуматора и на мрежата. За това проектирането се извършва в обратната последователност – от консуматора към мрежата. Например за схемата от фиг. 0.1а проектирането трябва да протече в следната последователност:

- проектиране на изходния филтър;
- проектиране на стабилизатора;
- проектиране на вентилната група и мрежовия филтър;
- проектиране на трансформатора;
- проектиране на схемите за управление, защита и сигнализация.

От своя страна всеки отделен възел на комплексното токозахраниващо устройство се проектира в определена последователност:

- уточняване на изходните данни, които са определени от консуматора, съседните възли, захранващия токоизточник и околната среда;
- избиране на схемно решение;
- определяне на режима на работа на елементите от схемата и тяхното изчисляване или избиране по каталог;
- проверяване на издръжливостта на екстремални условия и проектиране на съответните защиты.

1. ПРОЕКТИРАНЕ НА ПАРАМЕТРИЧНИ СТАБИЛИЗATORI ZA ПОСТОЯННО НАПРЕЖЕНИЕ

1.1. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ ЗА СТАБИЛИЗATORите

Стабилизаторите на напрежение са предназначени да поддържат неизменна стойността на напрежението при изменение на следните външни фактори:

- а) напрежението на захранващата мрежа;
- б) товарното съпротивление;
- в) честотата на захранващата мрежа;
- г) параметрите на околната среда – температура, влажност, атмосферно налягане и др.

За качеството на стабилизатора се съди по коефициента на стабилизация. Той е равен на отношението между относителното изменение на променливата входна величина към относителното изменение на стабилизираната величина

$$(1.1) \quad k_{ct} = \frac{\Delta x/x}{\Delta y/y}$$

В тази формула x е означена променливата величина, а y – стабилизираната величина. Променливата величина може да бъде една от изброените по-горе, а стабилизираната – напрежение или ток.

За различните променливи величини съществуват различни, т.нр. частни коефициенти на стабилизация. За един стабилизатор на напрежение частните коефициенти на стабилизация са:

1. Коефициент на стабилизация по входно напрежение

$$(1.2) \quad k_{ct(U)} = \frac{\Delta U_i}{\Delta U_o} \frac{U_o}{U_i}$$

където ΔU_i и ΔU_o са изменението на входното и изходното напрежение на стабилизатора при един и същ ток на консуматора;

U_i и U_o – номиналните стойности на същите напрежения.

2. Коефициент на стабилизация при изменение на товара

$$(1.3) \quad k_{ct(I)} = \frac{\Delta I_o}{\Delta U_o} \frac{U_o}{I_o}$$

С ΔI_o и I_o са означени изменението на товарния ток и неговата номинална стойност.

Вместо коефициентите на стабилизация често се използват т.нр. коефициенти на нестабилност:

1. Коефициент на нестабилност на напрежението

$$(1.4) \quad k_U = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i}$$

2. Вътрешно съпротивление на стабилизатора

$$(1.5) \quad R_i = \frac{\Delta U_o}{\Delta I_o}$$

3. Температурен коефициент на нестабилност

$$(1.6) \quad k_t = \frac{\Delta U_o}{\Delta t^o}$$

Освен от горните коефициенти за качествата на стабилизатора се съди и от обхват на стабилизация, от инертността му и от коефициента на полезно действие.

Обхват на стабилизация се наричат границите, в които изменението на променящата се величина не създава изменение на стабилизираното напрежение, по-голямо от допустимото, т.е. коефициентът на стабилизация остава в зададените норми.

Инертността на стабилизатора се определя от времето, след изтичането на което завършва преходният процес в стабилизатора при подаване на единичен смущаващ импулс.

Класификация на стабилизаторите може да се направи по различни признаци. Според принципа на действие те биват:

- а) параметрични;
- б) компенсационни.

В параметричните стабилизатори се използват електронни елементи с нелинейно съпротивление. Такива са силициевите стабилизатори.

Компенсационните стабилизатори представляват система за автоматично регулиране, затворена с отрицателна обратна връзка. Стабилизацията се постига за сметка на изменението на параметрите на регулиращ елемент, който се управлява от разликата между еталонно напрежение и сигнала от отрицателната обратна връзка.

Регулиращият елемент може да работи в непрекъснат активен или в ключов режим. Затова и стабилизаторите биват:

- а) с непрекъснато (аналогово) действие;
- б) с ключово (импулсно) действие.

Една единствена единна класификация на стабилизаторите не е възможно да се направи поради голямото разнообразие на признаците, по които се извършва класифицирането. За точното характеризиране на стабилизатора се използват определения по две, три или повече класификации.

1.2. ПАРАМЕТРИЧНИ СТАБИЛИЗATORI НА ПОСТОЯННО НАПРЕЖЕНИЕ

За стабилизиране на постоянно напрежение се използват полупроводникови прибори с нелинейно съпротивление, наречени стабилитрони. Най-широко приложение имат силициевите стабилитрони, които са специални полупроводникови диоди, работещи в режим на обратен лавинен пробив.

Волт-амперната характеристика на един силициев стабилитрон е показана на фиг. 1.1. Работният участък се намира между точките A и B. Точка A се характеризира с най-малък ток през стабилитрона и с най-ниско работно напрежение, а точка B - с най-голям допустим ток и с най-високото работно напрежение. Извън тези граници работата на стабилитрона е невъзможна.

Със силициев стабилитрон могат да се изработят следните основни схеми на параметрични стабилизатори: едностъпален стабилизатор, многостъпален стабилизатор, стабилизатор с динамично баластно съпротивление и стабилизатор с усилвател на ток.

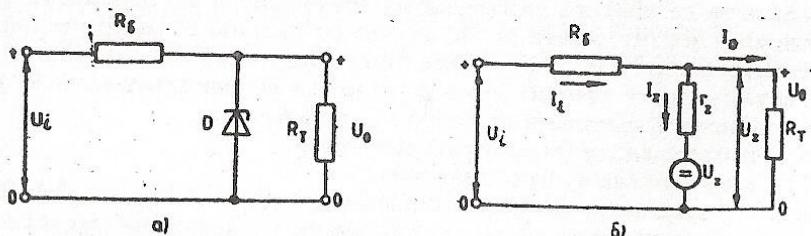
Фиг. 1.1. Волт-амперна характеристика на силициев стабилитрон

1.2.1. ПРОЕКТИРАНЕ НА ЕДНОСТЪПАЛЕН ПАРАМЕТРИЧЕН СТАБИЛИЗATOR НА НАПРЕЖЕНИЕ

Схемата на едностъпалния параметричен стабилизатор на напрежение е показана на фиг. 1.2.

Редът за изчисляване при оразмеряване на схемата е следният:

1. Уточнява се заданието, а именно: номинално изходно напрежение U_o ; допустими граници на отклонение на изходното напрежение



Фиг. 1.2. Едностъпален параметричен стабилизатор на напрежение:
а - принципна схема; б - еквивалентна схема

от номиналната му стойност поради производствен толеранс на стабилитроните от един тип; характер на изходния ток - постоянен или променящ се с времето и неговата стойност I_o ; коефициент на стабилизация k_{st} ; вътрешно съпротивление на стабилизатора R_i ; относително изменение на входното захранващо напрежение; коефициент на пулсации на изходното напрежение k_p .

2. Определят се:

а) максималната допустима стойност на изходното напрежение

$$(1.7) \quad U_{o\max} = U_o(1 + c);$$

б) минималната допустима стойност на изходното напрежение

$$(1.8) \quad U_{o\min} = U_o(1 - d),$$

където c е допустимото увеличение на изходното напрежение над номиналната му стойност;

d - допустимото намаление на изходното напрежение под номиналната му стойност.

3. Определя се динамичното съпротивление r_z на стабилитрона

$$(1.9) \quad r_z \leq R_i.$$

4. Определя се максималната стойност на тока през стабилитрона (приближително) -

$$(1.10) \quad I_{z\max} > (1,1 \div 2)I_{o\max}.$$

5. Избира се от каталог стабилитрон с подходящи параметри.

6. Изчислява се минималният ток през баластния резистор

$$(1.11) \quad I_{i\min} = I_{o\max} + I_{z\min},$$

където $I_{z\min}$ е минималният допустим работен ток на избрания стабилитрон.

7. Предварително се изчислява съпротивлението на баластния резистор

$$(1.12) \quad R_6 \approx \frac{U_{z\min} k_{st} r_z}{U_{z\min} - k_{st} r_z I_{i\min}} (1 + b + k_n),$$

където b е относителното намаление на входното напрежение;

$U_{z\min}$ - минималната стойност на напрежението на стабилизация на избрания стабилитрон;

r_z - динамичното съпротивление на избрания стабилитрон.

8. Изчисляват се номиналната и граничните стойности на входното напрежение

$$(1.13) \quad U_{i \min} = (U_{z \max} + R_6 I_{i \min})(1 + 0,5 k_n);$$

$$(1.14) \quad U_i = \frac{U_{i \min}}{1 - b};$$

$$(1.15) \quad U_{i \max} = U_i(1 + a),$$

където a е относителното увеличение на входното напрежение.

9. Определя се максималната стойност на тока през стабилитрона при така получените напрежения и баластно съпротивление

$$(1.16) \quad I_{z \max} = \frac{U_{i \max} - U_{z \min}}{R_6} - I_{o \min}.$$

10. Ако получената стойност на тока от т. 9 е допустима за избрания стабилитрон, изчисленията продължават от т. 13 на методиката. Ако стойността на максималния ток през стабилитрона надвишава максималната допустима стойност на избрания в т. 5 стабилитрон, съпротивлението на баластния резистор се преизчислява, като се използват данните от т. 4 и 8

$$(1.17) \quad R'_6 = \frac{U_{i \max} - U_{z \min}}{I_{o \min} + I_{z \min}}.$$

11. Отново се изчисляват стойностите на входното напрежение (т. 8).

12. Отново се проверява максималната стойност на тока през стабилитрона (т. 9). Ако и този път тя надвишава максималната допустима, избира се нов стабилитрон с по-голям максимален ток и изчисленията започват от т. 6.

13. Изчислява се коефициентът на стабилизация

$$(1.18) \quad k_{st} = \frac{U_{o \min}}{U_{i \max}} \left(1 + \frac{R_6}{R_{z \max}} + \frac{R_6}{r_z} \right).$$

14. Определя се мощността на баластния резистор

$$(1.19) \quad P_{R_6} = \frac{(U_{i \max} - U_{o \min})^2}{R_6}.$$

15. Определя се вътрешното съпротивление на стабилизатора

$$(1.20) \quad R_i = r_z.$$

16. Изчислява се средният входен ток на стабилизатора

$$(1.21) \quad I_i = \frac{U_i - U_{z \min}}{R_6}.$$

17. Определя се средният к.п.д.

$$(1.22) \quad \eta_{cp} = \frac{(U_{o \min} + U_{o \max}) I_{o \max}}{2 U_i I_i}.$$

Посочената последователност на изчисленията е препоръчителна, но в редица случаи може да бъде променена, например, ако захранващото напрежение е зададено предварително и не може да бъде изменено, ако предварително е зададен типът на стабилитрона и т.н.

По-долу е показан един вариант за проектиране на схемата от фиг. 1.2.

Пример 1.1. Да се проектира едностъпален параметричен стабилизатор на напрежение със следните данни: изходно напрежение $U_o = 13 \text{ V}$ с допустимо отклонение от тази стойност $+10\%$, -15% ; постоянен товарен ток $I_o = 10 \text{ mA}$; коефициент на стабилизация $k_{st} \geq 10$; вътрешно съпротивление $R_i \leq 20 \Omega$; относително изменение на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 10\%$; коефициент на пулсации на входното напрежение $k_n = 10\%$.

Изчисляване:

1. Уднаквяват се дименсията и се определят абсолютните граници на изходното напрежение

- относителното увеличение на входното напрежение е $a = 0,1$;
- относителното намаление на входното напрежение е $b = -0,15$;
- относителният коефициент на пулсации е $k_n = 0,1$;
- относителното допустимо увеличение на изходното напрежение е $c = 0,1$;
- относителното допустимо намаление на изходното напрежение е $d = 0,15$.

Максималната допустима стойност на изходното напрежение се получава

$$U_{o \max} = U_o(1 + c) = 13(1 + 0,1) = 14,3 \text{ V}.$$

Минималната допустима стойност на изходното напрежение се получава

$$U_{o \min} = U_o(1 - d) = 13(1 - 0,15) = 11 \text{ V}.$$

2. Избира се от каталог стабилитрон с подходящи параметри. Такъв е D814Д със следните данни: $U_z = 11,5 \div 14$ V, $r_z = 18 \Omega$ при $I_{z\min} = 5$ mA; $I_{z\max} = 24$ mA.

3. Изчислява се минималният ток през баластния резистор:

$$I_{i\min} = I_o + I_{z\min} = 10 + 5 = 15 \text{ mA}$$

4. Изчислява се съпротивлението на баластния резистор:

$$R_6 \approx \frac{U_{z\min} k_{ct} r_z}{U_{z\min} - k_{ct} r_z I_{i\min}} (1 + b + k_n) =$$

$$= \frac{11,5 \cdot 10 \cdot 18}{11,5 - 10 \cdot 8 \cdot 15 \cdot 10^{-3}} (1 + 0,1 + 0,1) = 282 \Omega$$

Избира се стандартна стойност 300 Ω .

5. Изчисляват се номиналната и граничните стойности на входното напрежение:

$$\begin{aligned} U_{i\min} &= (U_{z\max} + R_6 I_{i\min})(1 + 0,5k_n) = \\ &= (14 + 300 \cdot 15 \cdot 10^{-3})(1 + 0,5 \cdot 0,1) = 19,4 \text{ V}; \end{aligned}$$

$$U_i = \frac{U_{i\min}}{1 - b} = \frac{19,4}{1 - 0,1} = 21,5 \text{ V};$$

$$U_{i\max} = U_i(1 + a) = 21,5(1 + 0,1) = 23,6 \text{ V}.$$

6. Максималната стойност на тока през стабилитрон е

$$I_{z\max} = \frac{U_{i\max} - U_{z\min}}{R_6} - I_z = \frac{23,6 - 11,5}{300} - 0,01 = 30 \cdot 10^{-3}$$

$$A = 30 \text{ mA} > 24 \text{ mA}.$$

Получената стойност на тока е недопустима за избрания стабилитрон. Налага се да се преизчисли съпротивлението на баластния резистор с данните от т. 3 и 5.

$$R_6 = \frac{U_{i\max} - U_{z\min}}{I_o + I_{z\min}} = \frac{23,6 - 11,5}{(10 + 5) \cdot 10^{-3}} = 800 \Omega$$

Избира се стандартна стойност 820 Ω .

Отново се изчисляват стойностите на входното напрежение (т. 5):

$$\begin{aligned} U_{i\min} &= (U_{z\max} + R_6 I_{i\min})(1 + 0,5k_n) = \\ &= (14 + 820 \cdot 15 \cdot 10^{-3})(1 + 0,5 \cdot 0,1) = 27,6 \text{ V}; \end{aligned}$$

$$U_i = \frac{U_{i\min}}{1 - b} = \frac{27,6}{1 - 0,1} = 30,5 \text{ V};$$

$$U_{i\max} = U_i(1 + a) = 30,5(1 + 0,1) = 33,6 \text{ V}.$$

Проверява се отново максималната стойност на тока през стабилизатора:

$$I_{z\max} = \frac{U_{i\max} - U_{z\min}}{R_6} - I_T = \frac{33,6 - 11,5}{820} - 0,01 = 17 \cdot 10^{-3}$$

$$A = 17 \text{ mA} < 24 \text{ mA}.$$

7. Изчислява се коефициентът на стабилизация:

$$k_{ct} = \frac{U_{o\min}}{U_{i\max}} \left(1 + \frac{R_6}{R_T} + \frac{R_6}{r_z} \right) = \frac{11,5}{33,6} \left(1 + \frac{820}{1200} + \frac{820}{18} \right) = 14.$$

8. Мощността на баластния резистор е

$$P_{R_6} = \frac{(U_{i\max} - U_{o\min})^2}{R_6} = \frac{(33,6 - 11,5)^2}{820} = 0,58 \text{ W}.$$

Избира се резистор с мощност 1 W.

9. Изчислява се вътрешното съпротивление на стабилизатора:

$$R_i \approx r_z = 18 \Omega.$$

10. Изчислява се средният к.п.д. Затова е необходимо първо да се пресметне средният входен ток:

$$I_i = \frac{U_i - U_{z\min}}{R_6} = \frac{30,5 - 11,5}{820} = 23 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

$$\eta = \frac{(U_{o\min} + U_{o\max}) I_o}{2 U_i I_i} = \frac{(11,5 + 14) 0,01}{2 \cdot 30,5 \cdot 0,023} = 0,11.$$

С това проектирането на стабилизатора е завършено.

Ако захранващото напрежение е зададено предварително, проектирането на единостъпалния параметричен стабилизатор на напрежение се опростява и се свежда до избор на стабилитрон, определяне на стойността на R_6 и проверка на коефициента на стабилизация.

Пример 1.2. Да се проектира параметричният стабилизатор от фиг. 1.2 със следните данни: изходно напрежение $U = 7$ V с допустимо отклонение $\pm 25\%$, -0% ; товарен ток – постоянен $I_o = 1$ mA; входно напрежение $U_i = 12$ V; изменение на входното напрежение ± 1 V; пулсации няма.

Изчисляване

1. Относителното увеличение на изходното напрежение е $c = 0,25$, а относителното му намаление $-d = 0$. Максималната допустима стойност на изходното напрежение е

$$U_{o\max} = U_o(1 + c) = 7(1 + 0,25) = 8,75 \text{ V.}$$

Максималната допустима стойност на изходното напрежение е

$$U_{o\min} = U_o(1 - d) = 7(1 - 0) = 7 \text{ V.}$$

2. Избира се стабилитрон с подходящи параметри. Такъв е D814A със следните данни: $U_z = 7 \div 8,5 \text{ V}$; $r_z = 12 \Omega$ при $I_{z\min} = 5 \text{ mA}$; $I_{z\max\text{ доп}} = 40 \text{ mA}$.

3. Изчислява се минималният ток през баластния резистор

$$I_{i\min} = I_o + I_{z\min} = 1 + 5 = 6 \text{ mA.}$$

4. Определят се максималната и минималната стойност на захранващото напрежение

$$U_{i\max} = U_i + \Delta U_i = 12 + 1 = 13 \text{ V;}$$

$$U_{i\min} = U_i - \Delta U_i = 12 - 1 = 11 \text{ V.}$$

5. Определя се съпротивлението на баластния резистор (максимална стойност)

$$R_6 = \frac{U_{i\min} - U_{z\max}}{I_{i\min}} = \frac{11 - 8,5}{6 \cdot 10^{-3}} = 417 \Omega.$$

Избира се $R_6 = 390 \Omega$.

6. Проверява се максималната стойност на тока през стабилитрона

$$I_{z\max} = \frac{U_{i\max} - U_{z\min}}{R_6} = \frac{13 - 7}{390} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ A.}$$

$$I_{z\max} = 15 \text{ mA} < I_{z\max\text{ доп}} = 40 \text{ mA.}$$

7. Изчислява се коефициентът на стабилизация

$$k_{ct} = \frac{U_{o\min}}{U_{i\max}} \left(1 + \frac{R_6}{R_T} + \frac{R_6}{r_z} \right) = \frac{7}{13} \left(1 + \frac{390}{1200} + \frac{390}{12} \right) = 18.$$

8. Мощността на баластния резистор е

$$P_{R_6} = \frac{(U_{i\max} - U_{o\min})^2}{R_6} = \frac{(13 - 7)^2}{390} = 0,092 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност $0,125 \text{ W}$.

1.2.2. ПРОЕКТИРАНЕ НА ДВУСТЪПАЛЕН ПАРАМЕТРИЧЕН СТАБИЛИЗАТОР НА НАПРЕЖЕНИЕ

Схемата на двустъпалния параметричен стабилизатор на напрежение е показана на фиг. 1.3.

Редът на изчисленията е същият, както при едностъпалния стабилизатор, като двете стъпала се оразмеряват едно след друго. Последователността е следната:

1. Уточнява се заданието, а именно: номиналното изходно напрежение U_o ; допустимите граници на отклонение на изходното напрежение от номиналната му стойност, относително увеличение на изходното напрежение c и относително намаление на изходното напрежение d ; коефициентът на стабилизация k_{ct} ; вътрешното съпротивление на стабилизатора R_s ; относителното увеличение на входното напрежение a ; относителното намаление на входното напрежение b ; коефициентът на пулсации на входното напрежение k_p . Поради специфичните особености на тази схема товарният ток обикновено е постоянен или с много малки изменения във времето.

2. Общият коефициент на стабилизация се разпределя между двете стъпала, като се спазват съотношенията:

$$(1.23) \quad k_{ct1} = (2 \div 3)k_{ct2};$$

$$(1.24) \quad k_{ct} = k_{ct1} \cdot k_{ct2}.$$

3. Изчислява се приблизителната стойност на относителното изменение на изходното напрежение на втория (вторния) стабилизатор

$$(1.25) \quad \Delta U_1 = \frac{\Delta U_i}{k_{ct2}} = \frac{a + b}{k_{ct2}}.$$

Тази промяна обикновено е с малка стойност и позволява да се приеме, че първият (изходният) стабилизатор е захранен с неизменно напрежение. Затова се приема, че и токът през първия стабилитрон е неизменен.

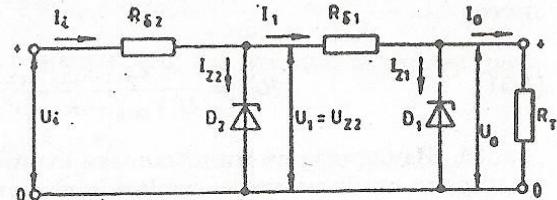
4. Определят се:

a) максималната допустима стойност на изходното напрежение

$$(1.26) \quad U_{o\max} = U_o(1 + c);$$

b) минималната допустима стойност на изходното напрежение

$$(1.27) \quad U_{o\min} = U_o(1 - d).$$



Фиг. 1.3. Двустъпален параметричен стабилизатор на напрежение

5. Определя се динамичното съпротивление на стабилитрона D_1

$$(1.28) \quad r_z < R_i .$$

Определя се приблизително максималната стойност на тока през стабилитрона D_1

$$(1.29) \quad I_{z1\max} \geq 1,2I_{o\max} .$$

7. По данните от т. 4–6 от каталог се избира стабилитрон с подходящи параметри.

8. Изчислява се минималният ток през баластния резистор R_{61}

$$(1.30) \quad I_{1\min} = I_o + I_{z1\min} ,$$

където $I_{z1\min}$ е минималният допустим работен ток на избрания стабилитрон.

9. Предварително се изчислява съпротивлението на баластния резистор

$$(1.31) \quad R_{61} = \frac{k_{ct1} \cdot r_{z1} \cdot U_{z1\min}}{U_{z1\min} - k_{ct1} \cdot r_{z1} \cdot I_{1\min}}$$

10. Изчислява се минималната стойност на входното напрежение на първия стабилизатор, което е едновременно и изходно напрежение на втория стабилизатор

$$(1.32) \quad U_{1\min} = U_{z1\max} + R_{61} I_{1\min} .$$

11. Избира се типът на втория стабилитрон, който трябва да отговаря на следните данни: $U_{z2\min} \geq U_{1\min}$ и $I_{z2\max} \geq 1,5I_{1\max}$.

12. Определя се максималната стойност на тока през първия стабилитрон при така полученото напрежение и баластно съпротивление

$$(1.33) \quad I_{z1\max} = \frac{U_{z2\max} - U_{z1\min}}{R_{61}} - I_o .$$

13. Ако получената стойност на тока от т. 12 е допустима за избрания стабилитрон, изчисляването продължава от т. 16 на методиката. Ако стойността на максималния ток през стабилитрона D_1 надвишава максималната допустима стойност на тока на избрания в т. 7 стабилитрон, съпротивлението на баластния резистор се преизчислява, като се използват данните от т. 8 и 12:

$$(1.34) \quad R_{61} = \frac{U_{z2\max} - U_{z1\min}}{I_{z1\min} + I_o} .$$

14. Отново се изчислява минималната стойност на входното напрежение на първия стабилизатор (т. 10). Избира се друг тип на втория стабилитрон, който да отговаря на условията от т. 11.

15. Отново се проверява максималната стойност на тока през първия стабилитрон (т. 12) при новите стойности на входното напрежение и новото баластно съпротивление.

16. Изчислява се мощността на резистора R_{61} :

$$(1.35) \quad P_{R_{61}} = \frac{(U_{z2\max} - U_{z1\min})^2}{R_{61}} .$$

17. Изчислява се максималният ток през баластния резистор R_{61}

$$(1.36) \quad I_{1\max} = I_o + I_{z1\max} .$$

18. Определя се минималният ток през втория баластен резистор R_{62}

$$(1.37) \quad I_{i\min} = I_{1\max} + I_{z2\min} .$$

19. Изчислява се съпротивлението на втория баластен резистор R_{62}

$$(1.38) \quad R_{62} = \frac{U_{z2\min} k_{ct2} r_{z2}}{U_{z2\min} - k_{ct2} r_{z2} I_{i\min}} (1 + b + k_n) .$$

20. Изчисляват се номиналната и граничните стойности на входното напрежение

$$(1.39) \quad U_{i\min} = (U_{z2\max} + R_{62} I_{i\min})(1 + 0,5k_n) ;$$

$$(1.40) \quad U_i = \frac{U_{i\min}}{1 - b} ;$$

$$(1.41) \quad U_{i\max} = U_i(1 + a) .$$

21. Проверява се максималната стойност на тока през втория стабилитрон D_2

$$(1.42) \quad I_{z2\max} = \frac{U_{i\max} - U_{z2\min}}{R_{62}} - I_{i\min} .$$

22. Изчислява се мощността на резистора R_{62}

$$(1.43) \quad P_{R_{62}} = \frac{(U_{i\max} - U_{z2\min})^2}{R_{62}} .$$

23. Изчислява се коефициентът на стабилизация на схемата

$$(1.44) \quad k_{ct} = \frac{U_{z1\ min}}{U_{i\ max}} \frac{R_{61} \cdot R_{62}}{r_{z1} r_{z2}} .$$

24. Вътрешното съпротивление на стабилизатора е

$$(1.45) \quad R_i \approx r_{z1} .$$

25. Изчислява се средният к.п.д. на стабилизатора

$$(1.46) \quad \eta_{cp} = \frac{2(U_{z1\ min} + U_{z1\ max}) I_o}{(U_{i\ min} + U_{i\ max})(I_{i\ min} + I_{i\ max})} .$$

Пример 1.3. Да се проектира двустъпален параметричен стабилизатор на напрежение със следните данни: изходно напрежение $U_o = 7 + 8,5$ V; товарен ток – неизменен $I_o = 5$ mA; коефициент на стабилизация $k_{ct} \geq 90$; изменение на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 15\%$; коефициент на пулсации на входното напрежение $k_p = 0,1$.

Изчисляване

1. Относителните изменения на входното напрежение са $a = 0,15$ и $b = 0,15$.

2. Избира се коефициентът на стабилизация на първия стабилизатор

$$k_{ct1} = 15 .$$

3. Изчислява се коефициентът на стабилизация на втория стабилизатор:

$$k_{ct2} = \frac{k_{ct}}{k_{ct1}} = \frac{90}{15} = 6 .$$

4. Изчислява се приблизителната стойност на относителната промяна на изходното напрежение на втория стабилизатор:

$$\Delta U_1 = \frac{\Delta U_i}{k_{ct2}} = \frac{a+b}{k_{ct2}} = \frac{0,15+0,15}{6} = 0,05 .$$

Тази малка стойност позволява да се допусне, че изходният стабилизатор е захранен с неизменно напрежение, следователно и токът през стабилитрона е постоянен.

5. Избира се типът на стабилитрона D_1 . Най-подходящ е D814A със следните данни: $U_{z1\ min} = 7$ V; $U_{z1\ max} = 8,5$ V; $r_{z1} = 6$ Ω при $I_{z1} = 5$ mA; максимално допустим ток $I_{z1\ max} = 40$ mA.

6. Изчислява се минималният ток през баластния резистор R_{61} :

$$I_{1\ min} = I_o + I_{z1\ min} = 5 + 5 = 10 \text{ mA} .$$

7. Изчислява се съпротивлението на баластния резистор R_{61} :

$$R_{61} = \frac{k_{ct1} \cdot r_{z1} U_{z1\ min}}{U_{z1\ min} - k_{ct1} r_{z1} I_{1\ min}} = \frac{15 \cdot 6 \cdot 7}{7 - 15 \cdot 6 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 103 \Omega .$$

Избира се стандартна стойност $R_{61} = 100$ Ω.

8. Изчислява се минималната стойност на входното напрежение на първия стабилизатор, което е едновременно и изходно напрежение на втория стабилизатор:

$$U_{z2\ min} = U_{1\ min} = U_{z2\ max} + R_{61} I_1 = 8,5 + 100 \cdot 0,01 = 9,5 \text{ V} .$$

9. Избира се типът на втория стабилитрон. Подходящ е D814Г със: $U_{z2\ min} = 10$ V; $U_{z2\ max} = 12$ V; $r_{z2} = 15$ Ω при $I_{z2} = 5$ mA; $I_{z2\ max} = 29$ mA.

10. Прави се проверка на максималния възможен ток през първия стабилитрон при $U_{z2\ max} = 12$ V:

$$I_{z1\ max} = \frac{U_{z2\ max} - U_{z1\ min}}{R_{61}} - I_T = \frac{12 - 7}{1200} - 0,005 = 0,045 \text{ A} .$$

Този ток е недопустим за D814A, затова се преизчислява съпротивлението на R_{61} :

$$R_{61} = \frac{U_{z2\ max} - U_{z1\ min}}{I_{z1\ min} + I_o} = \frac{12 - 7}{(5+5) \cdot 10^{-3}} = 500 \Omega .$$

11. Отново се изчислява минималната стойност на входното напрежение на първия стабилизатор (т. 8):

$$U_{z2\ min} = U_{1\ min} = U_{z1\ max} + R_{61} I_1 = 8,5 + 500 \cdot 0,01 = 13,5 \text{ V} .$$

12. Избира се друг тип на втория стабилитрон – D815E, със следните данни: $U_{z2\ min} = 13,5$ V; $U_{z2\ max} = 16,5$ V; $I_{z2\ min} = 25$ mA; $r_{z2} = 25$ Ω; $I_{z2\ max} = 550$ mA.

13. Прави се отново проверка на максималния възможен ток през първия стабилитрон при $U_{z2\ max} = 16,5$ V;

$$I_{z1\ max} = \frac{U_{z2\ max} - U_{z1\ min}}{R_{61}} - I_o = \frac{16,5 - 7}{500} - 0,005 = 0,014 \text{ A} .$$

Тази стойност е допустима.

14. Мощността на резистора R_{61} е

$$P_{R_{61}} = \frac{(U_{z2\ max} - U_{z1\ min})^2}{R_{61}} = \frac{(16,5 - 7)^2}{500} = 0,2 \text{ W} .$$

Избира се резистор с мощност 0,5 W.

15. Изчислява се максималният ток през баластния резистор R_{61} :

$$I_{1 \max} = I_o + I_{z1 \max} = 5 + 14 = 19 \text{ mA.}$$

16. Изчислява се минималният ток през баластния резистор R_{62} :

$$I_{i \min} = I_{1 \max} + I_{z2 \min} = 19 + 25 = 44 \text{ mA.}$$

17. Изчислява се съпротивлението на баластния резистор R_{62} :

$$\begin{aligned} R_{62} &= \frac{U_{z2 \min} k_{ct2} r_{z2}}{U_{z2 \min} - k_{ct2} r_{z2} I_{i \min}} (1 + b + k_n) = \\ &= \frac{13,5 \cdot 6,25}{13,5 - 6,25 \cdot 0,044} (1 + 0,15 + 0,1) = 146 \Omega. \end{aligned}$$

Избира се стандартна стойност $R_{62} = 150 \Omega$.

18. Изчислява се входното напрежение:

$$\begin{aligned} U_{i \min} &= (U_{z2 \max} + R_{62} I_{i \min}) (1 + 0,5 k_n) = \\ &= (16,5 + 150 \cdot 0,044) (1 + 0,5 \cdot 0,1) = 24,2 \text{ V}; \end{aligned}$$

$$U_i = \frac{U_{i \min}}{1 - b} = \frac{24,2}{1 - 0,15} = 28,4 \text{ V};$$

$$U_{i \max} = U_i (1 + a) = 28,4 (1 + 0,15) = 32,6 \text{ V.}$$

19. Изчислява се максималната стойност на тока през втория стабилитрон D_2 :

$$\begin{aligned} I_{z2 \max} &= \frac{U_{i \max} - U_{z2 \min}}{R_{62}} - I_{1 \min} = \frac{32,6 - 13,5}{150} - 0,01 = \\ &= 117 \cdot 10^{-3} \text{ A} < I_{z2 \max \text{ доп}} = 550 \text{ mA}. \end{aligned}$$

20. Изчислява се мощността на резистора R_{62} :

$$P_{R_{62}} = \frac{(U_{i \max} - U_{z2 \min})^2}{R_{62}} = \frac{(32,6 - 13,5)^2}{150} = 2,4 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност 3 W.

21. Изчислява се коефициентът на стабилизация:

$$k_{ct} = \frac{U_{z1 \min}}{U_{i \max}} \frac{R_{61} R_{62}}{r_{z1} r_{z2}} = \frac{7}{32,6} \frac{500 \cdot 150}{6,25} = 107.$$

22. Изчислява се вътрешното съпротивление на стабилизатора:

$$R_i = r_{z1} = 6 \Omega.$$

23. Изчислява се максималният входен ток на стабилизатора:

$$I_{i \max} = \frac{U_{i \max} - U_{z2 \min}}{R_{62}} = \frac{32,6 - 13,5}{150} = 0,127 \text{ A.}$$

24. Изчислява се средният к.п.д. на стабилизатора:

$$\eta_{cp} = \frac{2(U_{z1 \min} + U_{z1 \max}) I_o}{(U_{i \min} + U_{i \max})(I_{i \min} + I_{i \max})} = \frac{2(7 + 8,5)5}{(24,2 + 32,6)(44 + 127)} = 0,016 = 1,6\%.$$

Вижда се, че тази схема има много лоши енергийни показатели и не се препоръчва за мощнни консуматори.

1.2.3. ПРОЕКТИРАНЕ НА МОСТОВ ПАРАМЕТРИЧЕН СТАБИЛИЗАТОР НА НАПРЕЖЕНИЕ

Схемата на мостовия параметричен стабилизатор на напрежение е показана на фиг. 1.4. Резисторът R_6 и стабилитронът D представляват обикновен единстъпален параметричен стабилизатор и образуват две от рамената на моста. Резисторите R_1 и R_2 са другите две рамена. Товарът R_T е включен в диагонала $a-b$.

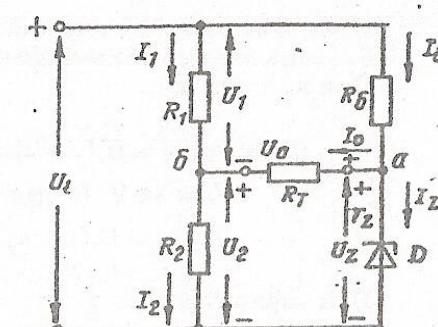
Изчисляването се извършва по следния начин:

1. Оразмерява се стабилизаторът R_6 , D . В този случай методът не се различава от предишните.

2. Делителят на напрежение R_1 , R_2 се подбира така, че да е спазено условието

$$(1.47) \quad \frac{r_z}{r_z + R_6} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0.$$

Тогава теоретично коефициентът на стабилизация е $k_{ct} = \infty$.



Фиг. 1.4. Мостов параметричен стабилизатор на напрежение

Пример 1.4. Да се проектира мостов параметричен стабилизатор на напрежение със следните изходни данни: изходно напрежение $U_o = 7 \text{ V}$; постоянен товарен ток $I_o = 1 \text{ mA}$; изменение на входното напрежение $\Delta U_{i \min} = \pm 15\%$.

Изчисляване

1. Относителното увеличение на входното напрежение $a = 0,15$, а относителното му намаление $-b = 0,15$.

2. Избира се стабилитрон за зададеното изходно напрежение. Подходящ е D814A със следните данни: $U_{z\min} = 7,0 \text{ V}$; $U_{z\max} = 8,5 \text{ V}$; $I_{z\min} = 2 \text{ mA}$; $I_{z\max} = 40 \text{ mA}$; $r_z = 6 \Omega$ при $I_z = 5 \text{ mA}$.

3. Изчислява се минималният ток през баластния резистор:

$$I_{i\min} = I_o + I_{z\min} = 1 + 5 = 6 \text{ mA}.$$

4. Изчислява се съпротивлението на баластния резистор. Възможни са два варианта:

а) При предварително избрано входно напрежение U_i .

В този случай желателно е да е изпълнено условието $U_i = 3U_{z\max}$. Например, ако входното напрежение е $U_i = 24 \text{ V}$, тогава

$$R_6 = \frac{U_{i\min}}{I_{i\min}} = \frac{U_i(1-b)}{I_{i\min}} = \frac{24(1-0,15)}{6 \cdot 10^{-3}} = 2040 \Omega.$$

Избира се резистор със съпротивление $2 \text{ k}\Omega$.

б) Когато входното напрежение не се задава.

Съпротивлението на резистора R_6 се избира в границите $R_6 = (10 \div 100)r_z$. В случая, понеже избраният стабилитрон има малко динамично съпротивление, се избира горната граница:

$$R_6 = 100.r_z = 100 \cdot 6 = 600 \Omega.$$

Избира се резистор със стандартно съпротивление $R_6 = 630 \Omega$.

5. Изчислява се захранващото напрежение:

При вариант а:

$$U_{i\min} = U_i(1-b) = 24(1-0,15) = 20,4 \text{ V};$$

$$U_i = 24 \text{ V} \text{ (зададено);}$$

$$U_{i\max} = U_i(1+a) = 24(1+0,15) = 27,6 \text{ V}.$$

При вариант б:

$$U_{i\min} = U_{z\max} + R_6 I_{i\min} = 8,5 + 630 \cdot 0,006 = 11,3 \text{ V};$$

$$U_i = \frac{U_{i\max}}{1-b} = \frac{11,3}{1-0,15} = 13,3 \text{ V};$$

$$U_{i\max} = U_i(1+a) = 13,3(1+0,15) = 15,3 \text{ V}.$$

6. Максималната стойност на тока през стабилитрона е:

При вариант а:

$$I_{z\max} = \frac{U_{i\max} - U_{z\min}}{R_6} - I_o = \frac{27,6 - 7}{2000} - 1 \cdot 10^{-3} = \\ = 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 9,3 \text{ mA} < 40 \text{ mA} \text{ (допустимо).}$$

При вариант б:

$$I_{z\max} = \frac{U_{i\max} - U_{z\min}}{R_6} - I_o = \frac{15,3 - 7}{630} - 1 \cdot 10^{-3} = \\ = 12 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 12 \text{ mA} < 40 \text{ mA} \text{ (допустимо).}$$

7. Мощността на баластния резистор е:

При вариант а:

$$P_{R_6} = \frac{(U_{i\max} - U_{z\min})^2}{R_6} = \frac{(27,6 - 7)^2}{2000} = 0,81 \text{ W}.$$

Избира се резистор с мощност $0,5 \text{ W}$.

При вариант б:

$$P_{R_6} = \frac{(U_{i\max} - U_{z\min})^2}{R_6} = \frac{(15,3 - 7)^2}{630} = 0,11 \text{ W}.$$

Избира се резистор с мощност $0,25 \text{ W}$.

8. Избира се съпротивлението на резистора R_2 . Ако няма други изисквания и ограничения, препоръчва се $R_2 = r_z = 6 \Omega$. Избира се стандартна стойност 5Ω . Тази стойност е валидна и за двета варианта.

9. Изчислява се съпротивлението на R_1 :

При вариант а:

$$R_1 = \frac{R_2(r_z + R_6) - r_z R_2}{r_z} = \frac{5(6 + 2000) - 6 \cdot 5}{6} = 1668 \Omega.$$

При вариант б:

$$R_1 = \frac{R_2(r_z + R_6) - r_z R_2}{r_z} = \frac{5(6 + 630) - 6 \cdot 5}{6} = 525 \Omega.$$

За прецизна настройка на стабилизатора резисторът R_1 се секционира и се изработка от последователно свързани постоянен резистор и резистор-тример. Съпротивлението на настройващия тример се препоръчва да бъде $0,25 \div 0,3$ от стойността на цялото съпротивление. Например във вариант а съпротивлението на тримера е

$$R_{1var} = 0,3R_1 = 0,3 \cdot 1668 = 520 \Omega.$$

Избира се стандартна стойност $R_{1var} = 470\Omega$. Тогава

$$R_{1const} = R_1 - 0,5R_{1var} = 1668 - 0,5 \cdot 470 = 1433 \Omega.$$

Избира се резистор със съпротивление $1,5k\Omega$.

Аналогично се изчислява съпротивлението на тримера и при вариант б.

10. Изчислява се максималната и минималната стойност на тока през делителя R_1, R_2 при номинално захранващо напрежение и граничните стойности на тримера:

При вариант а:

$$I_{1max} = \frac{U_i}{R_{1const} + R_2} = \frac{24}{1500 + 6} = 0,016 A;$$

$$I_{1min} = \frac{U_i}{R_{1const} + R_{1var} + R_2} = \frac{24}{1500 + 470 + 6} = 0,012 A.$$

Аналогични изчисления се правят и за вариант б.

11. Изходното напрежение (при вариант а) е

$$U_o = U_z - R_2(I_1 + I_0) = (7 \div 8,5) - 6 \cdot [(12 \div 16) + 1] \cdot 10^{-3} V.$$

В малките скоби са поставени граничните стойности на напрежението на стабилитрона и на тока през делителя R_1, R_2 . За всяко конкретно изгълнение и настройка на схемата тези величини имат точно определена стойност.

Падът на напрежение върху резистора R_2 намалява много малко изходното напрежение – между $0,073 V$ и $0,097 V$.

За вариант б се правят аналогични изчисления.

12. Изчислява се средният к.п.д. на стабилизатора:

При вариант а:

$$\begin{aligned} \eta_{cp} &= \frac{U_{z min} I_o}{U_1 \left(\frac{I_{1max} + I_{1min}}{2} + \frac{U_i - U_{z min}}{R_6} \right)} = \\ &= \frac{7 \cdot 10^{-3}}{24 \left(\frac{16 + 12}{2} + \frac{24 - 7}{2000} \right)} = 0,015 = 1,5\% \end{aligned}$$

1.2.4. ПРОЕКТИРАНЕ НА ПАРАМЕТРИЧЕН СТАБИЛИЗАТОР НА НАПРЕЖЕНИЕ С ДИНАМИЧНО БАЛАСТНО СЪПРОТИВЛЕНИЕ

Ако в едностъпалния параметричен стабилизатор на напрежение вместо баластен резистор се постави стабилизатор на ток с голямо динамично съпротивление се постига голям коефициент на стабилизация.

Принципната схема на стабилизатора е показана на фиг. 1.5a, а еквивалентната заместваща схема – на фиг. 1.5b. Оразмеряването на схемата се извършва по аналогичен начин както при обикновения параметричен стабилизатор на напрежение. Редът на изчисленията е следният:

1. Уточнява се заданието:

U_o – изходно напрежение;

c – допустимо увеличение на изходното напрежение над номиналната му стойност;

d – допустимо намаление на изходното напрежение под номиналната му стойност;

$I_{o min}$ – минимална стойност на товарния ток;

$I_{o max}$ – максимална стойност на товарния ток;

a – относително увеличение на захранващото напрежение;

b – относително намаление на захранващото напрежение;

k_{st} – коефициент на стабилизация;

R_i – вътрешно съпротивление на стабилизатора;

k_p – коефициент на пулсации на входното напрежение.

2. Определят се допустимите граници на работното напрежение на стабилитрона

(1.48)

$$U_{z min} > U_o(1 - d);$$

(1.49)

$$U_{z max} < U_o(1 + c).$$

3. Предварително приблизително се определя максималният работен ток на стабилитрона

(1.50)

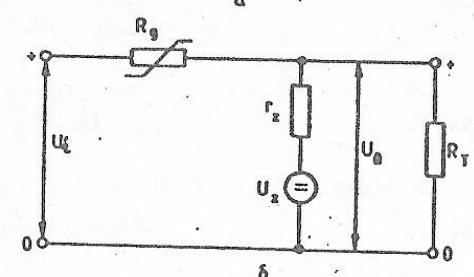
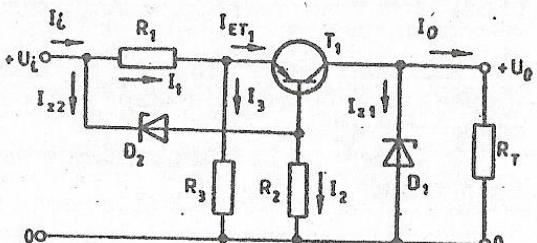
$$I_{z max} \approx 1,2 \Delta I_o = 1,2(I_{o max} - I_{o min}).$$

4. Определя се динамичното съпротивление на стабилитрона

(1.51)

$$r_z \leq R_i.$$

5. По данните от т. 2, 3 и 4 се избира от каталог типът на стабилитрона.



Фиг. 1.5. Параметричен стабилизатор на напрежение с динамично баластно съпротивление

а – принципна схема; б – еквивалентна схема

6. Определя се минималният ток през стабилитрона $I_{z \min}$ така, че да е спазено условието $r_z \leq R_i$.

7. Изчислява се максималният ток през стабилитрона

$$(1.52) \quad I_{z \max} = I_{z \min} + I_{o \max} - I_{o \min}.$$

Ако получената стойност на тока надхвърля допустимия ток на избрания стабилитрон, избира се друг тип стабилитрон и се преизчисляват т. 6 и 7.

8. Определят се номиналната и граничните стойности на входното напрежение

$$(1.53) \quad U_{i \min} = \frac{U_{z \max} + 5}{1 - k_n};$$

$$(1.54) \quad U_i = \frac{U_{i \min}}{1 - b};$$

$$(1.55) \quad U_{i \max} = U_i(1 + a).$$

9. Изчислява се максималното работно напрежение колектор-емитер на транзистора

$$(1.56) \quad U_{CE} = U_{i \max} - U_{z \min}.$$

10. Определя се максималното аварийно напрежение върху транзистора при късо съединение на изхода на стабилизатора

$$(1.57) \quad U_{CE \text{к.с.}} = U_{i \max}.$$

11. Изчислява се колекторният ток на транзистора

$$(1.58) \quad I_C = I_{z \min} + I_{o \max}.$$

12. Изчислява се максималната мощност, разсейвана от транзистора при номинален работен режим

$$(1.59) \quad P_{C \max} = U_{CE} I_C.$$

13. Максималната мощност, разсейвана от транзистора при късо съединение на изхода, е

$$(1.60) \quad P_{C \text{к.с.}} = U_{CE \text{к.с.}} I_C.$$

14. По данните от т. 9–13 се избира от каталог типът на транзистора.

15. Избира се типът на стабилитрона D_2 . Понеже във формула (1.53), т. 8 беше прието минимално работно напрежение на стабилизатора на ток, равно на 5 V, напрежението на стабилитрона трябва да е по-малко от 3 V, за да остане между база-колектор на транзистора напрежение поне 2 V. Стабилитрони с толкова малко работно напрежение се срещат рядко, затова често вместо стабилитрон се използват два или три диода, свързани последователно в права посока. При средна стойност на правото напрежение на един диод, равно на 0,7 V, еталонното напрежение на D_2 се получава равно на 1,4 V или 2,1 V и стабилизаторът на ток се проектира с тази стойност. Динамичното съпротивление на D_2 е равно на сумата от динамичните съпротивления на последователно свързаните диоди.

16. Изчислява се базовият ток на транзистора

$$(1.61) \quad I_B = \frac{I_C}{h_{21E}}.$$

17. Определя се минималната стойност на тока през резистора R_2

$$(1.62) \quad I_{z2 \min} \geq 10I_B.$$

Ако стойността на този ток е недостатъчна, за да осигури нормален работен режим на стабилитрона D_2 , избира се нова, по-голяма стойност на тока.

18. Изчислява се съпротивлението на резистора R_2

$$(1.63) \quad R_2 = \frac{U_{i \min} - U_{z2}}{I_{z2 \min}}.$$

19. Определя се максималният ток през R_2

$$(1.64) \quad I_{z2 \max} = \frac{U_{i \max} - U_{z2}}{R_2}.$$

20. Определя се разсейваната мощност в резистора R_2

$$(1.65) \quad P_{R_2} = (U_{i \max} - U_{z2}) I_{z2 \max}.$$

21. Изчислява се съпротивлението на резистора R_1

$$(1.66) \quad R_1 = \frac{U_{z2} - U_{BE}}{I_C} = \frac{U_{z2} - 0,6}{I_C}.$$

Ако е необходимо точно настройване на тока през транзистора, за да се компенсират толерансите на активните и пасивните елементи на схемата, резисторът R_1 се прави регулируем.

22. Определя се динамичното съпротивление на стабилизатора на ток

$$(1.67) \quad R_d = \frac{\Delta U_i}{\Delta I_{ET1}} = \frac{R_2}{r_{z2}} \left(\frac{h_{11E}}{h_{21E}} + 2R_1 \right) \approx 2 \frac{R_1 R_2}{r_{z2}}$$

23. Изчислява се коефициентът на стабилизация

$$(1.68) \quad k_{st} = \frac{U_{z1\ min}}{U_i} \cdot \frac{R_d}{r_{z1}}$$

Ако получената стойност е по-малка, но е близо до зададената и е необходимо коефициентът на стабилизация да се увеличи до два пъти, се включва резисторът R_3 . Неговото съпротивление се изчислява приблизително и той може да се изработи регулируем (тример-потенциометър)

$$(1.69) \quad R_3 \approx R_1 \frac{U_{i\ max} - U_{i\ min}}{r_{z2}(I_{z2\ max} - I_{z2\ min})}$$

Пример 1.4. Да се проектира параметричен стабилизатор на напрежение по схемата от фиг. 1.5а със следните изходни данни: изходно напрежение $U_o = 10 \text{ V} \pm 15\%$; променящ се товарен ток $I_o = 0 \div 15 \text{ mA}$; изменение на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 15\%$; коефициент на стабилизация $k_{st} \geq 100$; вътрешно съпротивление $R_i \leq 20 \Omega$; коефициент на пулсации на входното напрежение $k_n = 15\%$.

Изчисляване

1. Относителното увеличение на входното напрежение $a = 0,15$, а относителното му намаление $-b = 0,15$.

2. Относителните граници на изходното напрежение са:

- горна граница $c = 0,15$;
- добра граница $d = 0,15$.

3. Относителният коефициент на пулсации е $k_n = 0,15$.

4. Допустимите граници на стабилизираното изходно напрежение, т.е. на работното напрежение на стабилитрона са:

$$U'_{z\ min} \geq U_o(1-d) = 10(1-0,15) = 8,5 \text{ V};$$

$$U'_{z\ max} \leq U_o(1+c) = 10(1+0,15) = 11,5 \text{ V}.$$

5. С известно приближение предварително се изчислява максималният работен ток през стабилитрона:

$$I_{z1\ max} \approx 1,1 \Delta I_o = 1,1 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 0,0165 \text{ A}.$$

6. По данните от т. 4, 5 и от заданието се избира типът на стабилитрона. Подходящ е D814B със следните данни: $U_{z\ min} = 9 \text{ V}$; $U_{z\ max} = 10,5 \text{ V}$; $r_{z(1)} = 25 \Omega$ при ток на стабилизация 1 mA; $r_{z(5)} = 12 \Omega$ при ток на стабилизация 5 mA; $I_{z\ max} = 32 \text{ mA}$.

7. Минималният ток през стабилитрона се определя от условието за вътрешното съпротивление на стабилизатора $r_z = R_i \leq 20 \Omega$. Вижда се, че токът 1 mA не е достатъчен. Избира се $I_{z\ min} = 5 \text{ mA}$.

8. Изчислява се максималният ток през стабилитрона:

$$\begin{aligned} I_{z1\ max} &= I_{z1\ min} + I_{o\ max} - I_{o\ min} = \\ &= 5 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 10^{-3} - 0 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 20 \text{ mA}. \end{aligned}$$

Този ток е по-малък от максимално допустимия за стабилитрона (32 mA) и е приемлив.

9. Определят се стойностите на входното напрежение:

$$U_{i\ min} = \frac{U_{z\ max} + 5}{1 + k_n} = \frac{11,5 + 5}{1 + 0,15} = 20 \text{ V};$$

$$U_i = \frac{U_{i\ min}}{1 - b} = \frac{20}{1 - 0,15} = 23,5 \text{ V};$$

$$U_{i\ max} = U_i(1 + a) = 23,5(1 + 0,15) = 29 \text{ V}.$$

10. Изчислява се максималното работно напрежение колектор-емитер на транзистора:

$$U_{CE} \approx U_{i\ max} - U_{z1\ min} = 29 - 9 = 20 \text{ V}.$$

11. Максималното напрежение върху транзистора при аварийен режим (късо съединение на изхода) е:

$$U_{CE\ k.c.} \approx U_{i\ max} = 29 \text{ V}.$$

12. Определя се колекторния ток на транзистора:

$$I_C = I_{z1\ min} + I_{o\ max} = 5 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 10^{-3} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

13. Максималната мощност, разсейвана от транзистора при късо съединение в изхода е:

$$P_{C\ k.c.} = U_{CE\ k.c.} I_C = 29 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0,58 \text{ W}.$$

14. Максималната мощност, разсейвана от транзистора при нормален работен режим е:

$$P_C = U_{CE} I_C = 20 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0,4 \text{ W}.$$

15. По данните от т. 10–14 се избира типът на транзистора. Подходящ за целта е 2T6821D със следните данни: $U_{CE\ max} = 50 \text{ V}$; $I_C = 500 \text{ mA}$; $P_{C\ max} = 600 \text{ mW}$; $h_{21E} = 130$.

16. Избира се типът на диода D_2 . Понеже минималното напрежение върху стабилизатора на ток вече е определено да е равно на 5 V (т. 9), напрежението на стабилитрона D_2 трябва да бъде по-малко от 2 V. Вместо стабилитрон се поставят два силициеви диода тип КД5606, свързани последователно в права посока. При ток $I_{z2} \geq 1$ mA, напрежението върху всеки диод е приблизително 0,7 V, вътрешното съпротивление е $r_{z2} \approx 3$. Тогава

$$U_{z2\Sigma} = 2U_{D2} = 2 \cdot 0,7 = 1,4 \text{ V};$$

$$r_{z2\Sigma} = 2r_{z2} = 2 \cdot 3 = 6 \Omega.$$

17. Изчислява се базовият ток на транзистора:

$$I_B = \frac{I_C}{h_{21E}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{130} = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0,15 \text{ mA.}$$

18. Избира се минималният ток през резистора R_2 :

$$I_{z2\min} \geq 10I_B = 10 \cdot 0,15 = 1,5 \text{ mA.}$$

За осигуряване на стабилна работна точка на диодите токът се приема $I_{z2\min} = 2$ mA.

19. Изчислява се съпротивлението на резистора R_2 :

$$R_2 = \frac{U_{i\max} - U_{z2\Sigma}}{I_{z2\min}} = \frac{20 - 1,4}{2 \cdot 10^{-3}} = 9,3 \cdot 10^3 \Omega.$$

Избира се стандартна стойност $R = 9,1 \text{ k}\Omega$.

20. Максималният ток през R_2 е

$$I_{z2\max} = \frac{U_{i\max} - U_{z2\Sigma}}{R_2} = \frac{29 - 1,4}{9,1 \cdot 10^3} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 3 \text{ mA.}$$

Този ток е допустим за избраните диоди.

21. Мощността на резистора R_2 е

$$P_{R_2} = (U_{i\max} - U_{z2\Sigma})I_{z2\max} = (29 - 1,4)3 \cdot 10^{-3} = 0,083 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност 0,125 W.

22. Изчислява се съпротивлението на резистора R_1 :

$$R_1 = \frac{U_{z2\Sigma} - 0,6}{I_C} = \frac{1,4 - 0,6}{0,020} = 40 \Omega.$$

Избира се стандартна стойност $R_1 = 39 \Omega$.

За да може токът през транзистора да се регулира в известни граници при настройка, съпротивлението на този резистор трябва да се изменя. Това се постига чрез последователно свързване на постоянен резистор и тример (вж. пример 1.3).

23. Определя се динамичното съпротивление на стабилизатора на ток

$$R_d = 2 \frac{R_1 R_2}{r_{z2}} = \frac{2 \cdot 40 \cdot 9,1 \cdot 10^3}{6} = 121 \cdot 10^3 \Omega.$$

24. Изчислява се коефициентът на стабилизация

$$k_{st} = \frac{U_{z\min}}{U_{i\max}} \frac{R_d}{r_{z1}} = \frac{9}{29} \frac{121 \cdot 10^3}{12} = 3129.$$

Тази стойност отговаря на заданието. Ако в друг случай се окаже, че коефициентът на стабилизация не е достатъчен, той може да се повиши, като се увеличи R_d . Това се постига най-лесно чрез въвеждане на отрицателна обратна връзка по входно напрежение чрез резистора R_3 . Съпротивлението му се изчислява приблизително, а самият резистор може да се изработи от постоянен резистор и тример, за да може да се прави точна настройка.

25. Изчисляване на съпротивлението на резистора R_3 (ако е необходимо):

$$R_3 \approx R_1 \frac{U_{i\max} - U_{i\min}}{r_{z2\Sigma}(I_{z2\max} - I_{z2\min})} = 39 \frac{29 - 20}{6(3 - 2) \cdot 10^{-3}} = 60 \cdot 10^3 \Omega.$$

Този резистор може да се секционира на последователно свързани постоянен резистор $39 \text{ k}\Omega / 0,125 \text{ W}$ и тример $47 \text{ k}\Omega$.

1.2.5. ПРОЕКТИРАНЕ НА ПАРАМЕТРИЧЕН СТАБИЛИЗАТОР НА НАПРЕЖЕНИЕ С УСИЛВАТЕЛ НА ТОК В ИЗХОДА

Такъв стабилизатор на напрежение се прилага, когато е необходимо да се разшири обхватът по ток на параметричния стабилизатор. Схемата му е показана на фиг. 1.6. Резисторът R_b и стабилитрона D образуват обикновен параметричен стабилизатор на напрежение. Транзисторът T работи по схема с общ колектор, т.е. като усилвател на ток. Редът на изчисленията е следният:

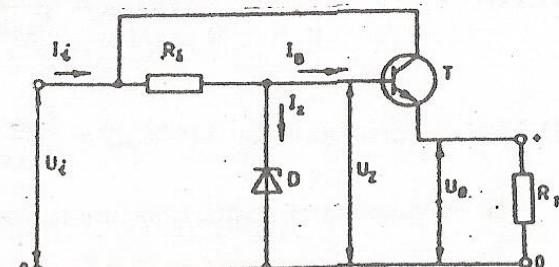
1. Уточняват се изходните данни:

U_o – изходно напрежение;

c – допустимо увеличение на изходното напрежение над номиналната му стойност;

d – допустимо намаление на изходното напрежение;

$I_{o\min}$ – минимална стойност на товарният ток;



Фиг. 1.6. Параметричен стабилизатор на напрежение с усилвател на ток

$I_{o \max}$ – максимална стойност на товарния ток;
 a – относително увеличение на захранващото напрежение;
 b – относително намаление на захранващото напрежение;
 k_n – коефициент на пулсации на захранващото напрежение;
 k_{ct} – коефициент на стабилизация;
 R_i – вътрешно съпротивление на стабилизатора.

2. Определят се допустимите граници на работното напрежение на стабилитрона

$$(1.70) \quad U'_{z \min} \geq U_o(1 - d) + 0,6;$$

$$(1.71) \quad U'_{z \max} \leq U_o(1 + c) + 0,6.$$

3. Избира се стабилитрон с подходяща мощност.

4. Определя се минималната стойност на статичния коефициент на усилване по ток на транзистора по две условия:

а) за постигане на зададеното вътрешно съпротивление на стабилизатора

$$(1.72) \quad h_{21E} \geq 1,1 \frac{r_z}{R_i};$$

б) за съгласуване на тока на стабилитрона с товарния ток

$$(1.73) \quad h_{21E} \geq 5 \frac{I_{o \max}}{I_{z \max} - I_{z \min}}.$$

От тези две стойности се избира по-голямата.

5. Определят се максималният и минималният базов ток на транзистора

$$(1.74) \quad I_{B \max} = \frac{I_{o \max}}{h_{21E}};$$

$$(1.75) \quad I_{B \min} = \frac{I_{o \min}}{h_{21E}}.$$

6. Изчислява се съпротивлението на баластния резистор

$$(1.76) \quad R_6 = \frac{U_{z \min} k_{ct} r_s}{U_{z \min} - k_{ct} r_s (I_{z \min} + I_{B \max})} (1 + b + k_n).$$

7. Определят се номиналната и граничните стойности на входното напрежение

$$(1.77) \quad U_{i \min} = [U_{z \max} + R_6 (I_{z \min} + I_{B \max})] (1 + 0,5 k_n);$$

$$(1.78) \quad U_i = \frac{U_{i \min}}{1 - b};$$

$$(1.79) \quad U_{i \max} = U_i (1 + a).$$

8. Определя се максималната стойност на тока през стабилитрона

$$(1.80) \quad I_{z \max} = \frac{U_{i \max} - U_{z \min}}{R_6}.$$

Ако получената стойност на тока е по-голяма от допустимата за избрания тип стабилитрон, съпротивлението на резистора R_6 се преизчислява по формулата

$$(1.81) \quad R_6 = \frac{U_{i \max} - U_{z \min}}{I_{z \min} + I_{B \min}}.$$

След това се преизчисляват стойностите на захранващото напрежение по т. 7 и отново се изчислява максималната стойност на тока през стабилитрона. Ако тя е допустима, изчислява се по-нататък.

9. Изчислява се коефициентът на стабилизация

$$(1.82) \quad k_{ct} = \frac{U_{z \min} - 0,6}{U_{i \max}} \left(1 = \frac{R_6}{h_{21E} R_T} + \frac{R_6}{r_z} \right).$$

10. Изчислява се мощността на баластния резистор

$$(1.83) \quad P_{R_6} = \frac{(U_{i \max} - U_{z \min})^2}{R_6}.$$

11. Изчислява се максималната стойност на напрежението колектор-емитер на транзистора

$$(1.84) \quad U_{CE \max} = U_{i \max} - (U_{z \min} - 0,6).$$

12. Определя се максималната мощност, разсейвана от транзистора

$$(1.85) \quad P_C \max = U_{CE \max} I_{o \max}.$$

13. От данните в т. 1, 4, 7 и 11 се избира типът на транзистора.

14. Изчислява се вътрешното съпротивление на стабилизатора

$$(1.86) \quad R_i = \frac{r_z + h_{11E}}{h_{21E}}.$$

15. Изчисляват се граничните стойности на к.п.д.

$$(1.87) \quad \eta_{\min} = \frac{(U_{z \min} - 0,6)I_{o \min}}{U_{i \max}(I_{o \min} + I_{z \max})};$$

$$(1.88) \quad \eta_{\max} = \frac{(U_{z \max} - 0,6)I_{o \max}}{U_{i \min}(I_{o \max} + I_{z \min})}.$$

Пример 1.5. Да се проектира параметричен стабилизатор на напрежение със следните данни: изходно напрежение $U_o = 11 \text{ V} \pm 10\%$; променящ се товарен ток $I_o = 10 \div 100 \text{ mA}$; изменение на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 10\%$; коефициент на стабилизация $k_{ct} \geq 10$; вътрешно съпротивление $R_i \leq 1,5 \Omega$; коефициент на пулсации на входното напрежение $k_n = 10\%$.

Изчисляване

1. Избор на схемата. Поради големия изходен ток, големия диапазон на изменението му и малкото изходно съпротивление, което трябва да се получи, най-подходяща е схемата на стабилизатора, показана на фиг. 1.6.

2. Уеднаквяване на дименсиите. Относителното увеличение на входното напрежение е $a = 0,1$, а относителното му намаление $-b = 0,1$. Относителният коефициент на пулсации е $k_n = 0,1$. Допустимите относителни граници на изходното напрежение са: увеличение $-c = 0,1$, намаление $-d = 0,1$.

3. Допустимите граници на работното напрежение на стабилитрона са:

$$U_{z \min} > U_o(1 - d) + U_{BE} = 11(1 - 0,1) + 0,6 = 9,6 \text{ V};$$

$$U_{z \max} < U_o(1 + c) + U_{BE} = 11(1 + 0,1) + 0,6 = 12,7 \text{ V}.$$

4. Подходящ тип стабилитрон е D814Г със следните данни: $U_{z \min} = 10 \text{ V}$; $U_{z \max} = 12 \text{ V}$; $r_z = 15 \Omega$ при $I_{z \min} = 5 \text{ mA}$; $I_{z \max} = 29 \text{ mA}$.

5. Статичният коефициент на усилване на транзистора T трябва да удовлетворява условията

$$\text{a)} h_{21E} \geq 1,2 \cdot \frac{r_z}{R_i} = 1,2 \cdot \frac{15}{1,5} = 12;$$

$$\text{b)} h_{21E} \geq (5 \div 10) \frac{I_{o \max}}{I_{z \max} - I_{z \min}} = (5 \div 10) \frac{100 \cdot 10^{-3}}{(29 - 5) \cdot 10^{-3}} = 20 \div 40.$$

Избира се ориентировъчно $h_{21E} = 50$.

6. Максималният и минималният базов ток на транзистора са:

$$I_{B \max} = \frac{I_{o \max}}{h_{21E}} = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{50} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ A};$$

$$I_{B \min} = \frac{I_{o \min}}{h_{21E}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{50} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

7. Изчислява се съпротивлението на баластния резистор

$$R_6 \approx \frac{U_{z \min} k_{ct} r_z}{U_{z \min} - k_{ct} r_z (I_{z \min} + I_{B \max})} (1 + b + k_n) = \\ = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{10 - 10 \cdot 15 (5 + 2) \cdot 10^{-3}} (1 + 0,1 + 0,1) = 200 \Omega.$$

8. Изчисляват се номиналната стойност и граничните стойности на входното напрежение

$$U_{i \min} = [U_{z \max} + R_6(I_{z \min} + I_{B \max})](1 + 0,5k_n) = \\ = [12 + 200(5 + 2) \cdot 10^{-3}](1 + 0,5 \cdot 0,1) = 14 \text{ V};$$

$$U_i = \frac{U_{i \min}}{1 - b} = \frac{14}{1 - 0,1} = 15,5 \text{ V};$$

$$U_{i \max} = U_i(1 + a) = 15,5(1 + 0,1) = 17 \text{ V}.$$

9. Максималната стойност на тока през стабилитрона е

$$I_{z \max} = \frac{U_{i \max} - U_{z \min}}{R_6} - I_{B \min} = \frac{17 - 10}{200} - 0,2 \cdot 10^{-3} = \\ = 35 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 35 \text{ mA} > 29 \text{ mA}.$$

10. Преизчислява се съпротивлението на R_6

$$R_6 = \frac{U_{i \max} - U_{z \min}}{I_{z \min} + I_{B \min}} = \frac{17 - 10}{(5 + 0,2) \cdot 10^{-3}} = 1340 \Omega.$$

Избира се стандартна стойност $1,3 \text{ k}\Omega$.

11. Преизчисляват се стойностите на захранващото напрежение

$$U_{i \min} = [U_{z \max} + R_6(I_{z \min} + I_{B \max})](1 + 0,5k_n) = \\ = [12 + 1300(5 + 2) \cdot 10^{-3}](1 + 0,5 \cdot 0,1) = 22 \text{ V};$$

$$U_i = \frac{U_{i \min}}{1 - b} = \frac{22}{1 - 0,1} = 24,4 \text{ V};$$

$$U_{i \max} = U_i(1 + a) = 24,4(1 + 0,1) = 26,8 \text{ V}.$$

12. Максималната стойност на тока през стабилитрона е

$$I_{z \max} = \frac{U_{i \max} - U_{z \min}}{R_6} - I_{B \min} = \frac{26,8 - 10}{1300} - 0,0002 = \\ = 0,013 \text{ A} = 13 \text{ mA} < 29 \text{ mA.}$$

13. Изчислява се коефициентът на стабилизация

$$k_{ct} = \frac{U_{z \min} - U_{BE}}{U_{i \max}} \left(1 + \frac{R_6}{h_{21E} R_T} + \frac{R_6}{r_z} \right) = \\ = \frac{10 - 0,6}{26,8} \left(1 + \frac{1300}{50.100} + \frac{1300}{15} \right) = 30,8 > 10.$$

14. Изчислява се мощността на баластния резистор R_6

$$P_{R_6} = \frac{(U_{i \max} - U_{z \min})^2}{R_6} = \frac{(26,8 - 10)^2}{1300} = 0,21 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност 0,5 W.

15. Изчислява се максималната стойност на напрежението колектор-емитер на транзистора

$$U_{CE \ max} = U_{i \ max} - (U_{z \ min} - U_{BE}) = 26,8 - (10 - 0,6) = 17,4 \text{ V.}$$

16. Максималната мощност, разсейвана от транзистора, е

$$P_C = U_{CE \ max} I_{o \ max} = 17,4 \cdot 0,1 = 1,74 \text{ W.}$$

17. Избира се транзистор тип 2T9135A със следните данни:

$$U_{CE \ max} = 45 \text{ V}; I_C \ max = 1 \text{ A}; P_{tot} = 8 \text{ W}; h_{21E} = 55; h_{11E} = 40 \Omega.$$

18. Изчислява се вътрешното съпротивление на стабилизатора

$$R_i = \frac{r_z + h_{11E}}{h_{21E}} = \frac{15 + 40}{55} = 1 \Omega < 1,5 \Omega.$$

19. Изчисляват се граничните стойности на к.п.д.

$$\eta_{\min} = \frac{(U_{z \ min} - U_{BE}) I_{o \ min}}{U_{i \ max} (I_{o \ min} + I_{z \ max})} = \frac{(10 - 0,6) 10 \cdot 10^{-3}}{26,8 (10 + 13) \cdot 10^{-3}} = 0,15;$$

$$\eta_{\max} = \frac{(U_{z \ max} - U_{BE}) I_{o \ max}}{U_{i \ min} (I_{o \ max} + I_{z \ min})} = \frac{(12 - 0,6) 100 \cdot 10^{-3}}{22 (100 + 5) \cdot 10^{-3}} = 0,5.$$

2. ОБЩИ ПРИНЦИПИ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА ТОКОЗАХРНВАЩИ УСТРОЙСТВА С КОМПЕНСАЦИОННИ СТАБИЛИЗATORI НА НАПРЕЖЕНИЕ ОТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЕН ТИП

Последователност на проектирането

При проектиране на стабилизиращи токозахрнвачи устройства се препоръчва следния ред на изчисляване:

1. Избор на схемата.

2. Оразмеряване на регулиращия елемент.

3. Проектиране на елементите в схемите за еталонното напрежение, за обратните връзки, на усилвателя на разъгласуване, за защити и др.

4. Проектиране на токоизправителя и изгражданция филтър.

2.1. ИЗБОР НА СХЕМАТА

Изборът на схемата на стабилизатора е една от най-отговорните задачи при проектирането. Върху него оказват влияние както данните от техническото задание на проекта, така и специфичните работни условия, икономически и технологични съображения, околната среда и др. Тук трябва да се спазват някои основни правила:

1. Задължително да се използват само силициеви полупроводникови прибори.

2. Да се използват с предимство интегрални схеми на стабилизатори.

3. Ако се налага стабилизаторът на напрежение да се проектира с дискретни елементи, винаги да се предпочитат схемите на компенсационни стабилизатори на напрежение от последователен тип. Схеми с паралелни стабилизатори да се прилагат само при източник на ток, или когато е възможно товарният ток да си смени посоката, т.е. консуматорът да стане генератор.

2.2. ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА РЕГУЛИРАЩИЯ ЕЛЕМЕНТ

Оразмеряването се състои в избор на транзистор или схема на съставен транзистор, който да издържа на всички режими на работа на стабилизатора – работни и аварийни. Тъй като това е най-натоварението по мощност елемент в схемата, необходимо е да се обръне сериозно внимание на неговото правилно оразмеряване, за да се получи необходимата сигурност в работата на стабилизатора, без да се повиши излишно неговата цена. Тук се извършва и изборът на начина за охлаждане на регулиращия елемент и топлинните изчисления на охлажддащите елементи.

2.3. ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ЕЛЕМЕНТИТЕ В СХЕМИТЕ ЗА ЕТАЛОННО НАПРЕЖЕНИЕ, ЗА ОБРАТНИ ВРЪЗКИ, ЗА ЗАЩИТИ И ДРУГИ

При тези изчисления се оразмеряват всички останали елементи на стабилизатора и се определят окончательните му параметри – коефициент на стабилизация, вътрешно съпротивление, коефициент на филтрация и др. Поради големия толеранс на статичния коефициент на усилване на транзисторите тези изчисления дават резултати с известно приближение. Затова се препоръчва използването на опростени методи, даващи необходимата точност за инженерната практика при минимален брой изходни данни и изчислителни операции. За да се постигнат практически зададените параметри на стабилизатора, при оразмеряването на елементите му се използват данните за най-лошите им характеристики. Това дава сигурност на проектирането.

В зависимост от избраната схема на стабилизатора някои от избранныте операции при проектирането могат да не са необходими, например при използването на интегрални схеми с вградени източници на еталонно напрежение и защита от токово претоварване.

2.4. ПРОЕКТИРАНЕ НА ТОКОИЗПРАВИТЕЛЯ И ИЗГЛАЖДАЩИЯ ФИЛТЪР

За изходни данни се използват стойностите, получени за входните напрежения и токовете на стабилизатора. Когато захранването е от еднофазна мрежа с напрежение 220 V, 50 Hz, винаги токоизправителят работи с капацитивен товар. Проектирането му се извършва по графоаналитичния метод за оразмеряване на токоизправител със загуби и капацитивен товар. Накрая се проектира трансформаторът, понеже изходните данни за него се определят едва след проектиране на токоизправителя.

3. ПРОЕКТИРАНЕ НА ОХЛАЖДАЩИЯ РАДИАТОР ЗА МОЩНИ ТРАНЗИСТОРИ И ИНТЕГРАЛНИ СХЕМИ

Тук се разглежда само най-простият и най-често срещаният в практиката случай на естествено въздушно охлаждане. Съществуват две постановки на задачата:

- a) зададена е топлинната мощност, която трябва да се отведе чрез радиатора;
- b) зададен е предварително видът на радиатора и се търси допустимата топлинна мощност, която той може да отведе в околната среда.

Изчисляването се извършва по следния начин:

Вариант a. Зададена е топлинната мощност P_C , която трябва да се отведе чрез радиатора. Освен това са необходими още следните изходни данни:

- максималната температура на околната среда t_a ;
- максимално допустимата температура на прехода колектор-емитер на транзистора $t_{j\max}$;
- топлинното съпротивление преход-корпус на транзистора $R_{t_{jc}}$ (от каталога), ако $R_{t_{jc}}$ не е посочено в каталога, то може да се изчисли по формулата

$$(3.1) \quad R_{t_{jc}} \approx \frac{t_{j\max} - t_a}{P_{C\max}}, \text{ } ^\circ\text{C/W};$$

— начина на закрепване на транзистора върху радиатора – със или без изолационна подложка; трябва да се знае и нейното топлинно съпротивление $R_{t_{cp}}$.

Редът за изчисляване е следният:

1. Определя се сумарното топлинно съпротивление преход-радиатор:

$$(3.2) \quad R_{t_{jp}} = R_{t_{jc}} + R_{t_{cp}}, \text{ } ^\circ\text{C/W}.$$

Ако транзисторът се закрепва директно върху радиатора, повърхностите са гладки и е употребена силиконова паста, $R_{t_{cp}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$. Ако е използвана изолационна подложка, нейното топлинно съпротивление трябва да се прибави към горното.

2. Определя се топлинното съпротивление на радиатора

$$(3.3) \quad R_{t_p} = \frac{t_j - t_a}{P_C} - R_{t_{jp}}.$$

3. Изчислява се площта на радиатора по приблизителната формула

$$(3.4) \quad S_p = \frac{1200}{R_{t_p}}, \text{ cm}^2.$$

Тук трябва да се работи само с активно охлаждащата се повърхност на радиатора. Ако част от площта му е долепена до топлоизолиращи детайли, тя трябва да се приспадне от общата охлаждаща площ.

Пример 3.1. Да се изчисли площта на радиатор за естествено въздушно охлаждане на транзистор тип 2N3055 със следните данни: максимална мощност върху колектора $P_C = 40 \text{ W}$; максимална температура на околната среда $t_a = 45^\circ\text{C}$; приета (със запас) максимална работна температура на прехода колектор-емитер $t_j = 150^\circ\text{C} < t_{j,\max} = 200^\circ\text{C}$; топлинно съпротивление преход-корпус $R_{t,jc} = 1,5^\circ\text{C/W}$. Закрепването на транзистора върху радиатора е директно, със силиконова паста.

Изчисляване

1. Определя се топлинното съпротивление преход-радиатор:

$$R_{t,jp} = R_{t,jc} + R_{cp} = 1,5 + 0,5 = 2^\circ\text{C/W}.$$

2. Определя се топлинното съпротивление на радиатора:

$$R_{tp} = \frac{t_j - t_a}{P_C} - R_{t,jp} = \frac{150 - 45}{40} - 2 = 0,62^\circ\text{C/W}.$$

3. Изчислява се активната площ на радиатора:

$$S_p = \frac{1200}{0,62} \approx 2000 \text{ cm}^2.$$

Пример 3.2. Да се изчисли площта на радиатор за естествено въздушно охлаждане на транзистор тип KD615 със следните работни данни: отделена топлинна мощност върху колектора $P_C = 20 \text{ W}$; максимална температура на околната среда $t_a = 45^\circ\text{C}$; приета работна температура на прехода колектор-емитер $t_{j,c} = 120^\circ\text{C}$.

Топлинното съпротивление преход-корпус не е дадено в каталога. Дадени са данни за $P_{C,\max} = 70 \text{ W}$ и $t_{j,\max} = 155^\circ\text{C}$.

Закрепването на транзистора върху радиатора е чрез изолационна подложка с $R_{cp} = 1^\circ\text{C/W}$.

Изчисляване

1. Изчислява се топлинното съпротивление преход-корпус:

$$R_{t,jc} = \frac{t_{j,\max} - 20}{P_{C,\max}} = \frac{155 - 20}{70} = 1,9^\circ\text{C/W}.$$

2. Изчислява се сумарното топлинно съпротивление преход-радиатор:

$$R_{t,jp} = R_{t,jc} + R_{cp} = 1,9 + 1 = 2,9^\circ\text{C/W}.$$

3. Определя се топлинното съпротивление на радиатора:

$$R_{tp} = \frac{t_j - t_a}{P_C} - R_{t,jp} = \frac{120 - 45}{20} - 2,9 = 0,85^\circ\text{C/W}.$$

4. Изчислява се активната повърхност на радиатора:

$$S_p = \frac{1200}{R_{tp}} = \frac{1200}{0,85} = 1412 \text{ cm}^2.$$

Вариант 6. Зададен е предварително видът на радиатора, т.е. неговото топлинно съпротивление R_{tp} . Зададени са още следните изходни данни:

- максималната температура на околната среда t_a ;
- максималната допустима температура на прехода колектор-емитер на транзистора $t_{j,\max}$;
- топлинното съпротивление преход-корпус на транзистора $R_{t,jc}$;
- начинът на закрепване на транзистора върху радиатора – със или без изолационна подложка.

Редът на изчисленията е следният:

1. Определя се сумарното топлинно съпротивление преход-околнна среда

$$(3.5) \quad R_{t,\Sigma} = R_{t,jc} + R_{cp} + R_{tp}, \text{ } ^\circ\text{C/W}.$$

Ако $R_{t,jc}$ не е дадено в каталога, то се определя по формула (3.1).

2. Определя се максималната температурна разлика между прехода колектор-емитер и околната среда:

$$(3.6) \quad \Delta t = t_j - t_a, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3. Изчислява се мощността, отделена в колектора, при която се достига тази температура:

$$(3.7) \quad P_C = \frac{\Delta t}{R_{t,\Sigma}}, \text{ W}$$

Пример 3.3. Да се изчисли максималната мощност, която може да разсейва транзисторът 2N3055, монтиран върху една алуминиева стена на кутия от електронна апаратура с размери $265 \times 230 \text{ mm}$. Между транзистора и стената има изолационна подложка с $R_{cp} = 0,5^\circ\text{C/W}$. Максималната температура на околната среда е $t_a = 45^\circ\text{C}$; максималната допустима температура на кристала е $t_j = 150^\circ\text{C}$; топлинното съпротивление преход-корпус на транзистора е $R_{t,jc} = 1,5^\circ\text{C/W}$.

Изчисляване

1. Изчислява се активната охлаждаща повърхност на радиатора. Понеже това е стена от кутия на апарат, работна повърхност е само външната:

$$S_p = 26,5 \cdot 23,0 = 610 \text{ cm}^2.$$

2. Изчислява се топлинното съпротивление на радиатора:

$$R_{tp} = \frac{1200}{S_p} = \frac{1200}{610} \approx 2 \text{ } ^\circ\text{C/W.}$$

3. Изчислява се сумарното топлинно съпротивление преход-околна среда:

$$R_{t\Sigma} = R_{tjc} + R_{tcp} + R_{tp} = 1,5 + 0,5 + 2 = 4 \text{ } ^\circ\text{C/W.}$$

4. Определя се максималната температурна разлика между прехода и околната среда:

$$\Delta t = t_j - t_a = 150 - 45 = 105 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

5. Изчислява се максималната допустима мощност, която транзисторът може да отдели при тези работни условия:

$$P_C = \frac{\Delta t}{R_{t\Sigma}} = \frac{105}{4} = 26 \text{ W.}$$

4. ЗАЩИТА НА СТАБИЛИЗАТОРИТЕ И ТОВАРА ОТ СВРЪХТОКОВЕ И ПРЕНАПРЕЖЕНИЯ

4.1. ЗАЩИТА ОТ СВРЪХТОКОВЕ

По-голям ток от номиналния (свръхток) на изхода на стабилизатора може да се появи като следствие от включването на неподходящ товар, авария в захранващото устройство или късо съединение в изходната верига. Понеже стабилизаторът се стреми да поддържа напрежението на изхода си постоянно и вътрешното му съпротивление е малко, токът нараства многократно и довежда до повреда в стабилизатора или товара. За да се защити стабилизаторът от свръхток, се използват специални методи и схемни решения. Според използваните средства за реализация, защитите се делят на две групи:

- с общо предназначение;
- с електронни схеми.

Зашитите с общо предназначение биват:

1. Разтопляем предпазител. Това е защитата, която се отличава с абсолютна сигурност и безотказност. Използва се задължително във всяко токозахранващо устройство. Когато има вградена и друга защита, разтопляемият предпазител е дублираща защита.

Предимствата на разтопляемите предпазители са:

- безотказност;
- ниска цена;
- пристапа към изработка.

Недостатъците им са:

- неточно фиксиран праг на действие;
- невъзможност за автоматично самовъзстановяване;
- необходимост от резервни вложки.

Изброените предимства и недостатъци правят този вид защита необходима като дублираща при по-сложните токозахранващи устройства и като основна при най-простите и маломощни токозахранващи устройства.

2. Автоматични предпазители (автомати). Това са електромеханични апарати, които разкъсват веригата на тока по механичен път при възникване на свръхток. Използват се главно при тиристорните устройства.

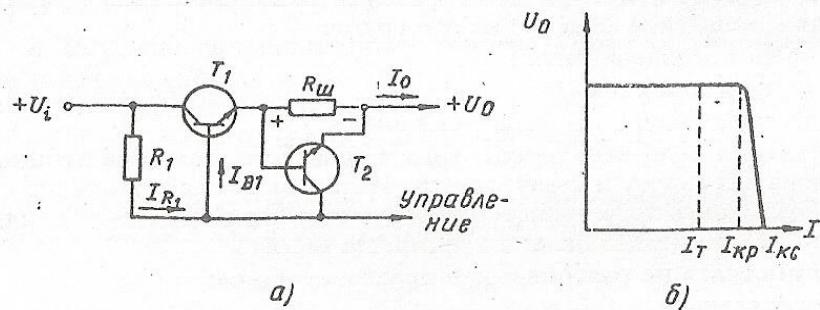
3. Релейна защита. Използва се токово реле като измервателен апарат, което въздейства върху някакъв изключвател. Прилага се по-рядко (за големи мощности).

Електронните защити биват:

- Защита чрез токоограничаване.
- Защита с релейно действие.

4.1.1. ЕЛЕКТРОННА ЗАЩИТА ОТ ТОКОВО ПРЕТОVARВАНЕ ЧРЕЗ ТОКООГРАНИЧАВАНЕ

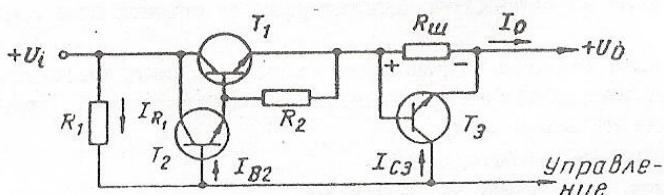
Тази защита въздейства върху регулиращия транзистор на стабилизатора по такъв начин, че той ограничава максималния ток или тока на късо съединение до определена, безопасна стойност. Най-простият вариант е показан на фиг. 4.1a. Транзисторът T_1 е регулиращият елемент на стабилизатора, а транзисторът T_2 е от схемата за защита. Товарният ток създава пад на напрежение върху измервателното съпротивление $U_{R_{sh}} = I_o R_{sh}$. Когато това напрежение надхвърли праговото напрежение U_{BET2} на транзистора T_2 , той се отпуска и като шунтира прехода база-емитер на T_1 , ограничава тока през него. Товарната характеристика на стабилизатора с такава защита е показана на фиг. 4.1б.



Фиг. 4.1. Електронна защита от свръхток чрез токоограничаване
a) – принципна схема; б) – волт-амперна характеристика на стабилизатора

Пример 4.1. За последователен компенсационен стабилизатор на напрежение да се проектира защита по ток от вида, показан на фиг. 4.1a. Изходните данни са: максимално входно напрежение $U_{i\ max} = 20$ V; изходно напрежение $U_o = 12$ V; товарен ток $I_o = 2$ A. Токът на задействане на защитата да бъде $I_{kp} = 2,5$ A.

Схемата на защитата е показана на фиг. 4.2. Регулиращият транзистор е съставен, по схема Дарлингтон. Транзисторът T_1 е от тип 2N3055, а транзисторът T_2 – 2T9135. Базовият ток на съставния транзистор е $I_{BT2} = 0,66$ mA. Резисторът $R_1 = 2,4$ k Ω .



Фиг. 4.2. Схема на защитата от пример 4.1

Изчисляване

1. Изчислява се максималният ток през R_1 в режим на късо съединение:

$$I_{R1\text{kc}} = \frac{U_{i\ max}}{R_1} = \frac{20}{2,4 \cdot 10^3} = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ A.}$$

2. Изчислява се максималният колекторен ток през транзистора T_3 :

$$I_{CT3} \approx I_{R1\text{kc}} = 8,3 \text{ mA.}$$

3. Работното напрежение на транзистора T_3 е:

$$U_{CET3} = U_{R_{sh}} + U_{BET1} + U_{BET2} = U_{BET3} + U_{BET1} + U_{BET2} = \\ = 0,6 + 0,6 + 0,6 = 1,8 \text{ V.}$$

4. Избира се маломощен транзистор тип 2T3168A със следни-те данни: $U_{CE\ max} = 25$ V; $U_{CEsat} = 0,3$ V; $h_{21E} = 240$; $I_{C\ max} = 100$ mA; $P_{C\ max} = 0,2$ W.

Данните са за колекторен ток 10 mA.

5. Проверява се условието за задействане на защитата:

$$U_{CEsatT3} < U_{BET1} + U_{BET2};$$

$$0,3 < 0,6 + 0,6 = 1,2 \text{ V}$$

– транзисторът отговаря на условието.

6. Определя се стойността на R_{sh} :

$$R_{sh} = \frac{U_{BET3}}{I_{kp}} = \frac{0,6}{2,5} = 0,24 \Omega.$$

7. Определя се входното съпротивление на T_3 :

$$h_{11ET3} = \frac{0,03h_{21ET3}}{I_{CT3}} = \frac{0,03 \cdot 240}{8,3 \cdot 10^{-3}} = 867 \Omega.$$

8. Изчислява се стойността на тока на късо съединение:

$$I_{kc} = I_{kp} + \frac{h_{11ET3} I_{CT3}}{h_{21ET3}} = 2,5 + \frac{867 \cdot 8,3 \cdot 10^{-3}}{240} = 2,53 \text{ A.}$$

9. Изчислява се мощността, отделена върху резистора R_{sh} :

$$P_{R_{sh}} = R_{sh} I_{kc}^2 = 0,24 \cdot 2,53^2 = 1,54 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност 2 W.

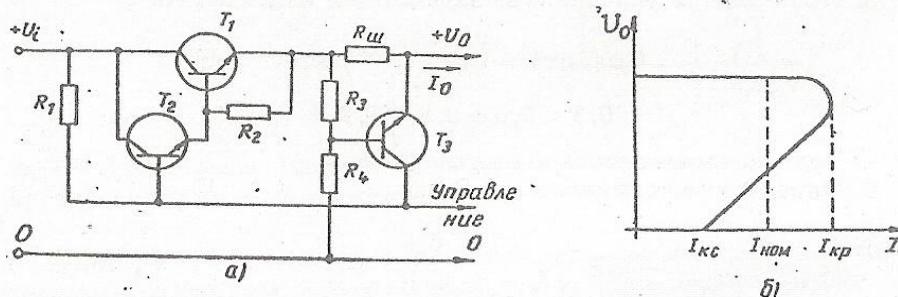
10. Изчислява се мощността, разсейвана върху колектора на T_3 :

$$P_{CT3} = U_{CET3} I_{CT3} = 1,8 \cdot 8,3 \cdot 10^{-3} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ W.}$$

С това проектирането на защитата е завършено. Понеже във формулите участват много нелинейни величини, като входните съпротивления на транзисторите, праговите напрежения на преходите база-емитер, резултатите от изчислението са приблизителни. За точна настройка на тока на действие на защитата I_{kp} съпротивлението на R_{sh} трябва да може да се подбира при монтажа или да се регулира в известни граници.

На фиг. 4.3a е показана схема на защита за ток на късо съединение, по-малък от тока на действие (фиг. 4.3b). Новото тук е включването на делителя на напрежение R_3, R_4 , който въвежда допълнително прагово напрежение, пропорционално на изходното. Тази схема се прилага при стабилизатори с фиксирано изходно напрежение.

Оразмеряването на елементите на схемата се извършва по начин, подобен на предишната задача. В следващия пример изходните данни са същите, за да се направи сравнение в действието на двете схеми (фиг. 4.2 и 4.3a).



Фиг. 4.3. Електронна защита от свръхток с подобрена характеристика
а – принципна схема; б – волт-амперна характеристика на стабилизатора

Пример 4.2. За последователен компенсационен стабилизатор на напрежение да се проектира защита по ток от вида, показан на фиг. 4.3a със следните данни: максимално входно напрежение $U_{i\max} = 20 \text{ V}$; изходно напрежение $U_o = 12 \text{ V}$; товарен ток $I_o = 2 \text{ A}$; токът на действие на защитата да бъде $2,5 \text{ A}$. Регулиращият транзистор е съставен по схема Дарлингтон, транзисторът T_1 е от тип 2N3055, а транзисторът T_2 – от тип 2T9135. Базовият ток на съставния транзистор е $I_{BT2} = 0,66 \text{ mA}$. Резисторът R_1 има съпротивление $2,4 \text{ k}\Omega$.

Изчисляване

1. Изчислява се максималният ток през R_1 в режим на късо съединение:

$$I_{R_{1kc}} = \frac{U_{i\max}}{R_1} = \frac{20}{2,4 \cdot 10^3} = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ A.}$$

2. Максималният колекторен ток през транзистора T_3 е:

$$I_{CT3} = I_{R_{1kc}} = 8,3 \text{ mA.}$$

3. Изчислява се токът на късо съединение, при който загубите в регулиращия транзистор остават същите, както при номинален режим на работа:

$$I_{kc} = I_{kp} \left(1 - \frac{U_o}{U_{i\max}} \right) = 2,5 \left(1 - \frac{12}{20} \right) = 1 \text{ A.}$$

4. Изчислява се съпротивлението на резистора R_{sh} :

$$R_{sh} = \frac{0,6}{I_{kc}} = \frac{0,6}{1} = 0,6 \Omega.$$

5. Изчислява се падът на напрежение върху резистора R_3 :

$$U_{R_3} = R_{sh} I_{kp} = 0,6 \cdot 2,5 = 0,6 \cdot 2,5 = 0,9 \text{ V.}$$

6. Определя се коефициентът на делене на делителя $R_3 R_4$:

$$k = \frac{U_o}{U_{R_3}} = \frac{12}{0,9} = 13,3.$$

7. Избира се токът през делителя:

$$I_{R_3} = 10 \text{ mA.}$$

8. Изчислява се съпротивлението на резистора R_3 :

$$R_3 = \frac{U_{R_3}}{I_{R_3}} = \frac{0,9}{10 \cdot 10^{-3}} = 90 \Omega.$$

Избира се резистор със съпротивление 91Ω .

9. Изчислява се съпротивлението на резистора R_4 :

$$R_4 = (k - 1) R_3 = (13,3 - 1) 91 = 1119 \Omega.$$

Избира се резистор със съпротивление $1,2 \text{ k}\Omega$.

10. Изчисляват се мощностите на резисторите:

$$P_{R_{sh}} = I_{kp}^2 R_{sh} = 2,5^2 \cdot 0,6 = 3,75 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност 4 W;

$$P_{R_3} = I_{R_3}^2 R_3 = 0,01^2 \cdot 91 = 9,1 \cdot 10^{-3} \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност 0,125 W;

$$P_{R_4} = I_{R_4}^2 R_4 = 0,01^2 \cdot 1200 = 0,12 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност 0,25 W.

11. Избира се типът на транзистора T_3 – 2T3168A със следните данни: $U_{CE\max} = 25 \text{ V}$; $U_{CEsat} = 0,3 \text{ V}$; $h_{21E} = 240$; $I_{C\max} = 100 \text{ mA}$; $P_{C\max} = 0,2 \text{ W}$.

12. Проверява се условието за задействане на защитата:

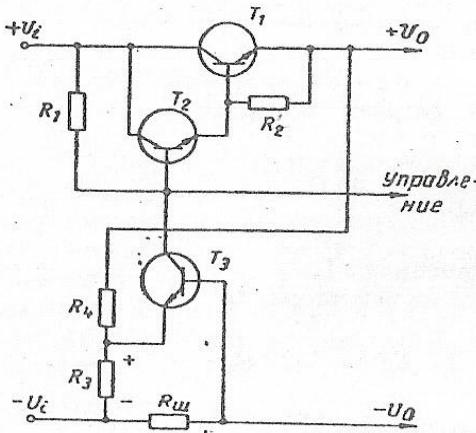
$$U_{CEsatT_3} < U_{BET1} + U_{BET2} -$$

$0,25 \text{ V} < 0,6 + 0,6 = 1,2 \text{ V}$ – транзисторът отговаря на условието.

13. Изчислява се мощността, разсейвана от транзистора T_3

$$\begin{aligned} P_{C3} &= U_{CEsatT_3} I_{CT3} = (R_{sh} I_{kc} + U_{BET1} + U_{BET2}) I_{CT3} = \\ &= (0,6 \cdot 1 + 0,6 + 0,6) 0,0083 = 15 \cdot 10^{-3} \text{ W.} \end{aligned}$$

С това оразмеряването на елементите на схемата е завършено. За да може прагът на задействане на защитата да се регулира в известни граници, коефициентът на деление на делителя R_3, R_4 се прави променящ се чрез тример – потенциометър.



Фиг. 4.4. Защита по ток с управление по минусовата шина

На фиг. 4.4 е показана схема на защита от свръхток, която има същото действие и се проектира по същия начин както тази от фиг. 4.3a. Разликата се състои само в това, че транзисторът T_3 в нормален работен режим на стабилизатора е включен към напрежение $U_{CEsatT_3} = U_o$ и трябва да може да го издържа. Тази схема се използва, когато по някои съображения резисторът R_{sh} трябва да се включи във веригата на отрицателната шина.

Разгледаните дотук защити от свръхток са с автоматично самовъзстановяване при изчезване на причината за токовото претоварване.

4.1.2. ЕЛЕКТРОННА ЗАЩИТА ОТ ТОКОВО ПРЕТОВАРВАНЕ С РЕЛЕЙНО ДЕЙСТВИЕ

Зашитата по ток с релейно действие се характеризира с това, че при задействване тя прекъсва товарния ток ($I_{kc} = 0$) и остава в това състояние, докато не ѝ се окаже външно въздействие за възстановяване. Ако своевременно причината за претоварването е отстранена, стабилизаторът заработка нормално. Ако причината за претоварването продължава да съществува, защитата отново веднага прекъсва тока.

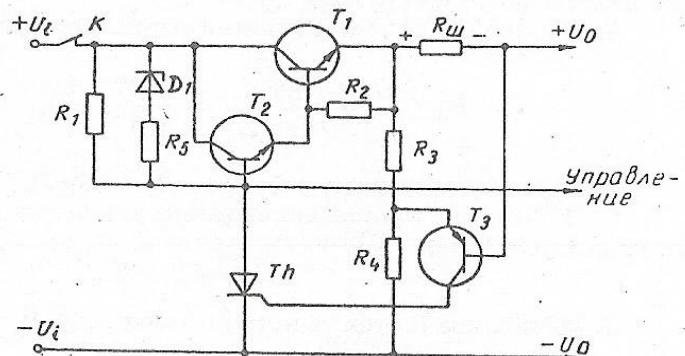
За реализирането на такава защита е необходим елемент с релейно действие. Най-подходящ за това е тиристорът. На фиг. 4.5 е показана схема на подобна защита, в която е използван маломощен тиристор.

Действието на схемата е следното: Тиристорът T_h е свързан между базата на транзистора T_2 и минуса на стабилизатора. В нормален работен режим тиристорът е изключен и не оказва влияние на работата на стабилизатора. Когато токът през резистора R_{sh} нарастне до такава стойност, че падът на напрежение върху него стане достатъчно голям, за да се отпушчи транзисторът T_3 , колекторният ток на T_3 включва тиристора T_h . През включения тиристор T_h базата на транзистора T_2 се свързва с отрицателната шина на стабилизатора и транзисторите T_1 и T_2 се запушват.

Тиристорът остава във включен състояние, докато не се прекрати токът през него. Това става чрез ключа K , който изключва веригата на целия стабилизатор. Поставянето на този ключ директно във веригата на тиристора е недопустимо, защото при отварянето му стабилизаторът остава без защита по ток.

Стабилитронът D_1 и резисторът R_5 осигуряват допълнителен ток за задържане на тиристора във включен състояние, ако токът през резистора R_1 не е достатъчен за това.

Пример 4.3. Да се проектира защита от свръхток с релейно действие на последователен стабилизатор по схемата от фиг. 4.5. Изходни данни: входно напрежение $U_{i\max} = 20 \text{ V}$; $U_{i\min} = 16 \text{ V}$; изходно напрежение $U_o = 12 \text{ V}$; товарен ток $I_o = 2 \text{ A}$; регулиращ транзистор – съставен, схема Дарлингтон с транзистори 2N3055 и 2T9135. Базовият ток на T_2 е 0,66 mA. Резисторът $R_1 = 24 \text{ k}\Omega$. Прагът на задействане на защитата да бъде $I_{kp} = 2,5 \text{ A}$.



4 Ръководство за проектиране на токозахранващи устройства

Изчисляване

1. Максималното работно напрежение на тиристора е

$$U_{Th\max} \approx U_o \approx 12 \text{ V.}$$

2. При включено състояние на тиристора през резистора R_1 се осигуряват следните токове през тиристора:

$$I_{R1\max} = \frac{U_{i\max}}{R_1} = \frac{20}{2,4 \cdot 10^3} = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ A;}$$

$$I_{R1\min} = \frac{U_{i\min}}{R_1} = \frac{16}{2,4 \cdot 10^3} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ A.}$$

3. Избира се тиристор тип КУ101 със следните данни: максимална стойност на правото напрежение $U_{DR\max} = 50 \text{ V}$; максимален ток в права посока $I_{TAV} = 75 \text{ mA}$; ток на задържане $I_{TA\min} = 0,8 \text{ mA}$; максимално напрежение на управляващия електрод $U_{GT\max} = 8 \text{ V}$; максимален ток на управление $I_{GT\max} = 5 \text{ mA}$.

Този тиристор има малък ток на задържане, затова не е необходимо включването на групата D_1, R_5 .

4. Изчислява се съпротивлението на резистора R_3 :

$$R_3 \leq \frac{U_o - U_{GT\max}}{1,5 I_{GT\max}} = \frac{12 - 8}{1,5 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 533 \Omega.$$

Избира се стандартна стойност $R_3 = 510 \Omega$.

5. Избира се напрежението върху R_3 при нездействана защита (в границите $0,5 \div 1 \text{ V}$):

$$U_{R3} = 0,5 \text{ V.}$$

6. Изчислява се токът през делителя R_3, R_4 :

$$I_{R1} = I_{R4} = \frac{U_{R3}}{R_3} = \frac{0,5}{510} = 0,98 \cdot 10^{-3} \text{ A.}$$

7. Изчислява се съпротивлението на резистора R_4 :

$$R_4 = \frac{U_o - U_{R3}}{I_{R4}} = \frac{12 - 0,5}{0,98 \cdot 10^{-3}} = 11734 \Omega.$$

Избира се стандартна стойност $R_4 = 11 \text{ k}\Omega$.

8. Избира се типът на транзистора T_3 . Подходящ е 2T3308A със следните данни: $U_{CE\max} = 25 \text{ V}$; $I_{C\max} = 100 \text{ mA}$; $P_C = 300 \text{ mW}$; $h_{21E} = 160$; $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$.

9. Изчислява се измерителното съпротивление R_{sh} :

$$R_{sh} = \frac{U_{R3} + U_{BETZ}}{I_{kp}} = \frac{0,5 + 0,7}{2,5} = 0,48 \Omega.$$

10. Мощността, отделяна в R_{sh} при ток на късо съединение, е

$$P_{R_{sh}} = I_{kp}^2 R_{sh} = 2,5^2 \cdot 0,48 = 3 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност 3 W.

С това изчисляването на защитата е завършено.

При избора на тиристор възможно е да се получи така, че минималният ток през резистора R_1 в режим на включен тиристор да е по-малък от тока на задържане (вж. т. 2). Тогава се налага включването на групата D_1, R_5 и се правят следните допълнителни изчисления:

11. Ако е избран тиристор КУ109 със следните данни: $U_{DR\max} = 200 \text{ V}$; $I_{TAV} = 3 \text{ A}$; ток на задържане $I_{TA\min} = 30 \text{ mA}$; максимално напрежение на управляващия електрод $U_{GT} = 8 \text{ V}$; максимален ток на управление $I_{GT} = 100 \text{ mA}$; допълнителният ток на задържане е

$$I_{R5} = 1,1(I_{TA\min} - I_{R1\min}) = 1,1(30 - 7) = 26 \text{ mA.}$$

12. Работното напрежение на стабилитрона D_1 е

$$U_z = 1,1(U_{i\max} - U_o) = 1,1(20 - 12) = 8,8 \text{ V.}$$

Избира се стабилитрон тип Д815Г.

13. Изчислява се съпротивлението на резистора R_5 :

$$R_5 = \frac{U_{i\min} - U_z\max - U_{BETZ}}{I_{R5}} = \frac{16 - 11 - 0,7}{0,026} = 165 \Omega.$$

Избира се стандартна стойност $R_5 = 160 \Omega$.

14. Максималният ток през стабилитрона е

$$I_{z\max} = \frac{U_{i\max} - U_{z\min} - U_{BETZ}}{R_5} = \frac{20 - 9 - 0,7}{160} = 0,062 \text{ A.}$$

15. Изчислява се мощността на R_5 :

$$P_{R5} = I_{z\max}^2 R_5 = 0,062^2 \cdot 160 = 0,63 \text{ W.}$$

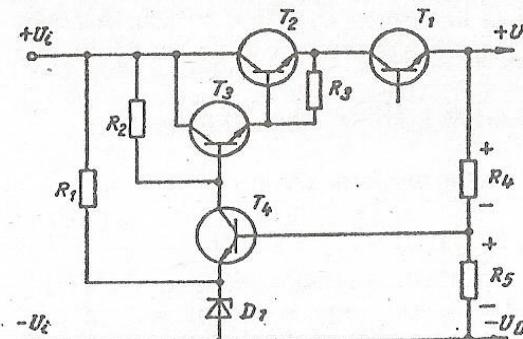
Избира се резистор с мощност 1 W.

4.2. ЗАЩИТА НА ТОВАРА ОТ ПРЕНАПРЕЖЕНИЕ

Тази защита е предвидена да защити консуматора от пренапрежение при повреда в стабилизатора. Тя бива два вида – чрез ограничаване на напрежението и чрез късосъединител.

Зашита чрез ограничаване на напрежението. Един вариант на подобна защита е показан на фиг. 4.6. Последователно с основния стабилизатор на напрежение и преди него е включен спомагателен стабилизатор с просто схемно решение и не особено високи качества (T_2 , T_3 , T_4 и D_1).

В нормален работен режим транзисторът T_4 е запущен, а транзисторите T_3 и T_4 са насищени. Стабилизацията на напрежението се осъществява от основния стабилизатор, чийто регулиращ транзистор е T_1 . В случай на авария в основния стабилизатор, например пробив на транзистора T_1 , изходното напрежение се увеличава малко, транзисторът T_4 заработка в активен режим, а допълнителният стабилизатор T_2 , T_3 и T_4 поема функцията на стабилизация.



Фиг. 4.6. Защита от пренапрежение чрез ограничаване на напрежението

товарен ток $I_o = 2 \text{ A}$; праг на задействане на защитата по ток $I_{kp} = 2,5 \text{ A}$; промени на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 10\%$; коефициент на пулсации на входното напрежение $k_p = 15\%$.

Изчисляване

1. Относителното увеличение на входното напрежение е $a = 0,1$, а относителното му намаление – $b = 0,1$. Относителният коефициент на пулсации е $k_p = 0,15$.

2. Изчисляват се стойностите на входното напрежение на стабилизатора:

$$U_{i \min} = \frac{U_o + 2(U_{CEsatT1} + U_{CEsatT2})}{1 - k_p} = \frac{5 + 2(1,5 + 1,5)}{1 - 0,15} = 13 \text{ V};$$

$$U_i = \frac{U_{i \min}}{1 - b} = \frac{13}{1 - 0,1} = 14,4 \text{ V}$$

$$U_{i \max} = U_i(1 + a) = 14,4(1 + 0,1) = 15,8 \text{ V}.$$

3. Максималното напрежение върху транзисторите T_1 и T_2 в работен режим е

$$U_{CET1} = U_{CET2} = U_{i \max} - U_{CEsatT1} - U_o = 15,8 - 1,5 - 5 = 9,3 \text{ V}.$$

4. Изчислява се максималната мощност върху транзистора T_1 :

$$P_{CT1} = U_{CET1} I_{kp} = 9,3 \cdot 2,5 = 23 \text{ W}.$$

5. Изчислява се токът на късо съединение, при който загубите в транзистора се запазват същите:

$$I_{kc} = I_{kp} \left(1 - \frac{U_o}{U_{i \max} - U_{CEsatT2}} \right) = 2,5 \left(1 - \frac{5}{15,8 - 1,5} \right) = 1,9 \text{ A}.$$

6. Избират се транзисторите T_1 и T_2 – подходящ тип е 2N3055 със следните данни: $U_{CE \max} = 60 \text{ V}$; $U_{CEsat} = 1,1 \text{ V}$; $h_{21E} = 15$; $I_{C \max} = 15 \text{ A}$; $P_{C \max} = 117 \text{ W}$.

7. Изчислява се стойността на базовия ток на T_2 :

$$I_{BT2} = \frac{I_{kp}}{h_{21ET2}} = \frac{2,5}{15} = 0,17 \text{ A}.$$

8. Избира се типът на транзистора T_3 . Подходящ е 2T9135C със следните данни: $U_{CE \max} = 45 \text{ V}$; $U_{CEsat} = 0,5 \text{ V}$; $I_{C \max} = 1 \text{ A}$; $h_{21E} = 175$; $P_{C \max} = 8 \text{ W}$.

9. Изчислява се стойността на базовия ток на T_3 :

$$I_{BT3} = \frac{I_{BT2}}{h_{21ET3}} = \frac{0,17}{175} = 0,97 \text{ A}.$$

10. Избира се коефициентът на насищане на T_2 и T_3 при нормална работа на стабилизатора и най-ниско входно напрежение:

$$k_{sat} = 1,3.$$

11. Изчислява се съпротивлението на резистора R_2 :

$$R_2 = \frac{U_{i \min} - U_o - U_{CEsatT1} - U_{BT2} - U_{BT3}}{I_{BT3} \cdot k_{sat}} = \\ = \frac{13 - 5 - 1,1 - 0,6 - 0,6}{0,97 \cdot 10^{-3} \cdot 1,3} = 4520 \Omega.$$

Избира се резистор със стандартна стойност $R_2 = 4,3 \text{ k}\Omega$.

12. Изчислява се мощността на резистора R_2 :

$$P_{R2} \approx \frac{(U_{i\max} - U_o)^2}{R_2} = \frac{(13 - 5)^2}{4300} = 0,015 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност $0,125 \text{ W}$.

13. Избира се типът на транзистора T_4 . Подходящ е 2T3168C със следните данни: $U_{CE\max} = 25 \text{ V}$; $U_{CEsat} = 0,6 \text{ V}$; $I_C\max = 100 \text{ mA}$; $h_{21E} = 560$ при $I_C = 2 \text{ mA}$; $P_C\max = 200 \text{ mW}$.

14. Избира се типът на стабилитрона. Напрежението му на стабилизация трябва да бъде $U_z = (0,5 \div 0,8)U_o$:

$$U_z = 0,7U_o = 0,7 \cdot 5 = 3,5 \text{ V.}$$

Подходящ е стабилитронът KC133A със следните данни: $U_z = 2,97 \div 3,63 \text{ V}$; $I_z\max = 81 \text{ mA}$; $I_z\min = 3 \text{ mA}$; $r_z = 65 \Omega$ при $I_z = 10 \text{ mA}$.

15. Изчислява се съпротивлението на резистора R_1 :

$$R_1 = \frac{U_{i\min} - U_{z\max}}{I_{z\min}} = \frac{13 - 3,63}{10 \cdot 10^{-3}} = 927 \Omega.$$

Избира се резистор със стандартно съпротивление 910Ω .

16. Разсейваната мощност от резистора R_1 е

$$P_{R1} = \frac{(U_{i\max} - U_{z\min})^2}{R_1} = \frac{(15,8 - 2,97)^2}{910} = 0,181 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност $0,5 \text{ W}$.

17. Максималният ток през стабилитрона е

$$\begin{aligned} I_{z\max} &= \frac{U_{i\max} - U_{z\min}}{R_1} + \frac{U_{i\max} - U_o}{R_2} = \\ &= \frac{15,8 - 2,97}{910} + \frac{15,8 - 5}{5100} = 16,2 \cdot 10^{-3} \text{ A.} \end{aligned}$$

Тази стойност е допустима.

18. Избира се токът през делителя на напрежение R_4, R_5 :

$$I_{R4} = I_{R5} = 10 \text{ mA.}$$

19. Изчислява се съпротивлението на резистора R_5 :

$$\begin{aligned} R_5 &= \frac{(U_{z\min} \div U_{z\max}) + U_{BET4}}{I_{R5}} = \frac{(2,97 \div 3,63) + 0,6}{10 \cdot 10^{-3}} = \\ &= (357 \div 423) \Omega. \end{aligned}$$

Резисторът се прави секциониран от $R'_5 = 330 \Omega$ – постоянен, и $R''_5 = 100 \Omega$ – тример. R'_5 и R''_5 са свързани последователно.

20. Мощността, разсейвана от резистора R'_5 е

$$P'_{R5} = I_{R5}^2 R'_5 = 0,01^2 \cdot 330 = 0,033 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност $0,125 \text{ W}$.

Мощността, разсейвана от тримера е

$$P''_{R5} = I_{R5}^2 R''_5 = 0,01^2 \cdot 100 = 0,01 \text{ W.}$$

При тази мощност е подходящ всеки тример със съпротивление 100Ω .

21. Изчислява се съпротивлението на резистора R_4 :

$$R_4 = \frac{U_o}{I_{R4}} - (R'_5 + R''_5) = \frac{5}{10 \cdot 10^{-3}} (330 + 100) = 70 \Omega.$$

Избира се стандартна стойност 75Ω .

22. Мощността, разсейвана от R_4 е

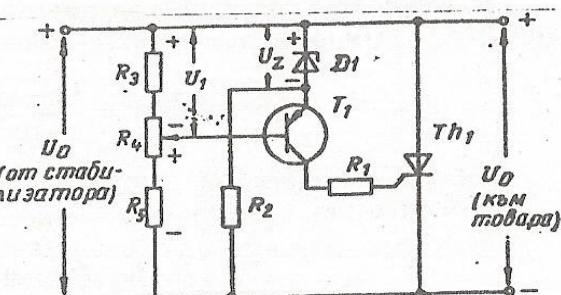
$$P_{R4} = I_{R4}^2 R_4 = 0,01^2 \cdot 75 = 0,0075 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност $0,125 \text{ W}$.

С това проектирането на защитата е завършено.

Зашита чрез къмсъединител. Тази защита предпазва товара от пренапрежение, като съединява накъсо изводите на стабилизатора. Ако при това токовата защита е в изправност, тя ограничава тока до допустима стойност. Ако пренапрежението е възникнало поради пробив на регулиращия транзистор на стабилизатора и токовата защита не може да функционира, изгаря разтопляемият предпазител и веригата на захранването се прекъсва.

Схема на такъв вид защита е показана на фиг. 4.7. Действието ѝ е следното: При нормално изходно напрежение, напрежението на стабилитрона $D_1 - U_z$ е по-голямо от напрежението U_1 . Транзисторът T_1 и тиристорът Th_1 са запушени. Защитната схема не оказва влияние на работата на стабилизатора. Ако изходното напрежение се увеличи,



Фиг.4.7. Защита от пренапрежение чрез къмсъединител

напрежението U_1 става по-голямо от напрежението U_z и транзисторът T_1 се отпуска. Неговият колекторен ток включва тиристорът Th , който свързва изходните клеми на стабилизатора накъс.

Тази схема има предимството, че предпазва консуматора независимо от произхода на пренапрежението – например при случайно допирane до други тоководещи проводници към шините на стабилизатора.

Възстановяването на защитата се извършва чрез изключване на захранването, за да се прекъсне токът през тиристора Th .

Оразмеряването на елементите на схемата се извършва по следния начин.

Пример 4.5. Да се проектира защита от пренапрежение на изхода на стабилизатор, изпълнена по схемата от фиг. 4.7 със следните данни: $U_o = 12 \text{ V}$; $U_{o\max} = 13 \text{ V}$; $I_o = 2 \text{ A}$; ток на изгаряне на разтопяемия предпазител във веригата при късо съединение на изхода $I_{k\text{c max}} = 20 \text{ A}$.

Изчисляване

1. Избира се типът на тиристора Th по зададените данни: $I_{k\text{c max}} = 20 \text{ A}$ и работно напрежение $U_o = 12 \text{ V}$. Подходящ е тиристорът КУ109 със следните данни: работно напрежение $U_{DR\max} = 200 \text{ V}$; номинален ток $I_{TAV} = 3 \text{ A}$; максимален ток за време 10 ms – $I_{TS\max} = 30 \text{ A}$; ток на управление $I_{GT} = 10 \text{ mA}$; максимално напрежение на управляващия електрод $U_{GT} = 8 \text{ V}$; ток на задържане във включено състояние $I_{TA\min} = 30 \text{ mA}$.

2. Изчислява се напрежението на стабилитрона D_1 :

$$U_z \leq 0,5(U_o - U_{GT}) = 0,5(12 - 8) = 2 \text{ V}.$$

3. Вместо стабилитрон за такова ниско напрежение могат да се използват два последователно свързани диода тип D5606 със следните данни: напрежение в права посока $U_D = 0,7 \text{ V}$; ток в права посока $I_{F\max} = 30 \text{ mA}$; динамично съпротивление $r_z = 3 \Omega$. Тогава еталонното напрежение е

$$U_z = 2.0,7 = 1,4 \text{ V}.$$

4. Изчислява се съпротивлението на резистора R_2 при ток през диодите $I_z = 10 \text{ mA}$:

$$R_2 = \frac{U_o - U_z}{I_z} = \frac{12 - 1,4}{10 \cdot 10^{-3}} = 1060 \Omega.$$

Избира се резистор $R_2 = 1,1 \text{ k}\Omega$.

5. Мощността, разсейвана от резистора R_2 е

$$P_{R2} = \frac{(U_o - U_z)^2}{R_2} = \frac{(12 - 1,4)^2}{1100} = 0,102 \text{ W}.$$

Избира се резистор с мощност $0,125 \text{ W}$.

6. Избира се транзисторът T_1 . Подходящ е тип 2T6821D със следните данни: $U_{CE\max} = 50 \text{ V}$; $U_{CEsat} = 1,3 \text{ V}$; $I_{C\max} = 500 \text{ mA}$; $h_{21E} = 130$.

7. Изчислява се съпротивлението на резистора R_1 :

$$R_1 = \frac{U_o - U_z - U_{CEsatT1} - U_{GT}}{I_{GT}} = \frac{12 - 1,4 - 1,3 - 8}{10 \cdot 10^{-3}} = 130 \Omega.$$

Този резистор работи в режим на еднократен къс токов импулс и затова не е необходимо да се оразмерява по мощност.

8. Избира се токът през делителя на напрежение R_3 , R_4 , R_5 :

$$I_1 = (10 \div 20) \frac{I_{GT}}{h_{21ET1}} = (10 \div 20) \frac{0,01}{130} = (7,7 \div 15) \cdot 10^{-4} \text{ A}.$$

Избира се стойност $I_1 = 10 \text{ mA}$.

9. Изчислява се съпротивлението на резистора R_3 :

$$R_3 = \frac{0,5(U_z \min + U_{BET1})}{I_1} = \frac{0,5(1,2 + 0,6)}{10 \cdot 10^{-3}} = 91 \Omega.$$

10. Мощността, разсейвана от резистора R_3 е

$$P_{R3} = \frac{(U_z \max + U_{BET1})^2}{R_3} = \frac{(1,4 + 0,6)^2}{91} = 0,044 \text{ W}.$$

Избира се резистор с мощност $0,125 \text{ W}$.

11. Изчислява се съпротивлението на резистора R_4 :

$$R_4 = 2 \frac{U_z \max - U_z \min}{I_1} = 2 \frac{1,4 - 1,2}{0,01} = 20 \Omega.$$

Избира се тример със съпротивление 47Ω . Мощността, разсейвана от тримера R_4 е по-малка от мощността, разсейвана от R_3 , затова не е необходимо да се изчислява.

12. Изчислява се съпротивлението на резистора R_5 :

$$R_5 = \frac{U_o}{I_1} - (R_3 + R_4) = \frac{12}{10 \cdot 10^{-3}} - (200 + 47) = 953 \Omega.$$

Избира се резистор със стандартно съпротивление 910Ω .

13. Мощността, разсейвана от резистора R_5 е

$$P_{R5} = I_1^2 R_5 = 0,01^2 \cdot 910 = 0,091 \text{ W}.$$

Избира се резистор с мощност $0,125 \text{ W}$.

5. ИЗБИРАНЕ НА РЕЖИМА НА РЕГУЛИРАЩИЯ ТРАНЗИСТОР В ПОСЛЕДОВАТЕЛНИТЕ КОМПЕНСАЦИОННИ СТАБИЛИЗATORI НА НАПРЕЖЕНИЕ С НЕПРЕКЪСНАТО ДЕЙСТВИЕ

Регулиращият транзистор в последователните компенсационни стабилизатори на напрежение е най-натовареният по мощност електронен элемент в схемата. Неговият работен режим се изменя в широки граници и това допълнително усложнява задачата за правилното му оразмеряване. Тази задача се състои в:

- избор на типа на транзистора;
 - проверка на граничните му натоварвания;
 - избор на начина на охлаждане и проектиране на охладителя.
- Като изходни данни за оразмеряването се задават:
- изходното напрежение на стабилизатора по стойност и по вид;
 - неизменящо се или изменящо се;
 - изходният (товарният) ток на стабилизатора по стойност и по вид – постоянен или изменящ се;
 - границите на изменение на входното напрежение;
 - коефициентът на пулсации на входното напрежение;
 - вътрешното съпротивление на захранващия токоизправител.
- Изборът на типа на транзистора се извършва по следния начин:

1. Според схемното решение се избира типът на проводимост – NPN или PNP.

2. Според предварително пресметнатите максимални стойности на напрежението и тока се избира конкретен тип транзистор.

3. След изчисляването на разсейваната топлинна мощност върху колектора на транзистора се изчислява охлаждащия радиатор. Често се среща и обратната задача – радиаторът е определен предварително от други конструктивни изисквания. Тогава се изчислява допустимата мощност, която транзисторът може да издържи с този радиатор.

4. При необходимост се избира друг тип транзистор или се прави група от паралелно или последователно свързани транзистори.

За избора и проверката на режима на работа на регулиращия транзистор има два метода – аналитичен и графоаналитичен.

Аналитичен метод. Редът на изчисляване е следният:

1. Определят се минималната, номиналната и максималната стойност на захранващото напрежение.

2. Определят се минималната и максималната стойност на тока през транзистора.

3. Определя се максималната стойност на тока при късо съединение и наличие на електронна защита от свръхток с токоограничаване.

4. Определя се максималната стойност на напрежението върху транзистора.

5. Изчислява се мощността на топлинните загуби в транзистора.

6. Оразмерява се охлаждащия радиатор.

Стойностите на захранващото напрежение се определят по формулите:

$$(5.1) \quad U_{i\min} = \frac{U_o \max + k_3 U_{CEsat}}{1 - k_n}, \text{ V};$$

$$(5.2) \quad U_i = \frac{U_{i\min}}{1 - b}, \text{ V};$$

$$(5.3) \quad U_{i\max} = U_i(1 + a), \text{ V}.$$

където $k_3 = (1 \div 3)$ е коефициент на запас.

Минималният и максималният ток на транзистора зависят от характера на консуматора и се задават от него.

Токът на късо съединение според вида на използваната електронна защита може да бъде по-малък или по-голям от максималния товарен ток. Когато е необходимо транзисторът да разсейва еднаква топлинна мощност, както при максимален товарен ток, така и при късо съединение, токът на късо съединение трябва да се изчисли по формулата

$$(5.4) \quad I_{kc} = I_{C\max} \left(1 - \frac{U_o}{U_{i\max}} \right).$$

Ако напрежението U_o е регулируемо, използва се най-малката стойност, при която стабилизаторът може да дава максималния си товарен ток.

Максималното работно напрежение върху транзистора е

$$(5.5) \quad U_{CE} = U_{i\max} - U_{o\min}, \text{ V}.$$

В режим на късо съединение транзисторът трябва да издържа напрежението

$$(5.6) \quad U_{CE\max} = U_{i\max}, \text{ V}.$$

Най-големите топлинни загуби в транзистора са:

$$(5.7) \quad P_{C\max} = U_{CE} I_{C\max} - \text{за работен режим};$$

$$(5.8) \quad P_{C_{kc}} = U_{i\max} I_{kc} - \text{за режим на късо съединение}.$$

Охлаждащият радиатор се оразмерява по методите, описани в гл. 3.

Пример 5.1. Да се оразмери регулиращият транзистор на последователен компенсационен стабилизатор на напрежение със следните данни:

- изходно напрежение $U_o = 12 \text{ V}$, нерегулируемо;
- ток на товара $I_o = 3 \text{ A}$, постоянен;
- промени на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 15\%$;
- коефициент на пулсации на входното напрежение $k_n = 10\%$.

Предварително се определя, че транзисторът е силициев, тип NPN с приблизително напрежение на насищане $U_{CEsat} = 1,5 \text{ V}$.

Изчисляване

1. Промените на входното напрежение са: относително увеличение $a = 0,15$, а относителното намаление $-b = 0,15$.

2. Относителният коефициент на пулсации е $k_n = 0,1$.
3. Изчисляват се стойностите на входното напрежение:

$$U_{i\min} = \frac{U_o + 1,1U_{CEsat}}{1 - k_n} = \frac{12 + 1,1 \cdot 1,5}{1 - 0,1} = 15 \text{ V};$$

$$U_i = \frac{U_{i\min}}{1 - b} = \frac{15}{1 - 0,15} = 17,6 \text{ V};$$

$$U_{i\max} = U_i(1 + a) = 17,6(1 + 0,15) = 20 \text{ V}.$$

4. Максималната стойност на напрежението колектор-эмитер на транзистора в работен режим е

$$U_{CE} = U_{i\max} - U_o = 20 - 12 = 8 \text{ V}.$$

5. В режим на късо съединение най-високото напрежение върху транзистора е

$$U_{CE\max} = U_{i\max} = 20 \text{ V}.$$

6. Токът на късо съединение, който трябва да бъде ограничен от електронната защита, за да се запазят същите топлинни загуби в транзистора, както в работен режим, е

$$I_{kc} = I_{C\max} \left(1 - \frac{U_o}{U_{i\max}} \right) = 3 \left(1 - \frac{12}{20} \right) = 1,2 \text{ A.}$$

7. Изчисляват се топлинните загуби в транзистора:

а) в работен режим

$$P_{C\max} = U_{CE} I_{C\max} = 8 \cdot 3 = 24 \text{ W};$$

б) в режим на късо съединение

$$P_{Ckc} = U_{i\max} I_{kc} = 20 \cdot 1,2 = 24 \text{ W.}$$

Транзисторът се избира от каталог по получените данни.

Пример 5.2. Да се оразмери регулиращият транзистор на последователен компенсационен съпротивление на напрежение със следните данни:

- изходно напрежение $U_o = 5 \div 12 \text{ V}$, регулируемо;
- ток на товара $I_o = 1 \div 3 \text{ A}$, променящ се;
- промени на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 10\%$;
- коефициент на пулсации на входното напрежение $k_n = 15\%$.

Предварително се определя, че транзисторът е силициев, тип NPN, $U_{CEsat} \leq 1,5 \text{ V}$.

Изчисляване

1. Измененията на входното напрежение се дефинират, както следва: относително увеличение $a = 0,1$ и относително намаление $b = 0,1$.

2. Коефициентът на пулсации се привежда $k_n = 0,15$.

Изчисляват се стойностите на входното напрежение:

$$U_{i\min} = \frac{U_o + 1,1U_{CEsat}}{1 - k_n} = \frac{12 + 1,1 \cdot 1,5}{1 - 0,15} = 16 \text{ V};$$

$$U_i = \frac{U_{i\min}}{1 - b} = \frac{16}{1 - 0,1} = 17,8 \text{ V};$$

$$U_{i\max} = U_i(1 + a) = 17,8(1 + 0,1) = 19,6 \text{ V.}$$

4. Максималната стойност на напрежението върху транзистора в работен режим е

$$U_{CE} = U_{i\max} - U_o = 19,6 - 5 = 14,6 \text{ V.}$$

5. Най-високото напрежение върху транзистора в режим на късо съединение е

$$U_{CE\max} = U_{i\max} = 19,6 \text{ V.}$$

6. Изчислява се токът на късо съединение, който трябва да се ограничи от защитата, за да се запазят същите топлинни загуби в транзистора както при номинален режим:

$$I_{kc} = I_{C\max} \left(1 - \frac{U_o}{U_{i\max}} \right) = 3 \left(1 - \frac{5}{19,6} \right) = 2,23 \text{ A.}$$

7. Изчисляват се топлинните загуби в транзистора:

а) в работен режим

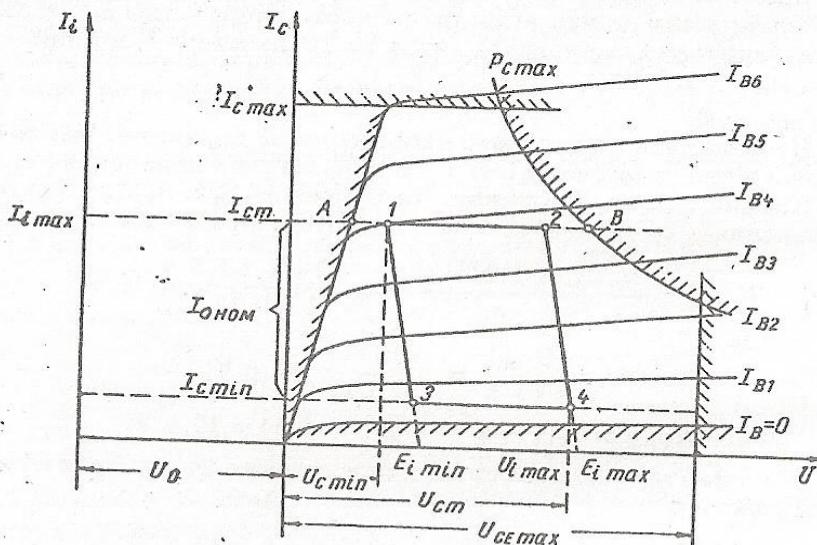
$$P_{C\max} = U_{CE} I_{C\max} = 14,6 \cdot 3 = 44 \text{ W};$$

б) в режим на късо съединение

$$P_{Ckc} = U_{i\max} I_{kc} = 19,6 \cdot 2,23 = 44 \text{ W.}$$

Транзисторът се избира от каталог на основание на получените резултати.

Графоаналитичен метод. Графоаналитичният метод позволява да се получи нагледна представа за работния режим на транзистора и да се прецени визуално степента на неговото натоварване, както и резервите му по мощност, ток и напрежение. За да се извърши това оразмеряване, необходими са графиките на семейството колекторни характеристики на транзистора.



Фиг. 5.1. Графоаналитичен метод за избиране на режима на регулиращия транзистор

Оразмеряването се извършва по следния начин (фиг. 5.1). Начертава се координатната система U, I_i . Върху оста на напрежението се нанася изходното напрежение U_o ; в същата точка се построява оста на тока I_c . В новата координатна система се построява семейството колекторни характеристики на избрания регулиращ транзистор. Нанасят се граничните условия – максимален допустим колекторен ток $I_{c\max}$ и максимално допустимо напрежение колектор-емитер $U_{CE\max}$, които представляват прави линии, успоредни на координатните оси. Според типа на транзистора и начина на охлажддането му се изчислява и построява хиперболата на допустимите топлинни загуби върху колектора $P_{C\max}$. С това възможната работна област на транзистора се ограничава от напрежението му на насищане, максимално допустимия ток на колектора, максимално допустимите колекторни загуби, максимално допустимото напрежение колектор-емитер и обратният колекторен ток при $I_B = 0$. На фиг. 5.1 ограничаващите линии са защириковани към забранената област.

Понеже транзисторът не може да работи с базов ток $I_B = 0$, минималният колекторен ток $I_{c\min}$ се избира така, че да е по-голям от обратният колекторен ток. Когато стабилизаторът работи на празен

ход, това е токът на усилвателните стъпала, параметричният стабилизатор на еталонно напрежение и делителя на напрежение за обратната пръзка. На графиката се прекарва права линия, успоредна на оста на напрежението с височина $I_{C\min}$.

Максималната стойност на колекторния ток е равна на сумата от номиналния товарен ток I_{onom} и минималния колекторен ток:

$$I_{i\max} = I_{Cm} = I_{C\min} + I_{onom}.$$

На графиката се прекарва права линия с тази ордината, успоредна на линията на $I_{C\min}$. Това са двете гранични работни линии на транзистора при минимален и при максимален товар.

Най-ниското възможно напрежение колектор-емитер при максимален товар се получава в пресечната точка на I_{Cm} с линията на напрежението на насищане (т. А). Тази точка обаче е гранична, затова крайната точка 1 на тази работна права се избира с известен запас по напрежение. Същото важи и за точка 2 – тя не трябва да навлиза в забранената област на превишена топлинна мощност, т.е. вдясно от т. В.

При намаляването на товарния ток правата 1–2 се измества надолу, успоредно сама на себе си. Поради наличието на вътрешно съпротивление на токоизправителя точките 3 и 4 са изместени надясно спрямо точките 1 и 2, като линиите 3–1 и 4–2 са товарните характеристики на токоизправителя. Пресечните точки на тези характеристики с оста на напрежението дават стойностите на $E_{i\min}$ (определя се от избраното местоположение на т. 1) и $E_{i\max}$, което е равно на

$$E_{i\max} = E_{i\min} \left(1 + \frac{(a+b)\%}{100} \right).$$

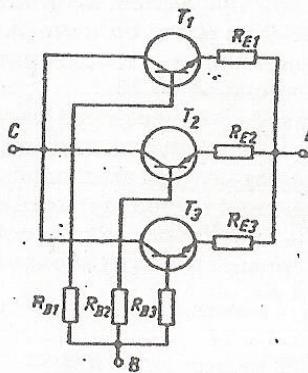
С построяването на четириъгълника 1,2,3,4 определянето на работната област на регулиращия транзистор е завършено. Точка 1 лежи на характеристиката с най-голям базов ток, точка 4 – на характеристиката с най-малък базов ток и от тях се определя ΔI_B .

Описаното дотук графоаналитично оразмеряване важи за случая, когато изходното напрежение не е регулируемо. Ако обаче U_o е регулируемо, с неговото изменение се изменя и положението на оста I_c . Заедно с нея се придвижват характеристиките на транзистора с ограничителните линии (зашрихованата област). В същото време четириъгълникът 1,2,3,4 остава неподвижен спрямо началото на координатната система E_i, I_i , понеже е твърдо свързан с нея. В такъв случай разрешената работна зона на транзистора трябва да бъде достатъчно голяма, за да може в граничните режими на входното и изходното напрежение четириъгълникът да остане вътре в нея.

Когато зададените ток, напрежение или мощност на стабилизатора не могат да се постигнат с един регулиращ транзистор, използват се схеми от няколко транзистора, свързани по определен начин.

5.1. ПАРАЛЕЛНО СВЪРЗВАНЕ НА ТРАНЗИСТОРИ

Чрез това свързване (фиг. 5.2) се постига по-голям изходен ток на стабилизатора при използване на по-маломощни транзистори. Транзисторите, които се свързват паралелно, трябва да са от един и същ тип и с приблизително еднакви статични коефициенти на усилване по ток. За изравняване на винаги съществуващи малки разлики в параметрите на транзисторите се вземат мерки за равномерно разпределение на токовете между тях. Това се постига чрез резисторите R_{E1} , R_{E2} и R_{E3} . Тяхната стойност се подбира така, че при протичане на максималния ток на транзистора падът на напрежение върху резистора да е в границите от 0,3 V до 0,6 V. Резисторите R_{B1} , R_{B2} и R_{B3} в базовите вериги предпазват схемата от самовъзбудждане.



Фиг. 5.2. Паралелно свързване на транзистори

Включването на резистори в базовите и в емитерните вериги на паралелно свързаните транзистори увеличава входното съпротивление и напрежението на насищане на еквивалентния транзистор. Това се отразява неблагоприятно върху параметрите на стабилизатора, затова съпротивленията на тези резистори трябва да са по възможност най-малки.

При паралелно свързване на голям брой транзистори техните базови токове се сумират и се получава голям общ базов ток на схемата. За да може групата паралелно свързани транзистори да се съгласува с управляващата схема на стабилизатора, трябва базовия ток да бъде в граници $I_B \Sigma = 0,5 \div 50 \text{ mA}$. Това се постига чрез схема на съставен транзистор.

5.2. СЪСТАВЕН ТРАНЗИСТОР

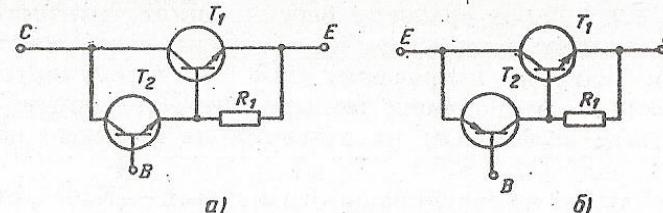
Схемите на съставни транзистори са показани на фиг. 5.3. Фиг. 5.3a е т.нар. схема на Дарлингтон, а фиг. 5.3b е схема на съставен транзистор с т.нар. допълнителна симетрия. Първата схема има следните качества:

— статичен коефициент на усилване по ток, равен на произведението от коефициентите на усилване на отделните транзистори:

$$h_{21E\Sigma} = h_{21ET1} \cdot h_{21ET2};$$

— входно съпротивление – сравнително голямо и увеличаващо се с увеличаване на броя на транзисторите в схемата:

$$h_{11E\Sigma} = h_{11ET2} + h_{21ET2} \cdot h_{11ET1};$$



Фиг. 5.3. Съставни транзистори: а – схема Дарлингтон; б – схема с допълнителна симетрия

— напрежение на насищане, нарастващо с увеличаване на броя на транзисторите в схемата:

$$U_{CEsat\Sigma} = U_{CEsatT2} + U_{BET1}.$$

Втората схема има следните качества:

— статичен коефициент на усилване по ток, равен на произведението от коефициентите на усилване на отделните транзистори:

$$h_{21E\Sigma} = h_{21ET1} \cdot h_{21ET2};$$

— входно съпротивление, равно на входното съпротивление на входния транзистор и независещо от броя на транзисторите в схемата:

$$h_{11E\Sigma} = h_{11ET2};$$

— напрежение на насищане, равно на

$$U_{CEsat\Sigma} = U_{CEsatT2} + U_{BET1},$$

което не зависи от броя на транзисторите в схемата.

От сравнението между двете схеми се вижда, че втората схема (с допълнителна симетрия) е по-подходяща за регулиращ транзистор поради по-малкото си входно съпротивление и по-малкото напрежение на насищане. Характерно за тази схема е, че типът на проводимост на съставния транзистор (PNP или NPN) се определя от типа на проводимост на транзистора, на чиято база се подава входния сигнал. В схемата, показана на фиг. 5.3b, проводимостта на съставния транзистор е PNP.

Двете схеми на съставни транзистори могат да се изработят с произведен брой стъпала. За регулиращия транзистор в последователните компенсационни стабилизатори на напрежение броят на стъпалата се определя от условието базовият ток на съставния транзистор да е:

- $I_B \leq 0,5 \text{ mA}$ при схемите, изработени с дискретни елементи;
- $I_B \leq 10 \text{ mA}$ при схеми на стабилизатори с операционни усилватели;
- $I_B \leq 30 \text{ mA}$ при схеми на стабилизатор, използващи интегралната схема $\mu\text{A} 723$;
- $I_B \leq 100 \text{ mA}$ при схеми на стабилизатори, използващи интегралните схеми $\mu\text{A} 78XX$ или $\mu\text{A} 79XX$.

Пример 5.3. Да се оразмери регулиращият транзистор на последователен компенсационен стабилизатор на напрежение със следните данни: изходно напрежение $U_o = 5 \text{ V}$, нерегулируемо; товарен ток $I_o = 15 \text{ A}$, непроменящ се; промени на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 15\%$; коефициент на пулсации на входното напрежение $k_n = 20\%$.

Избира се типът на регулирация транзистор – 2N3055, със следните данни: $U_{CE\max} = 60 \text{ V}$; $U_{CEsat} = 1,1 \text{ V}$; $h_{21\min} = 15$; $I_C\max = 15 \text{ A}$; $P_C\max = 117 \text{ W}$; $R_{tj,c} = 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$; $t_j\max = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Топлинното съпротивление на използвания радиатор е $R_{tp} = 1,2 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, а температурата на околната среда – $t_a = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Изчисляване

1. Промените на входното напрежение се определят като: относително увеличение $a = 0,15$; относително намаление $b = 0,15$.

2. Коефициентът на пулсациите на входа се привежда към $k_n = 0,2$.

3. Предварително се определя входното напрежение:

$$U_{i\min} = \frac{U_o + 2,5U_{CEsat}}{1 - k_n} = \frac{5 + 2,5 \cdot 1,1}{1 - 0,2} = 9,7 \text{ V};$$

$$U_i = \frac{U_{i\min}}{1 - b} = \frac{9,7}{1 - 0,15} = 11,4 \text{ V};$$

$$U_{i\max} = U(1 + a) = 11,4(1 + 0,15) = 13,1 \text{ V}.$$

4. Максималното напрежение на транзистора в работен режим е

$$U_{CE} = U_{i\max} - U_o = 13,1 - 5 = 8,1 \text{ V}.$$

5. В режим на късо съединение най-високото напрежение върху транзистора е

$$U_{CE\max} = U_{i\max} = 13,1 \text{ V}.$$

6. Токът на късо съединение, който трябва да се ограничи от защитата, за да се запазят същите топлинни загуби в транзистора, както при номинален режим на работа, е

$$I_{kc} = I_C\max \left(1 - \frac{U_o}{U_{i\max}}\right) = 15 \left(1 - \frac{5}{13,1}\right) = 9,3 \text{ A}.$$

7. Изчисляват се топлинните загуби в транзистора:

а) в работен режим

$$P_C\max = U_{CE}I_{o\max} = 8,1 \cdot 1,15 = 122 \text{ W}.$$

б) в режим на късо съединение

$$P_{C_{kc}} = U_{i\max}I_{kc} = 13,1 \cdot 9,3 = 122 \text{ W}.$$

8. Изчислява се гълното топлинно съпротивление между прехода на транзистора и околната среда. Транзисторът е закрепен директно върху радиатора – $R_{tcp} = 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, а

$$R_t = R_{tj,c} + R_{tcp} + R_{tp} = 1,5 + 0,5 + 1,2 = 3,2 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}.$$

9. Изчислява се максималната температура на прехода на транзистора:

$$t_{jm} = t_a + \Delta t = t_a + P_C\max R_t = 45 + 122 \cdot 3,2 = 435 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Толкова висока температура е абсолютно недопустима. Налага се да се използва схема на паралелно свързване на транзистори.

10. Изчислява се максималната мощност, която може да разсейва транзисторът 2N3055 със зададения радиатор.

Максималното допустимо прегряване на прехода му е

$$\Delta t = t_j - t_a = 200 - 45 = 165 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Следва, че максималната допустима мощност е

$$P_{C1\text{доп}} = \frac{\Delta t}{R_t} = \frac{165}{3,2} = 51,5 \text{ W}.$$

11. Минималният брой на паралелно свързаните транзистори е

$$N = \frac{P_C}{P_{C1\text{доп}}} = \frac{122}{51,5} = 2,4.$$

Приема се цяло, по-голямо число – $N = 3$.

12. Токът през един транзистор е

$$I_{C1} = I_{C2} = I_{C3} = \frac{I_C\max}{N} = \frac{15}{3} = 5 \text{ A}.$$

13. Изчислява се съпротивлението на резистора в емитерната верига R_E :

$$R_{E1} = R_{E2} = R_{E3} = \frac{U_{RE}}{I_{RE}} = \frac{0,6}{5} = 0,12 \Omega.$$

14. Максималното напрежение върху един транзистор е

$$U_{CET1} = U_{i \max} - U_o - U_{RE} = 13,1 - 5 - 0,6 = 7,5 \text{ V.}$$

15. Максималният ток през един транзистор при $+10\%$ разбалансиране на тока е

$$I_{C1 \max} = 1,1 \frac{I_{C \max}}{N} = 1,1 \frac{15}{3} = 5,5 \text{ A.}$$

16. Максималните топлинни загуби в най-натоварения транзистор са

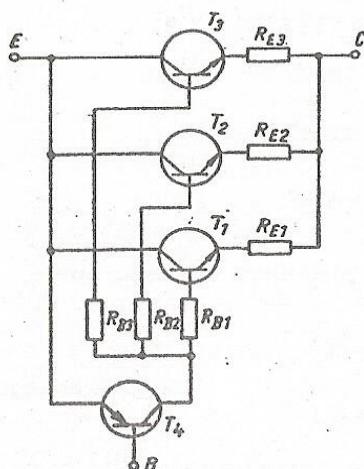
$$P_{C1 \max} = U_{CE1 \max} I_{C1 \max} = 7,5 \cdot 5,5 = 41,25 \text{ W.}$$

17. Изчислява се максималната температура на прехода на най-натоварения транзистор:

$$t_j = P_{C1 \max} R_t + t_a = 41,25 \cdot 3,2 + 45 = 177^\circ\text{C.}$$

Тази температура е допустима.

18. Изчислява се базовия ток на един транзистор:



Фиг. 5.4. Схема на съставния транзистор от пример 5.3

21. Избира се типът на входния транзистор T_4 . Подходящ е 2T7532C (PNP) със следните данни: $U_{CE \max} = 25 \text{ V}$; $U_{CEsat} = 1 \text{ V}$; $h_{21E} = 100$; $I_{C \max} = 4 \text{ A}$; $P_{tot} = 40 \text{ W}$; $R_{tjc} = 3,1 \text{ }^\circ\text{C/W}$; $t_j \max = 150 \text{ }^\circ\text{C}$.

22. Базовият ток на входния транзистор T_4 е

$$I_{B4} = \frac{I_B}{h_{21ET4}} = \frac{1,11}{100} = 11,1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 11,1 \text{ mA.}$$

Този ток е приемлив, ако управляващата схема на стабилизатора е изработена с интегралните стабилизатори $\mu\text{A} 723$ или $\mu\text{A} 7805$, а също така и с операционен усилвател. Ако управляващата схема е изработена с дискретни елементи, налага се да се свърже още един транзистор на входа, за да се получи базов ток на съставния транзистор, по-малък от 1 mA. В този пример такъв вариант няма да бъде решен, понеже не е модерен.

23. Топлинните загуби в транзистора T_4 са

$$P_{C \max T4} = U_{CE \max T4} I_B = 8,1 \cdot 1,11 = 9 \text{ W.}$$

24. Изчислява се повърхнината на охлаждания радиатор на T_4 . Закрепването на транзистора върху радиатора е с изолационна подложка с $R_{tcp} = 1 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Топлинното съпротивление преход-радиатор е

$$R_{tjp} = R_{tjc} + R_{tcp} = 3,1 + 1 = 4,1 \text{ }^\circ\text{C/W.}$$

Топлинното съпротивление радиатор-околна среда е

$$R_{tp} = \frac{t_j - t_a}{P_{C \max T4}} - R_{tjp} = \frac{150 - 45}{9} - 4,1 = 7,6 \text{ }^\circ\text{C/W.}$$

Активната охлаждаща плоц на радиатора е

$$S_p = \frac{1200}{R_{tp}} = \frac{1200}{7,6} = 158 \text{ cm}^2.$$

25. Изчислява се напрежението на насищане на съставния транзистор:

$$U_{CEsat\Sigma} = U_{CEsat T4} + U_{BET1} + U_{RB1} = 1 + 0,6 + 0,5 = 2,1 \text{ V.}$$

26. Преизчислява се входното напрежение:

$$U_{i \min} = \frac{U_o + 1,1 U_{CEsat\Sigma}}{1 - k_{ii}} = \frac{5 + 1,1 \cdot 2,1}{1 - 0,2} = 9,1 \text{ V;}$$

$$U_i = \frac{U_{i \min}}{1 - b} = \frac{9,1}{1 - 0,15} = 10,7 \text{ V;}$$

$$U_{i \max} = U_i(1 + a) = 10,7(1 + 0,15) = 12,3 \text{ V.}$$

Получените стойности на уточненото входно напрежение са по-малки от предварително избраните (т. 3). Това гарантира по-малко топлинно натоварване на транзисторите и затова не са необходими други изчисления.

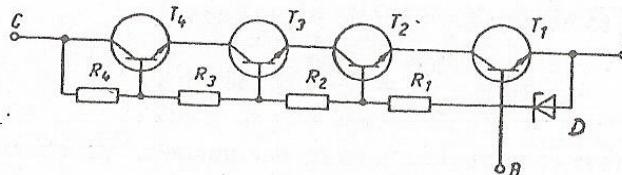
5.3. ПОСЛЕДОВАТЕЛНО СВЪРЗВАНЕ НА ТРАНЗИСТОРИ

Последователното свързване на транзистори се използва рядко само когато се работи с много високи напрежения. На фиг. 5.5 е показана схемата на т. нар. транзисторен стълб. Транзисторите $T_1 - T_4$ трябва да са от еднакъв тип и с еднакви параметри. Напрежението върху всеки транзистор е равно на пада на напрежение върху резистор, свързан към базата му и към базата на по-горния транзистор, т.е. $U_{CE1} = U_{R1}$; $U_{CE2} = U_{R2}$; $U_{CE3} = U_{R3}$; $U_{CE4} = U_{R4}$. За да бъдат равни тези напрежения, делителят трябва да се оразмери по съответен начин. Това се постига, ако са изпълнени равенствата:

$$I_{R3} = I_{R4} - I_{B4},$$

$$I_{R2} = I_{R4} - I_{B4} - I_{B3},$$

$$I_{R1} = I_{R4} - I_{B4} - I_{B3} - I_{B2}.$$



Фиг. 5.5. Транзисторен стълб

Тогава при зададен ток I_{R4} се определят останалите токове. Съпротивленията на резисторите се определят от равенствата

$$I_{R4}R_4 = I_{R3}R_3 = I_{R2}R_2 = I_{R1}R_1 = \text{const} < U_{CE \max}.$$

Стабилитронът D шунтира транзистора T_1 , като предпазва транзисторите в стълба от пробив при евентуалното запушване на T_1 . Напрежението му на пробив трябва да удовлетворява условието

$$U_z < U_{CE \max}.$$

6. ПРОЕКТИРАНЕ НА СТАБИЛИЗATORИ НА НАПРЕЖЕНИЕ С ИНТЕГРАЛНА СХЕМА $\mu\text{A } 78XX$

Интегралната схема на стабилизатор на напрежение тип $\mu\text{A } 78XX$ е предназначена главно за стабилизиране на фиксирани напрежения с най-често употребяваните стойности. Последните две цифри на обозначението, отбелзани по-горе с XX, показват стойността на изходното напрежение. Стабилизаторът е оформен като Т-образен четыреполюсник с три извода в корпус TO-3 или TO-220. В него са вградени защити от токово претоварване и от прегряване на кристала.

Подобни на стабилизаторите $\mu\text{A } 78XX$ са и стабилизаторите от серията $\mu\text{A } 79XX$, които са предназначени да стабилизират напрежения с отрицателна полярност.

Проектирането на стабилизатори на напрежения с $\mu\text{A } 78XX$ и с двата вида интегрални

схеми се извършва по напълно еднакъв начин. На фиг. 6.1 е показана най-простата схема на стабилизатор на напрежение с $\mu\text{A } 78XX$. Нейното оразмеряване въобще се състои в определяне на топлинните загуби в схемата и оразмеряване на охлаждащия радиатор. Трябва също да се определи капацитетът на кондензаторите C_1 , C_2 , C_3 и C_4 .

Капацитетът на кондензатора C_3 се определя при изчисляването на зажранващия токоизправител, понеже той е елемент от изглаждящия му филтър. Кондензаторите C_1 и C_2 се препоръчва да се изберат с капацитет $C_1 = C_2 = 0,1 \div 0,22 \mu\text{F}$. Те трябва да се монтират в непосредствена близост до изводите на интегралната схема с къси проводници (както е показано на фигурата). Служат за предотвратяване на евентуалното самовъзбуждане на висока честота, поради паразитни индуктивности и капацитети на монтажа.

Капацитетът на кондензатора C_4 се определя по формулата

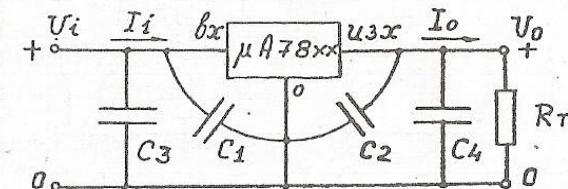
$$(6.1) \quad C_4 = \frac{I_1}{\omega U_1} = \frac{I_1}{2\pi f_1 U_1},$$

където I_1 е ефективната стойност на първия гармоник на тока, консумиран от това място;

f_1 – честотата на този ток;

U_1 – допустимата ефективна стойност на променливото напрежение върху C_4 , като резултат от протичането на тока I_1 .

В (6.1) I_1 е определен от товара, f_1 – също, а U_1 е зададено или се избира от проектирация.

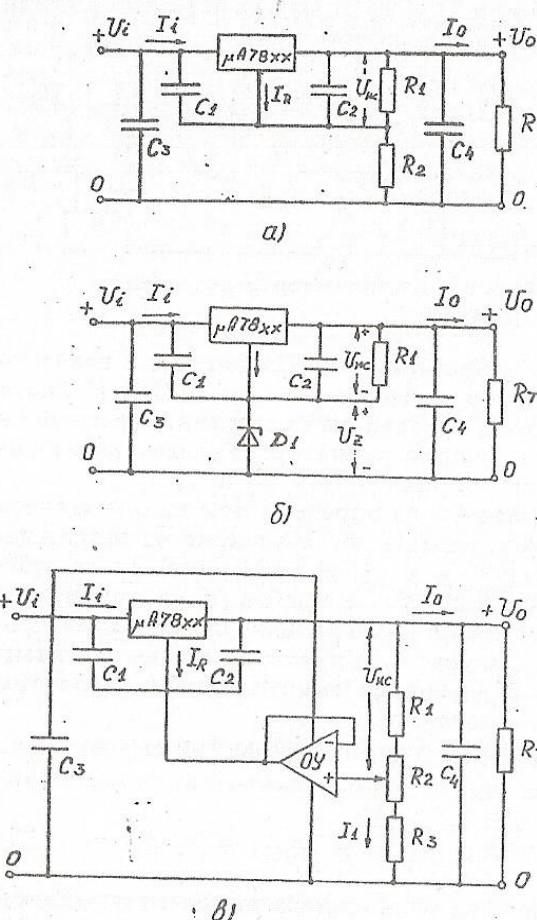


Фиг. 6.1. Стабилизатор на напрежение с $\mu\text{A } 78XX$

6.1. НАЧИНИ ЗА УВЕЛИЧАВАНЕ НА ИЗХОДНОТО НАПРЕЖЕНИЕ НА СТАБИЛИЗАТОР СЪС СХЕМА μ A 78XX

С интегралната схема μ A 78XX може да се получи по-високо изходно напрежение от номиналната му стойност чрез използване на подходящо свързване (фиг. 6.2).

Изходното напрежение на стабилизатор от схемата на фиг. 6.2a е по-високо от напрежението на интегралната схема с пада на напрежение върху резистора R_2 .



Фиг. 6.2. Схеми за повишаване на изходното напрежение
a - чрез резистивен делител; б - чрез стабилизатор; в - чрез операционен усилвател

Схемата от фиг. 6.2б се използва, когато се иска да се намали влиянието на тока на собствената консумация на интегралната схема върху изходното напрежение.

Стабилизаторът, показан на фиг. 6.2б, дава възможност за плавно регулиране на изходното напрежение в известни граници. Операционният усилвател ОУ трябва да е с достатъчна изходна мощност, за да осигури вътрешния ток на собствена консумация на интегралната схема.

Следващите примери илюстрират практическото изчисляване на показаните схеми. Понеже схемата от фиг. 6.1 е елементарна за оразмеряване, подобен пример не е даден.

Проектирането на схемата от фиг. 6.2a се извършва по следния начин:

1. Избира се типът на интегралната схема. Тя трябва да бъде с напрежение по-малко от изходното и по възможност най-близко до него.

2. Определя се относителното изменение на входното напрежение, като a

a – относителното му увеличение, а b – относителното му намаление.

3. Определя се относителната стойност на коефициента на пулсации k_p .

4. Избира се отношението между тока през резистора R_2 и тока в общия извод на интегралната схема I_R . Препоръчва се

$$(6.2) \quad k_1 = \frac{I_{R2}}{I_R} = (3 \div 10).$$

5. Изчислява се съпротивлението на резистора R_1 :

$$(6.3) \quad R_1 = \frac{U_{IC}}{(k_1 - 1)I_R}, \text{ A.}$$

6. Мощността на резистора R_1 е

$$(6.4) \quad P_{R1} = (k_1 - 1)^2 I_R^2 R_1, \text{ W.}$$

7. Изчислява се съпротивлението на резистора R_2 :

$$(6.5) \quad R_2 = \frac{U_o - U_{IC}}{k_1 I_R}, \Omega.$$

8. Мощността на резистора R_2 е

$$(6.6) \quad P_{R2} = (k_1 I_R)^2 R_2, \text{ W.}$$

9. Захранващото напрежение на стабилизатора е

$$(6.7) \quad U_{i\ min} = \frac{k_2(U_{i\ IC\ min} - U_{IC} + U_o)}{1 - k_p}, \text{ V.}$$

$$(6.8) \quad U_i = \frac{U_{i\ min}}{1 - b}, \text{ V.}$$

$$(6.9) \quad U_{i\ max} = U_i(1 + a), \text{ V.}$$

където $k_2 = (1,5 \div 3)$ е коефициент на запас по напрежение;

$U_{i\ IC\ min}$ – минималното допустимо входно напрежение на интегралната схема.

10. Максималната топлинна мощност разсейвана в интегралната схема е

$$(6.10) \quad P_{IC} = U_{i\ max}(I_o + k_1 I_R), \text{ W.}$$

11. Капацитетът на кондензатора C_4 се определя от (6.1).

12. При необходимост се определя капацитетът на C_3 .

13. Изчислява се средният коефициент на полезно действие на схемата

$$(6.11) \quad \eta = \frac{U_o I_o}{U_i(I_o + k_1 I_R)}.$$

Пример 6.1. Да се проектира стабилизатор на напрежение със следните данни: $U_o = 14 \text{ V}$; $I_o = 1 \text{ A}$; промени на входното напрежение $\Delta U_i = +10, -15\%$; коефициент на пулсации на входното напрежение $k_p = 20\%$; коефициент на стабилизация $k_{st} \geq 150$; напрежение на пулсациите в изхода породени от товарния ток $U_1 = 0,5 \text{ V}$.

Изчисляване

1. Зададените коефициент на стабилизация и товарен ток позволяват да се използва интегрална схема от типа $\mu\text{A } 78XX$. Избира се тип $\mu\text{A } 7812$. Понеже нейното изходно напрежение е $U_{IC} = 12 \text{ V}$, налага се да се коригира до $U_o = 14 \text{ V}$. Избира се схемата на стабилизатора от фиг. 6.2a.

2. Относителната стойност на увеличението на входното напрежение е $a = 0,1$, а относителната стойност на намалението му $-b = 0,15$.

3. Относителната стойност на коефициентът на пулсации е $k_p = 0,2$.

4. Избира се отношението между тока на резистора R_2 и тока на консумация на интегралната схема:

$$k_1 = \frac{I_{R2}}{I_R} = 4.$$

5. Изчислява се съпротивлението на резистора R_1 :

$$R_1 = \frac{U_{IC}}{(k_1 - 1)I_R} = \frac{12}{(4 - 1)8 \cdot 10^{-3}} = 500 \Omega.$$

6. Мощността на резистора R_1 е:

$$P_{R1} = (k_1 - 1)^2 I_R^2 R_1 = (4 - 1)^2 (8 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 500 = 0,288 \text{ W.}$$

Избира се резистор със стандартна мощност $0,5 \text{ W}$.

7. Изчислява се съпротивлението на резистора R_2 :

$$R_2 = \frac{U_o - U_{IC}}{k_1 I_R} = \frac{14 - 12}{4 \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 62,5 \Omega.$$

Избира се резистор със стандартна стойност 62Ω .

8. Мощността, разсейвана в резистора R_2 , е

$$P_{R2} = k_1^2 I_R^2 R_2 = 4^2 (8 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 62 = 0,063 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност $0,125 \text{ W}$.

За точно нагласяване на стойността на изходното напрежение коефициентът на предаване на делителя R_1, R_2 трябва да може да се изменя в малки граници. Това се постига чрез свързване на тример-потенциометър последователно с един от резисторите. В този случай по-удобно е да се регулира резисторът R_1 .

9. Входното напрежение на схемата е

$$U_{i min} = \frac{k_2(U_{i IC min} - U_{iC} + U_o)}{1 - k_p} = \frac{1,1(14 - 12 + 14)}{1 - 0,2} = 22 \text{ V};$$

$$U_i = \frac{U_{i min}}{1 - b} = \frac{22}{1 - 0,15} = 26 \text{ V};$$

$$U_{i max} = U_i(1 + a) = 26(1 + 0,1) = 29 \text{ V.}$$

10. Максималната топлинна мощност, разсейвана от интегралната схема е

$$P_{iC} = U_{i max}(I_o + k_1 I_R) = 29(1 + 4 \cdot 8 \cdot 10^{-3}) = 29,93 \text{ W.}$$

Необходимо е да се проектира охлаждащ радиатор.

11. Ако приемем, че променливият ток генериран от товара е $I_1 = 0,5 \text{ A}$ и честота $f_1 = 1000 \text{ Hz}$, тогава капацитетът на кондензатора C_4 е

$$C_4 = \frac{I_1}{2\pi f_1 U_1} = \frac{0,5}{2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 0,5} = 1590 \cdot 10^{-6} \text{ F.}$$

Избира се кондензатор с капацитет $2000 \mu\text{F}$.

12. Кондензаторът C_3 участва във филтъра на захранвания токоизправител и капацитетът му се изчислява при изчисляването на токоизправителя.

13. Изчислява се средният коефициент на полезно действие на схемата:

$$\eta = \frac{U_o I_o}{U_i(I_o + k_1 I_R)} = \frac{14 \cdot 1}{26(1 + 4 \cdot 8 \cdot 10^{-3})} = 0,52.$$

Когато се използва схемата от фиг. 6.2b, проектирането се извършва по следния начин:

Точки 1, 2 и 3 са същите, както при предишния пример.

4. Избира се стабилитронът D_1 . Напрежението му трябва да е

$$(6.12) \quad U_z = U_o - U_{iC}, \text{ V.}$$

5. Избира се работният ток на стабилитрона

$$(6.13) \quad I_z = I_R + I_{z min}, \text{ A.}$$

6. Определя се отношението между тока на стабилитрона и тока на интегралната схема

$$(6.14) \quad k_3 = \frac{I_z}{I_R}.$$

7. Изчислява се съпротивлението на резистора R_1

$$(6.15) \quad R_1 = \frac{U_{IC}}{(k_3 - 1)I_R}, \Omega.$$

8. Определя се мощността на R_1

$$(6.16) \quad P_{R1} = \frac{U_{IC}^2}{R_1}, W.$$

9. Изчислява се захранващото напрежение от (6.7), (6.8) и (6.9).

10. Максималната топлинна мощност отделяна в интегралната схема е

$$(6.17) \quad P_{IC\max} = U_{i\max}(I_o + k_3 I_R), W.$$

11. Изчислява се капацитетът на кондензаторите C_3 и C_4 .

12. Изчислява се средният к.п.д. на стабилизатора

$$(6.18) \quad \eta_{cp} = \frac{U_o I_o}{U_i(I_o + k_3 I_R)}.$$

Пример 6.2. Да се проектира стабилизатор на напрежение по схемата от фиг. 6.2б със следните данни: $U_o = 17,5$ V; $I_o = 0,5$ A; изменение на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 20\%$; коефициент на пулсации на входното напрежение $k_n = 10\%$; коефициент на стабилизация $k_{ct} \geq 200$.

Изчисляване

1. Избира се интегралната схема μ A 7812. Понеже нейното напрежение е $U_{IC} = 12$ V, налага се коригирането му до 17,5 V. Това се извършва чрез стабилитрона D_1 .

2. Избира се стабилитрона D_1 . Напрежението му трябва да бъде

$$U_z = U_o - U_{IC} = 17,5 - 12 = 5,5 \text{ V.}$$

Подходящ за целта е стабилитрона тип KC156A със следните данни: $r_z = 46 \Omega$ при ток $I_{z\min} = 10 \text{ mA}$; максимален ток $I_{z\max} = 55 \text{ mA}$.

3. Избира се работният ток на стабилитрона

$$I_z = I_R + I_{z\min} = 8 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-3} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ A.}$$

4. Отношението между тока на стабилитрона и тока на консумация на интегралната схема е

$$k_1 = \frac{I_z}{I_R} = \frac{18}{8} = 2,25.$$

5. Изчислява се съпротивлението на резистора R_1 :

$$R_1 = \frac{U_{IC}}{(k_1 - 1)I_R} = \frac{12}{(2,25 - 1)8 \cdot 10^{-3}} = 1,2 \cdot 10^3 \Omega.$$

Това е стандартна стойност $R_1 = 1,2 \text{ k}\Omega$.

6. Мощността, разсейвана от резистора R_1 , е

$$P_{R1} = \frac{U_{IC}^2}{R_1} = \frac{12^2}{1,2 \cdot 10^3} = 0,12 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност 0,25 W.

7. Относителната стойност на увеличението на входното напрежение е $a = 0,2$, а относителното му намаление – $b = 0,2$.

8. Относителната стойност на коефициента на пулсации е $k_n = 0,1$.

9. Изчислява се захранващото напрежение:

$$U_{i\min} = \frac{1,1(U_{iIC\min} - U_{IC} + U_o)}{1 - k_n} = \frac{1,1(14 - 12 + 17,5)}{1 - 0,1} = 23,8 \text{ V};$$

$$U_i = \frac{U_{i\min}}{1 - b} = \frac{23,8}{1 - 0,2} = 29,6 \text{ V};$$

$$U_{i\max} = U_i(1 + a) = 29,6(1 + 0,2) = 35,5 \text{ V.}$$

10. Максималната топлинна мощност, отделяна в интегралната схема, е

$$P_{IC\max} = U_{i\max}(I_o + k_1 I_R) = 35,5(0,5 + 2,5 \cdot 0,008) = 18,5 \text{ W.}$$

Необходимо е да се проектира охлаждащ радиатор.

11. Изчислява се капацитетът на кондензатора C_4 :

$$C_4 = \frac{I_1}{\omega U_1} = \frac{0,25}{2,3 \cdot 14 \cdot 1000 \cdot 0,05} = 795 \mu\text{F.}$$

Избира се стандартен кондензатор 1000 $\mu\text{F}/25$ V.

12. Кондензаторът C_3 участва във филтъра на захранващия токоизправител и капацитетът му се определя при неговото изчисляване.

13. Изчислява се средният к.п.д. на стабилизатора:

$$\eta_{cp} = \frac{U_o I_o}{U_i(I_o + k_1 I_R)} = \frac{17,5 \cdot 0,5}{29,6(0,5 + 2,25 \cdot 0,008)} = 0,5.$$

С това проектирането на тази схема е завършено.

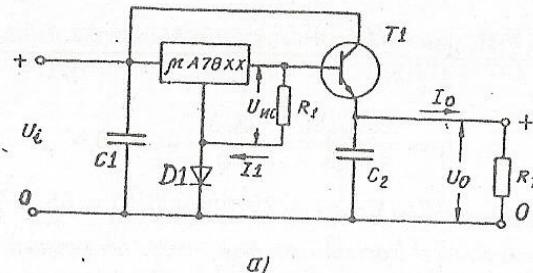
Оразмеряването на схемата от фиг. 6.2б се състои в избор на типа на операционния усилвател и в изчисляване на съпротивленията на делителя на напрежение R_1 , R_2 и R_3 .

6.2. НАЧИНИ ЗА УВЕЛИЧАВАНЕ НА ИЗХОДНИЯ ТОК НА СТАБИЛИЗАТОР С ИНТЕГРАЛНА СХЕМА $\mu\text{A} 78XX$

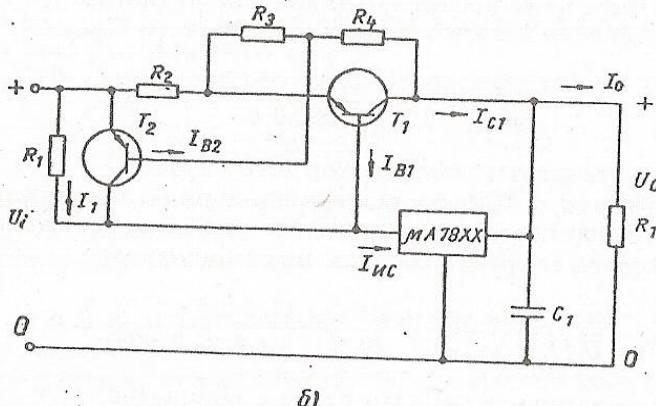
Когато е необходим изходен ток, по-голям от 1 A, това може да се постигне и с интегралната схема $\mu\text{A} 78XX$ по начините показани на фиг. 6.3.

Схемата на фиг. 6.3a е от най-прост тип. Използван е мощният транзистор T_1 , който работи като усилвател на ток – емитерен повторител. Изходното напрежение U_o се получава по-малко от изходното напрежение на интегралната схема (поради пада на напрежение U_{BE} в транзистора T_1), затова се налага да се компенсира чрез пада на напрежение върху диода D_1 . Резисторът R_1 пропуска един начален ток през диода, за да му осигури стабилна работна точка.

Съществен недостатък на тази схема е, че при нея отпада действието на защитата от претоварване по ток. Нейното проектиране е елементарно, затова е показано само с решен пример.



a)



b)

Фиг. 6.3. Схеми за увеличаване на товарния ток
a – чрез емитерен повторител;
б – усъвършенствана схема със защита от свръхток

Пример 6.3. Да се проектира стабилизатор на напрежение по схемата от фиг. 6.3a със следните данни: $U_o = 5 \text{ V}$; $I_o = 10 \text{ A}$; промяна на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 15\%$; коефициент на пулсации на входното напрежение $k_p = 10\%$.

Изчисляване

1. Избира се типът на интегралната схема – $\mu\text{A} 7805$.
2. Относителната стойност на увеличението на входното напрежение е $a = 0,15$, а относителната стойност на намалението му – $b = 0,15$.
3. Относителната стойност на коефициента на пулсации е $k_p = 0,1$.
4. Изчислява се входното напрежение на стабилизатора:

$$U_{i \min} = \frac{1,1(U_o + \Delta U_{i \text{IC min}})}{1 - k_p} = \frac{1,1(5 + 2)}{1 - 0,1} = 8,6 \text{ V};$$

$$U_i = \frac{U_{i \min}}{1 - b} = \frac{8,6}{1 - 0,15} = 11 \text{ V};$$

$$U_{i \max} = U_i(1 + a) = 11(1 + 0,15) = 12,6 \text{ V}.$$

5. Изчислява се напрежението колектор-емитер на T_1 :

$$U_{CE} = U_{i \max} - U_o = 12,6 - 5 = 7,6 \text{ V}.$$

6. Мощността, отделена върху колектора на T_1 , е

$$P_C = U_{CE} I_o = 7,6 \cdot 10 = 76 \text{ W}.$$

Необходим е охлаждащ радиатор.

7. Избира се мощната транзистор. Понеже токът е голям, подходящ тип е 2N3055 със следните данни: $U_{CE \max} = 60 \text{ V}$; $U_{CEsat} = 1,1 \text{ V}$; $I_C \max = 15 \text{ A}$; $h_{21E} = 15 \div 120$; $P_C \max = 117 \text{ W}$; $R_{tjC} = 1,5^\circ\text{C}/\text{W}$; $t_{j \max} = 200^\circ\text{C}$.
8. Максималният базов ток на транзистора T_1 е

$$I_B = \frac{I_o}{h_{21E \min}} = \frac{10}{15} = 0,66 \text{ A}.$$

9. Избира се диодът D_1 . Подходящ тип е КД1113 със следните данни: $I_F \max = 300 \text{ mA}$; $U_{RRm} = 100 \text{ V}$; $U_F = 0,7 \text{ V}$.

10. Изчислява се съпротивлението на резистора R_1 при ток, проптичащ през него $I_1 = 3I_{R\text{IC}} = 3 \cdot 0,024 = 0,072 \text{ A}$:

$$R_1 = \frac{U_{\text{IC}}}{I_1} = \frac{5}{0,072} = 69 \Omega.$$

Избира се стандартната стойност 200 Ω .

11. Мощността, разсейвана върху резистора R_1 , е

$$P_{R1} = \frac{U_{\text{IC}}^2}{R_1} = \frac{5^2}{200} = 0,125 \text{ W}.$$

Избира се резистор с мощност 0,25 W.

12. Изчислява се изходният ток на интегралната схема:

$$I_{\text{IC}} = I_B + I_1 = 660 + 24 = 684 \text{ mA.}$$

13. Максималната топлинна мощност, отделена в интегралната схема, е

$$P_{\text{IC}} = [U_{i \max} - (U_{\text{IC}} + 0,7)]I_{\text{IC}} = [12,6 - (5 + 0,7)]0,684 = 4,7 \text{ W.}$$

За разсейването, ѝ също е необходим радиатор.

14. Изчислява се капацитетът на кондензатора C_2 по формула (6.1).

15. Капацитетът на кондензатора C_1 е определен при изчисляването на токоизправителя.

16. Определя се средният к.п.д.:

$$\eta_{\text{cp}} = \frac{U_o I_o}{U_i (I_o + I_1 + I_{\text{IC}})} = \frac{5,10}{11(10 + 0,024 + 0,008)} = 0,453.$$

С това оразмеряването на схемата е приключено.

На фиг. 6.3б е показана схема на стабилизатор за голям ток, която няма недостатъка на схемата от фиг. 6.3а – липса на токова защита. Действието ѝ е следното: докато товарният ток е малък, по-голямата част от него протича през интегралната схема, а само една малка част – през делителя R_2, R_3, R_4 . Падът на напрежение върху резистора R_1 не е достатъчен, за да отпуши транзистора T_1 и той не провежда ток. При нарастване на товарния ток падът на напрежението върху резистора R_1 надвишава праговото напрежение U_{BET1} на транзистора T_1 , той се отпуска и за работва в активен режим. Протичащият през него ток се сумира с тока на интегралната схема и понеже може да е многократно по-голям от него, обхватът по ток на стабилизатора се разширява чувствително.

Чрез подбор на резисторите R_2, R_3 и R_4 се осъществява защита на транзистора T_1 от прегряване. Върху резистора R_2 има напрежение, пропорционално на тока през T_1 , а върху резистора R_3 – напрежение, пропорционално на напрежението колектор-емитер на T_1 . Двете напрежения се сумират и се подават на прехода база-емитер на T_2 като отпусващо напрежение. При повишаване на тока и напрежението над определени стойности, транзисторът T_2 започва да провежда ток и като шунтира R_1 и прехода база-емитер на транзистора T_1 , ограничава тока през него.

Понеже интегралната схема има вградена защита по ток, цялата схема, показана на фиг. 6.3б, е защитена от токово претоварване.

Пример 6.4. Да се проектира стабилизатор на напрежение, изпълнен по схемата от фиг. 6.3б, със следните данни: $U_o = 12 \text{ V}$; $I_o = 5 \text{ A}$; ток на действуване на защитата $I_{kp} = 6 \text{ A}$; ток на късо съединение $I_{kc} = 2 \text{ A}$; промени на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 10\%$; коефициент на пулсации на входното напрежение $k_p = 15\%$.

Изчисляване

1. Избира се типът на интегралната схема – $\mu\text{A } 7812$.

2. Относителното увеличение на входното напрежение е $a = 0,10$, а относителното му намаление – $b = 0,10$.

3. Относителната стойност на коефициента на пулсации е $k_p = 0,15$.

4. Изчислява се входното напрежение:

$$U_{i \min} = \frac{1,1(U_o + \Delta U_{i \min})}{1 - k_p} = \frac{1,1(12 + 3)}{1 - 0,15} = 18 \text{ V};$$

$$U_i = \frac{U_{i \min}}{1 - b} = \frac{18}{1 - 0,1} = 20 \text{ V};$$

$$U_{i \max} = U_i(1 + a) = 20(1 + 0,1) = 22 \text{ V.}$$

5. Приема се разпределението на тока през интегралната схема и транзистора T_1 така: при работен ток през $\mu\text{A } 7812 I_{\text{IC}} = 1 \text{ A}$, работният ток през T_1 е

$$I_{CT1} = I_o - I_{\text{IC}} = 5 - 1 = 4 \text{ A.}$$

6. Напрежението върху транзистора T_1 е

$$U_{CET1} = U_{i \max} - U_o = 22 - 12 = 10 \text{ V.}$$

7. Мощността, отделена върху транзистора T_1 , е

$$P_{CT1} = U_{CET1} I_{CT1} = 10 \cdot 4 = 40 \text{ W.}$$

8. Избира се мощната транзистор T_1 . Поради сравнително големия ток и свързаните с това топлинни загуби избира се по-мощен транзистор – KD615 със следните данни: $U_{CE \max} = 40 \text{ V}$; $I_{C \max} = 10 \text{ A}$; $P_{C \max} = 70 \text{ W}$; $t_{j \max} = 155^\circ\text{C}$; $h_{21E} = 30$.

9. Изчислява се максималният допустим ток през транзистора при зададеното входно напрежение

$$I_{C \max T1} = \frac{P_{C \max T1}}{U_{CET1}} = \frac{70}{10} = 7 \text{ A} > I_{kp} = 6 \text{ A.}$$

Интегралната схема $\mu\text{A } 7812$ и транзисторът T_1 се монтират върху един охлаждаш радиатор, за да се постигне общ температурен режим и ефикасна защита на T_1 от прегряване.

10. Определя се базовият ток на T_1 :

$$I_{BT1} = \frac{I_{CT1}}{h_{21ET1}} = \frac{4}{30} = 0,133 \text{ A.}$$

11. Изчислява се токът през R_1 :

$$I_{R1} = I_{\text{IC}} - I_{BT1} = 1 - 0,133 = 0,867 \text{ A.}$$

12. Изчислява се съпротивлението на R_1 :

$$R_1 = \frac{U_{BET1} + U_{R2} + U_{R3}}{I_{R1}} \approx \frac{U_{BET1} + U_{BET2}}{I_{R1}} = \\ = \frac{0,6 + 0,6}{0,867} = 1,37 \Omega.$$

Избира се резистор със стандартна стойност $R_1 = 1,4 \Omega$.

13. Изчислява се коефициентът на предаване σ на делителя R_3, R_4 :

$$\sigma \approx \frac{\left(\frac{I_{kp}}{I_{kc}} - 1\right) U_{BET2}}{\left(\frac{I_{kp}}{I_{kc}} - 1\right) U_i + U_o} = \frac{\left(\frac{6}{2} - 1\right) 0,6}{\left(\frac{6}{2} - 1\right) 20 + 12} = 0,023.$$

14. Избира се съпротивлението на R_3 при спазване на условието $R_3 < 10 \Omega$:

$$R_3 = 5,1 \Omega.$$

15. Изчислява се съпротивлението на резистора R_4 :

$$R_4 = \frac{R_3 - \sigma R_3}{\sigma} \approx \frac{R_3}{\sigma} = \frac{5,1}{0,023} = 221,7 \Omega.$$

Избира се стандартна стойност $R_4 = 220 \Omega$.

16. Изчислява се съпротивлението на резистора R_2 :

$$R_2 = \frac{U_{BET2} - U_i \sigma}{I_{kc}} = \frac{0,6 - 20 \cdot 0,023}{2} = 0,07 \Omega.$$

17. Изчислява се мощността на резистора R_2 :

$$P_{R2} = I_{R2}^2 R_2 = 4^2 \cdot 0,07 = 1,12 \text{ W}.$$

Избира се резистор с мощност 2 W.

18. Изчислява се максималния ток през транзистора T_2

$$I_{CT2} = I_{IC \max} - \frac{U_{CEsatT2}}{R_1} = 1 - \frac{0,5}{1,37} = 0,63 \text{ A}.$$

19. Избира се транзистор тип 2T9133 със следните данни: $U_{CE \max} = 30 \text{ V}$; $U_{CEsat} = 0,5 \text{ V}$; $h_{21E} = 40 \div 250$; $I_{C \max} = 1 \text{ A}$; $P_{C \max} = 8 \text{ W}$; $R_{jeC} = 10^\circ \text{C/W}$.

20. Максималната топлинна мощност, отделена върху T_2 , е

$$P_{CT2} = I_{CT2} U_{CEsatT2} = 0,62 \cdot 0,5 = 0,31 \text{ W}.$$

21. Изчислява се средният к.п.д.:

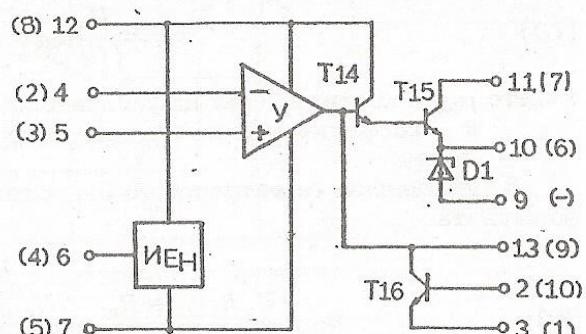
$$\eta_{cp} = \frac{U_o I_o}{U_i I_o} = \frac{12,5}{20,5} = 0,6.$$

7. ПРОЕКТИРАНЕ НА СТАБИЛИЗATORИ НА НАПРЕЖЕНИЕ С ИНТЕГРАЛНА СХЕМА $\mu\text{A} 723$

Интегралната схема $\mu\text{A} 723$ е стабилизатор на напрежение с вграден източник на еталонно напрежение, усилвател и маломощен регулиращ транзистор. Схемата се произвежда в корпус ТО-100 (металостъклена с десет извода) или в корпус DIL-14. На фиг. 7.1 е показана блоковата схема на $\mu\text{A} 723$. Номерацията на изводите без скоби отговаря на корпус DIL-14, а в скобите – на корпус ТО-100. Вътрешните вериги на схемата се захранват през изводите 12(+) и 7(-) с напрежение от 8 до 40 V. На извод 6 е изведен източник за еталонно напрежение $U_{ref} = 7,1 \text{ V}$. Максималният ток, който може да се консумира от изхода на еталонния източник е 15 mA. Усилвателят Y е диференциален, на извод 5 е изведен неинвертиращият му вход, а на извод 4 – инвертиращият му вход. Коефициентът на усилване на усилвателя е $\mu_{dy} = 2000$. Транзисторът T_{15} е изходен, колекторът и емитерът му са изведени на отделни изводи, което позволява универсално приложение на схемата. Неговите данни са: максимален колекторен ток $I = 150 \text{ mA}$; максимално напрежение колектор-емитер $U_{CE \max} = 40 \text{ V}$; входно съпротивление при еmitterен ток 50 mA $h_{11E} = 6000 \Omega$; максимална мощност $P_{C \max} = 500 \text{ mW}$. При изпълнение в пластмасов корпус DIL-14 схемата има допълнителен извод 9, на който е изведен анода на стабилитрон за 6,2 V, катода на който е свързан с емитера на транзистора T_{15} . Ако схемата е в корпус ТО-100, този извод липсва. Транзисторът T_{16} служи за реализиране на схеми за токови защити. Максималната топлинна мощност на цялата интегрална схема е 800 mW.

С интегралната схема $\mu\text{A} 723$ могат да се реализират различни видове стабилизатори на напрежение, които обхващат практически целия диапазон на захранващите токоизточници в електрониката. Те могат да се класифицират по следните признания:

- според изходното напрежение
 - a) стабилизатори за напрежение до 7 V;
 - b) стабилизатори за напрежение над 7 V;
- според полярността на незаземената изходна клема
 - a) стабилизатори за положително напрежение;
 - b) стабилизатори за отрицателно напрежение;



Фиг. 7.1. Функционална схема на стабилизатора $\mu\text{A} 723$

- според вида на защитата
- a) със защита с токоограничаване;
- b) със защита с намален ток на късо съединение;
- според изходния (товарния) ток
- a) за малък ток (до 20 mA);
- b) за голям ток (над 20 mA).

Проектирането на стабилизатора протича по следната схема:

1. Избира се видът на защитата и се изчислява съпротивлението на резистора R_{sh} .
2. Според зададените относителни изменения на входното напрежение и коефициента му на пулсации се определя входното напрежение на стабилизатора.
3. Изчислява се максималната топлинна мощност в регулиращия транзистор и се избира неговия тип и начин на охлаждане.
4. Начертава се окончателно уточненият вариант на схемата.
5. Оразмеряват се веригите в схемата за защита по ток.
6. Оразмеряват се веригите на обратната връзка по напрежение.
7. Изчислява се коефициентът на стабилизация по напрежение на стабилизатора по формулата:

$$(7.1) \quad k_{st} = \frac{U_o}{U_i} \mu_{du} \sigma,$$

където μ_{du} е коефициентът на усиливане на усилвателя;

σ – коефициентът на предаване по напрежение на входния делител.

8. Изчислява се вътрешното съпротивление на стабилизатора по формулата:

$$(7.2) \quad R_i = \frac{U_o h_{11B} + R_{sh}}{k_{st}} = \frac{U_o h_{21E}}{k_{st}} + R_{sh};$$

където R_{sh} е съпротивлението на резистора за токова защита; h_{11E} , h_{21E} и h_{11B} – параметри на регулиращия транзистор.

9. Изчислява се коефициентът на полезно действие на стабилизатора

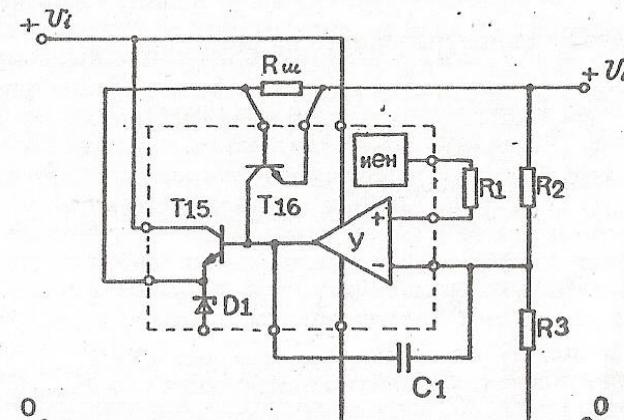
$$(7.3) \quad \eta = \frac{U_o I_o}{U_i I_i} \approx \frac{U_o}{U_i}.$$

Поради многовариантността на схемните решения, които могат да се получат за всеки конкретен случай на проектиране, не е възможно да се създаде универсален алгоритъм като последователност от уравнения и формули. По-долу в настоящето ръководство са показани като илюстрация няколко типични примери, които не изчерпват всички възможни варианти.

Пример 7.1. Да се проектира стабилизатор на напрежение със следните данни: изходно напрежение $U_o = 12 V$; товарен ток $I_o = 10 mA$; относително изменение на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 15\%$; коефициент на пулсации на входното напрежение $k_{\pi} = 10\%$; ток на задействване на защитата от претоварване $I_{kp} = 15 mA$.

Изчисляване

1. Понеже изходният ток е малък (под 20 mA), избира се схемата показана на фиг. 7.2, която използва за регулиращ транзистор вградения в интегралната схема и е със защита от претоварване по ток с токоограничение (фиг. 4.1a). Изходното напрежение е по-голямо от еталонното (7,1 V), затова трябва да се приведе към него с делителя за обратна връзка R_2 , R_3 .



Фиг. 7.2. Стабилизатор на напрежение от пример 7.1

1. Изчислява се съпротивлението на резистора R_{sh}

$$R_{sh} = \frac{U_{BET16}}{I_{kp}} = \frac{0,6}{0,015} = 40 \Omega.$$

2. Относителното увеличение на входното напрежение е $a = 0,15$, а относителното му намаление – $b = 0,15$. Относителният коефициент на пулсации е $k_{\pi} = 0,1$.

3. Изчислява се входното напрежение

$$U_{i\min} = \frac{U_o + I_o R_{sh} + U_{CE\min} T15}{1 - k_{\pi}} = \frac{12 + 0,01 \cdot 40 + 2}{1 - 0,1} = 14,4 V;$$

$$U_i = \frac{U_{i\min}}{1 - b} = \frac{14,4}{1 - 0,15} = 16,9 V;$$

$$U_{i\max} = U_i(1 + a) = 16,9(1 + 0,15) = 19,4 V.$$

4. Изчислява се максималната топлинна мощност, отделяна в интегралната схема в работен режим:

$$P_{\text{ис}} = (U_{i \max} - U_o) I_o = (19,4 - 12) 0,01 = 0,074 \text{ W.}$$

5. Изчислява се максималната топлинна мощност, отделяна в интегралната схема в режим на късо съединение:

$$P_{\text{кс}} = U_{i \max} I_{\text{кр}} = 19,4 \cdot 0,015 = 0,29 \text{ W.}$$

Тази мощност е допустима.

6. Избира се токът през делителя R_2, R_3 :

$$I_{R2} = I_{R3} = 0,5 \text{ mA.}$$

7. Изчислява се съпротивлението на резистора R_3 :

$$R_3 = \frac{U_{\text{ет}}}{I_{R3}} = \frac{7,14}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 14280 \Omega.$$

Избира се стандартна стойност $14 \text{ k}\Omega$.

8. Изчислява се съпротивлението на резистора R_2 :

$$R_2 = \frac{U_o - U_{\text{ет}}}{I_{R2}} = \frac{12 - 7,14}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 9720 \Omega.$$

Избира се резистор със стандартна стойност $10 \text{ k}\Omega$.

9. Коефициентът на предаване по напрежение на входния делител е

$$\sigma = \frac{R_3}{R_2 + R_3} = \frac{14000}{10000 + 14000} = 0,583.$$

10. Изчислява се съпротивлението на резистора R_1 :

$$R_1 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{10 \cdot 14}{10 + 14} = 5,8 \text{ k}\Omega.$$

Избира се стандартна стойност $R_1 = 5,6 \text{ k}\Omega$.

11. Капацитетът на кондензатора C_1 е препоръчен от фирмата-производител на интегралната схема и е

$$C_1 = (100 \div 10000 \text{ pF}).$$

12. Коефициентът на стабилизация е

$$k_{\text{ст}} = \frac{U_o}{U_i} \mu_{\text{ду}} \sigma = \frac{12}{16,9} \cdot 2000 \cdot 0,583 = 828.$$

13. Вътрешното съпротивление на стабилизатора е

$$r_i = \frac{U_o}{U_i} \frac{h_{21E}}{k_{\text{ст}}} + R_{\text{ш}} = \frac{12}{16,9} \frac{1000}{828} + 40 = 0,039 \Omega.$$

14. Коефициентът на полезно действие е

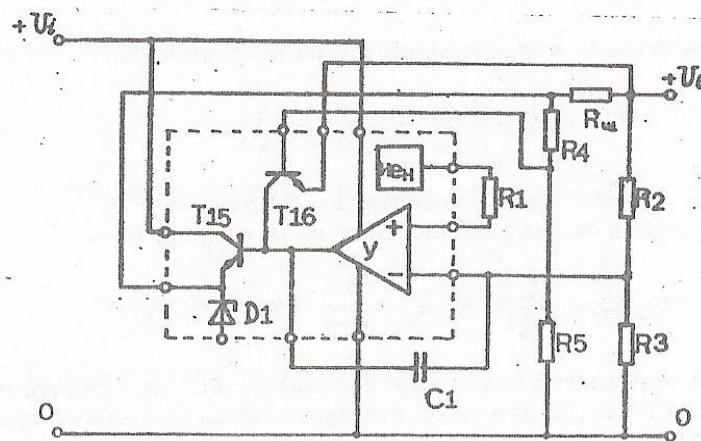
$$\eta = \frac{U_o}{U_i} = \frac{12}{16,9} = 0,71.$$

С това оразмеряването на схемата е завършено. Ако се налага в делителя за обратна връзка може да се включи тример-потенциометър за точна настройка на изходното напрежение.

Пример 7.2. Да се проектира стабилизатор на напрежение със следните данни: изходно напрежение $U_o = 12 \text{ V}$; товарен ток $I_o = 40 \text{ mA}$; относително изменение на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 15\%$; коефициент на пулсации на входното напрежение $k_p = 10\%$; ток на задействане на защитата от претоварване $I_{\text{кр}} = 50 \text{ mA}$.

Понеже токът на задействане на защитата е по-голям от 20 mA , налага се да се избере схема на защита, при която токът на късо съединение е по-малък от тока на задействане на защитата. За регулиращ транзистор ще се използва вградения в интегралната схема мощн транзистор.

Избира се схема за защита съгласно фиг. 4.3 и се получава пълната схема на стабилизатора, показана на фиг. 7.3. Тя е подобна на схемата от фиг. 7.2, като допълнително е въведен делителят на напрежение R_4, R_5 .



Фиг. 7.3. Стабилизатор с подобрена токова защита

Изчисляване

1. Определят се: относителното увеличение на входното напрежение $a = 0,15$, относителното му намаление – $b = 0,15$ и относителният коефициент на пулсации – $k_p = 0,1$.

2. Изчислява се входното напрежение:

$$U_{i\min} = \frac{U_o + U_{CE\min T15}}{1 - k_p} = \frac{12 + 3}{1 - 0,1} = 16,6 \text{ V};$$

$$U_{i\max} = \frac{U_{i\min}}{1 - b} = \frac{16,6}{1 - 0,15} = 20 \text{ V};$$

$$U_{i\max} = U_i(1 + a) = 20(1,15) = 23 \text{ V}.$$

3. Изчислява се токът на късо съединение:

$$I_{kc} = I_o \left(1 - \frac{U_o}{U_{i\max}} \right) = 0,05 \left(1 - \frac{12}{23} \right) = 24 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

4. Изчислява се съпротивлението на резистора R_{sh} :

$$R_{sh} = \frac{U_{BET16}}{I_{kc}} = \frac{0,6}{24 \cdot 10^{-3}} = 25 \Omega.$$

5. Избира се токът през делителя R_4, R_5 :

$$I_{R4} = I_{R5} = 2 \text{ mA}.$$

6. Изчислява се напрежението върху R_4 :

$$U_{R4} = R_{sh} I_{kp} - 0,6 = 25 \cdot 0,05 - 0,6 = 0,65 \text{ V}.$$

7. Изчислява се съпротивлението на резистора R_4 :

$$R_4 = \frac{U_{R4}}{I_{R4}} = \frac{0,65}{2 \cdot 10^{-3}} = 325 \Omega.$$

Избира се резистор със стандартна стойност 330Ω .

8. Изчислява се съпротивлението на резистора R_5 :

$$R_5 = \frac{U_o}{I_{R5}} - R_4 = \frac{12}{2 \cdot 10^{-3}} - 330 = 5670 \Omega.$$

Избира се резистор със съпротивление $5,6 \text{ k}\Omega$. За точното настройване на прага на защитата може във веригата да се включи тример-потенциометър.

9. Избира се токът през делителя R_2, R_3 :

$$I_{R2} = I_{R3} = 0,5 \text{ mA}.$$

10. Изчислява се съпротивлението на резистора R_3 :

$$R_3 = \frac{U_{et}}{I_{R3}} = \frac{7,14}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 14280 \Omega.$$

Избира се стандартна стойност $14 \text{ k}\Omega$.

11. Изчислява се съпротивлението на резистора R_2 :

$$R_2 = \frac{U_o - U_{et}}{I_{R2}} = \frac{12 - 7,14}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 9720 \Omega.$$

Избира се резистор със стандартна стойност $10 \text{ k}\Omega$.

12. Коефициентът на предаване по напрежение на входния делител е

$$\sigma = \frac{R_3}{R_2 + R_3} = \frac{14}{10 + 14} = 0,583.$$

13. Изчислява се съпротивлението на резистора R_1 :

$$R = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{10 \cdot 14}{10 + 14} = 5,8 \text{ k}\Omega.$$

Избира се стандартна стойност $R_1 = 5,6 \text{ k}\Omega$.

14. Капацитетът на кондензатора C_1 е препоръчен от фирмата-производител на интегралната схема и е

$$C_1 = (100 \div 10000 \text{ pF}).$$

15. Коефициентът на стабилизация е

$$k_{ct} = \frac{U_o}{U_i} \mu_{dy} \sigma = \frac{12}{20} 2000 \cdot 0,583 = 700.$$

16. Вътрешното съпротивление на стабилизатора е

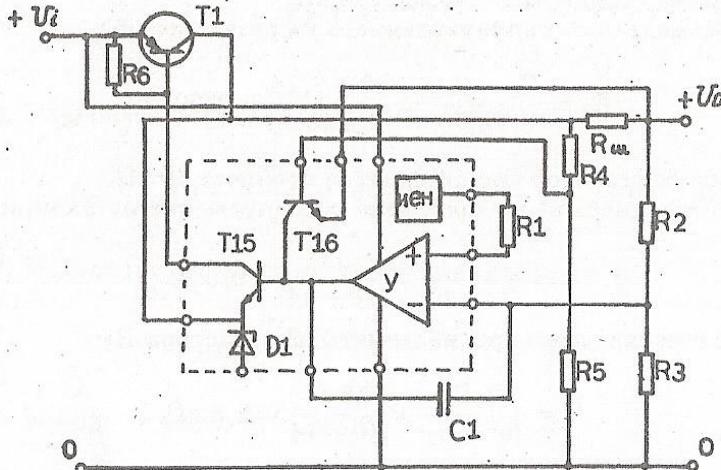
$$r_i = \frac{U_o}{U_i} \cdot \frac{\left(\frac{h_{11E}}{h_{21E}} + R_{sh} \right)}{k_{ct}} = \frac{12}{20} \cdot \frac{\frac{6000}{1000} + 25}{700} = 0,026 \Omega.$$

17. Коефициентът на полезно действие е

$$\eta = \frac{U_o}{U_i} = \frac{12}{20} = 0,6.$$

С това оразмеряването на схемата е завършено. Ако се налага в делителя за обратна връзка може да се включи тример-потенциометър за точна настройка на изходното напрежение.

Ако трябва да се направи стабилизатор на напрежение с по-голям изходен ток, необходимо е да се включи допълнителен транзистор извън интегралната схема, който заедно с вътрешния T_{15} да образува съставен транзистор (вж. глава 5). Една такава схема е показана на фиг. 7.4.



Фиг. 7.4. Стабилизатор на напрежение с увеличен товарен ток

Съпротивленията $R_1 \div R_5$ се изчисляват по същия начин както в примери 7.1 и 7.2. Съпротивлението на резистора R_6 се изчислява по формулата

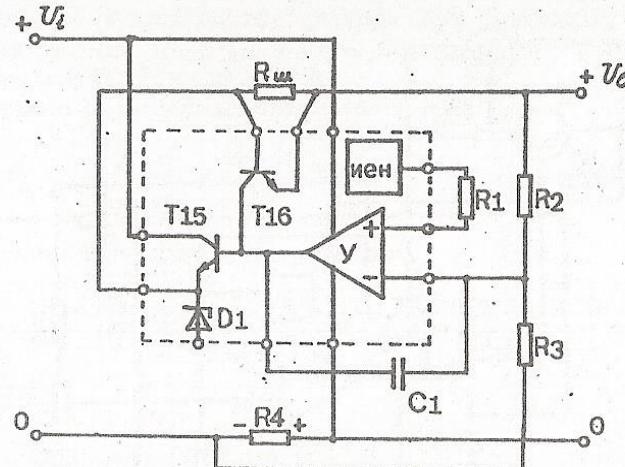
$$(7.4) \quad R_6 \leq \frac{0,3}{I_{CBOT1}},$$

където I_{CBOT1} е обратният колекторен ток на транзистора T_1 .

Най-големият ток, който може да се постигне с тази схема се определя по формулата

$$(7.5) \quad I_o < h_{21E} T_1 \frac{P_{IC\max}}{U_{i\max} - U_o}, \text{ A.}$$

Ако е необходимо, вместо един транзистор T_1 може да се поставят група транзистори (фиг. 5.3 или 5.4), за да се получи необходимият ток. Във всички случаи обаче трябва да се провери дали натоварването на интегралната схема отговаря на допустимата стойност.



Фиг. 7.5. Стабилизатор на напрежение с малко вътрешно съпротивление

На фиг. 7.5 е показан начин за намаляване на вътрешното съпротивление на стабилизатора. Използва се положителна обратна връзка по ток чрез резистора R_4 . Токът на товара създава върху него пад на напрежение с показаната полярност. Това напрежение се сумира с еталонното (ако потенциалът на т. A се приеме за нулев) и предизвиква увеличаване на изходното напрежение, което компенсира падът от вътрешното съпротивление.

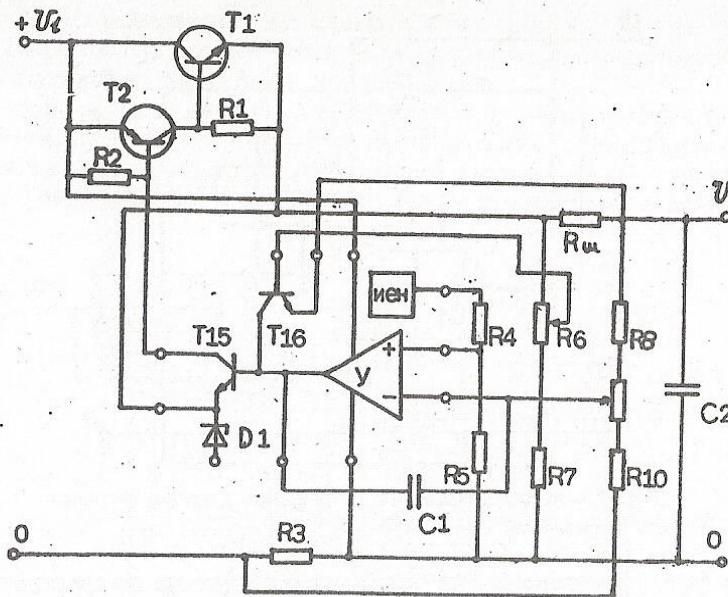
Ако преди компенсацията вътрешното съпротивление на стабилизатора е било R_i , след компенсацията то става

$$(7.6) \quad R'_i = R_i - \left(\frac{1}{\sigma_1} - 1 \right) R_4;$$

където $\sigma_1 = \frac{R_3}{R_2 + R_3}$ е коефициентът на предаване на входния делител на напрежение. Когато $R_i = R_4 \left(\frac{1}{\sigma_1} - 1 \right)$, вътрешното съпротивление на стабилизатора става равно на нула.

Възможен е и случаят, когато $\left(\frac{1}{\sigma_1} - 1 \right) R_4 > R_i$. Тогава вътрешното съпротивление на стабилизатора става отрицателно, т.е. при увеличаване на товарния му ток се увеличава и изходното напрежение.

На фиг. 7.6 е показана схема на стабилизатор на напрежение, реализиран с $\mu A 723$, в която са въведени всички описани дотук подобрения. Оразмеряването на елементите ѝ се извършва по следния начин.



Фиг. 7.6. Схема на стабилизатора от пример 7.3

Пример 7.3. Да се проектира стабилизатор на напрежение, показан на фиг. 7.6 със следните данни: $U_o = 5 \text{ V}$; товарен ток $I_o = 4 \text{ A}$; промяна на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 10\%$; коефициент на пулсации на входното напрежение $k_p = 10\%$; ток на задействане на защитата $I_{kp} = 5 \text{ A}$.

Изчисляване

1. Изчислява се необходимият статичен коефициент на усиливане по ток на регулиращия транзистор за постигане на изходен ток на интегралната схема μA 723 $I_{IC} \leq 10 \text{ mA}$:

$$h_{21\min} = \frac{I_{kp}}{I_{IC}} = \frac{5}{10 \cdot 10^{-3}} = 500.$$

Не съществува единичен мощен транзистор с толкова голям коефициент на усиливане. Затова се налага използването на съставен транзистор, както е показано на фигурата.

2. Избира се типът на транзистора T_1 . Подходящ е 2N3055 със следните данни: $U_{CE\max} = 60 \text{ V}$; $U_{CEsat} = 1,1 \text{ V}$; $h_{21\min} = 15$; $I_{CE\max} = 15 \text{ A}$; $P_{C\max} = 117 \text{ W}$; $R_{tjC} = 1,5^\circ\text{C}/\text{W}$; $t_j\max = 200^\circ\text{C}$; $I_{CBO} = 1 \text{ mA}$.

3. Изчислява се максималният базов ток на T_1 :

$$I_{BT1} = \frac{I_{kp}}{h_{21ET1}} = \frac{5}{15} = 0,333 \text{ A} = 333 \text{ mA.}$$

4. Избира се типът на транзистора T_2 . Подходящ е 2T9136A със следните данни: $U_{CE\max} = 45 \text{ V}$; $U_{CEsat} = 0,7 \text{ V}$; $I_{C\max} = 1 \text{ A}$; $h_{21E} = 50$; $P_{tot} = 8 \text{ W}$; $I_{CBO} = 100 \text{ nA}$.

5. Изчислява се максималният базов ток на T_2 :

$$I_{BT2} = \frac{I_{BT1}}{h_{21ET2}} = \frac{0,333}{50} = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 6,7 \text{ mA.}$$

6. Изчислява се входното напрежение:

$$U_{i\min} = \frac{U_o + 2(U_{CEsatT2} + U_{BET1})}{1 - k_p} = \frac{5 + 2(0,7 + 0,7)}{1 - 0,1} = 9 \text{ V};$$

$$U_i = \frac{U_{i\min}}{1 - b} = \frac{9}{1 - 0,1} = 10 \text{ V};$$

$$U_{i\max} = U_i(1 + a) = 10(1 + 0,1) = 11 \text{ V.}$$

7. Изчислява се токът на късо съединение:

$$I_{kc} = I_o \left(1 - \frac{U_o}{U_{i\max}} \right) = 4 \left(1 - \frac{5}{11} \right) = 2,2 \text{ A.}$$

8. Изчислява се съпротивлението на резистора R_{sh} :

$$R_{sh} = \frac{U_{BET16}}{I_{kc}} = \frac{0,6}{2,2} = 0,273 \Omega.$$

9. Изчислява се мощността, отделена в резистора R_{sh} :

$$P_{Rsh} = I_{kp}^2 R_{sh} = 5^2 \cdot 0,273 = 6,83 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност 8 W.

10. Избира се токът през делителя R_6, R_7 :

$$I_{R6} = I_{R7} = 20 \text{ mA.}$$

11. Изчислява се напрежението върху резистора R_6 :

$$U_{R6} = R_{sh} I_{kp} - 0,6 = 0,273 \cdot 5 - 0,6 = 0,765 \text{ V.}$$

12. Изчислява се съпротивлението на резистора R_6 :

$$R_6 = \frac{U_{R6}}{I_{R6}} = \frac{0,765}{0,02} = 38 \Omega.$$

Избира се тример-потенциометър със съпротивление 47 Ω.

13. Изчислява се съпротивлението на резистора R_7 :

$$R_7 = \frac{U_o}{I_{R7}} - R_6 = \frac{5}{0,02} - 47 = 203 \Omega.$$

Избира се резистор със съпротивление 200 Ω .

14. Избира се токът през делителя R_4, R_5 :

$$I_{R4} = I_{R5} = 1 \text{ mA}.$$

15. Изчислява се съпротивлението на резистора R_5 :

$$R_5 = \frac{0,7U_o}{I_{R5}} = \frac{0,7 \cdot 5}{1 \cdot 10^{-3}} = 3500 \Omega.$$

Избира се резистор със стандартна стойност 3,6 k Ω .

16. Изчислява се съпротивлението на резистора R_4 :

$$R_4 = \frac{U_{\text{ет}}}{I_{R4}} - R_5 = \frac{7}{1 \cdot 10^{-3}} - 3600 = 3400 \Omega.$$

Избира се резистор със стандартна стойност 3,6 k Ω .

17. Изчислява се токът през делителя R_8, R_9, R_{10} :

$$I_1 = \frac{U_o}{U_{\text{ет}}} I_{R4} = \frac{5}{7} \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

18. Изчислява се съпротивлението на резистора R_{10} :

$$R_{10} = \frac{0,8R_5 I_{R5}}{I_1} = \frac{0,8 \cdot 3600 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0,7 \cdot 10^{-3}} = 414 \Omega.$$

Избира се резистор със съпротивление 3,9 k Ω .

19. Изчислява се съпротивлението на резистора R_9 :

$$R_9 = \frac{0,4R_5 I_{R5}}{I_1} = \frac{0,4 \cdot 3600 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0,7 \cdot 10^{-3}} = 2057 \Omega.$$

Избира се тример-потенциометър със съпротивление 2,2 k Ω .

20. Изчислява се съпротивлението на резистора R_8 :

$$R_8 = \frac{U_o}{I_1} - R_9 - R_{10} = \frac{5}{0,7 \cdot 10^{-3}} - 2200 - 3900 = 1044 \Omega.$$

Избира се резистор със стандартна стойност 1,1 k Ω .

21. Изчислява се съпротивлението на резистора R_1 :

$$R_1 \leq \frac{0,5U_{BET1}}{I_{CBOT1}} = \frac{0,5 \cdot 0,6}{1 \cdot 10^{-3}} = 300 \Omega.$$

22. Изчислява се съпротивлението на резистора R_2 :

$$R_2 \leq \frac{0,5 \cdot U_{BET2}}{I_{CBOT2}} = \frac{0,5 \cdot 0,6}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 3000 \Omega.$$

Избира се резистор със съпротивление 1 k Ω .

23. Изчислява се средният коефициент на предаване на входния делител:

$$\sigma = \frac{R_{10} + 0,5R_9}{R_8 + R_9 + R_{10}} = \frac{3900 + 0,5 \cdot 2200}{1100 + 2200 + 3900} = 0,694.$$

24. Изчислява се коефициентът на стабилизация на стабилизатора:

$$k_{ct} = \frac{U_o}{U_i} \mu_{du} \sigma = \frac{5}{10} 2000 \cdot 0,694 = 694.$$

25. Изчислява се вътрешното съпротивление на стабилизатора:

$$R_i = \frac{U_o}{U_i} \frac{\frac{h_{11ET15}}{h_{21E}} + R_{ш}}{k_{ct}} = \frac{5}{10} \frac{\frac{6000}{1000} + 0,273}{694} = 0,0045 \Omega.$$

26. Изчислява се съпротивлението на резистора R_8 :

$$R_8 = \frac{R_i}{\frac{1}{\sigma} - 1} = \frac{0,0045}{\frac{1}{0,694} - 1} = 0,010 \Omega.$$

27. Изчислява се капацитетът на кондензатора C_2 за работна честота $f = 2 \text{ kHz}$:

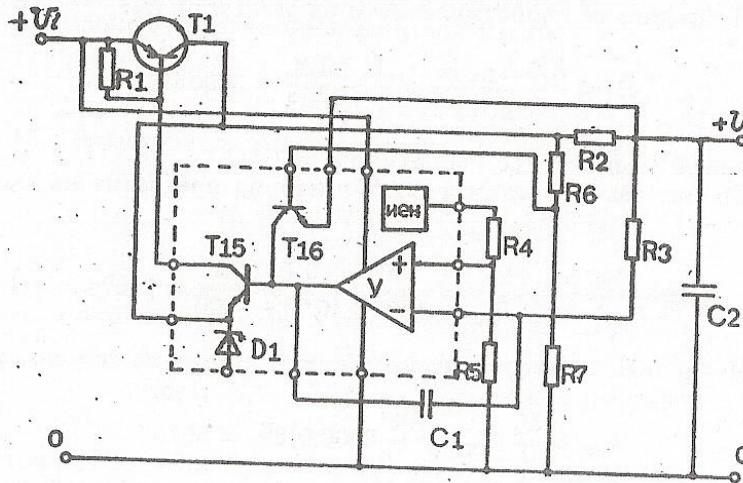
$$C_2 = \frac{I_1}{\omega U_1} = \frac{0,5I_o}{2\pi f \cdot 0,01 U_o} = \frac{0,5 \cdot 5}{2 \cdot 3,14 \cdot 2000 \cdot 0,01 \cdot 5} = 39,8 \cdot 10^{-4} \text{ F}.$$

Избира се кондензатор с капацитет 4700 μF .

28. Кондензаторът C_1 се избира с капацитет $C_1 = 1000 \text{ pF}$.

29. След изчисляването на топлинните загуби в транзисторите и оразмеряването на охлаждащите радиатори проектирането на стабилизатора е завършено.

Когато се проектира стабилизатор за изходно напрежение по-малко от еталонното $U_{et} = 7,1$ V, тогава се налага еталонното напрежение да се приравни към изходното чрез съпротивителен делител. Изходното напрежение в този случай изляло (без намаляване) се подава към диференциалния усилвател. Една такава схема е показана на фиг. 7.7.



Фиг. 7.7. Стабилизатор за напрежение под 7,1 V

Пример 7.4. Да се проектира стабилизатор на напрежение със следните данни: изходно напрежение $U_o = 3$ V; товарен ток $I_o = 0,5$ A; относително изменение на входното напрежение $\Delta U_i = \pm 15\%$; коефициент на пулсации на входното напрежение $k_p = 15\%$; ток на задействане на защитата от претоварване $I_{kp} = 1,3I_o$; ток на късо съединение $I_{kc} < I_{kp}$.

Изчисляване

1. Определя се критичният ток на задействане на защитата:

$$I_{kp} = 1,3I_o = 1,3 \cdot 0,5 = 0,65 \text{ A.}$$

2. Изчислява се необходимият статичен коефициент на усиливане по ток на регулиращия транзистор за постигане на изходен ток на интегралната схема μA 723 $I_{IC} < 10$ mA:

$$h_{21 min} = \frac{I_{kp}}{I_{IC}} = \frac{0,65}{0,01} = 65.$$

3. Избира се типът на транзистора T_1 . Подходящ е 2T9136C със следните данни: $U_{CE max} = 45$ V; $U_{CE sat} = 0,5$ V; $I_{C max} = 1$ A; $h_{21E} = 100 \div 250$; $P_{tot} = 8$ W; $I_{CBO} = 0,1$ mA; $h_{11E} = 50$ Ω.

4. Изчислява се максималният базов ток на T_1 :

$$I_{BT1} = \frac{I_{kp}}{h_{21E} \min} = \frac{0,65}{100} = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 6,5 \text{ mA.}$$

5. Относителното увеличение на входното напрежение е $a = 0,15$, относителното му намаление – $b = 0,15$, а относителният коефициент на пулсации – $k_p = 0,15$.

6. Изчислява се входното напрежение:

$$U_{i min} = \frac{U_o + 3U_{CE sat}}{1 - k_p} = \frac{3 + 3 \cdot 0,5}{1 - 0,15} = 5,3 \text{ V.}$$

Тази стойност на напрежението е по-малка от 8 V и в този случай интегралната схема не би могла да работи. Затова се приема

$$U_{i min} = 8(1 + k_p) = 8(1 + 0,15) = 9,2 \text{ V};$$

$$U_i = \frac{U_{i min}}{1 - b} = \frac{9,2}{1 - 0,15} = 10,8 \text{ V};$$

$$U_{i max} = U_i(1 + a) = 10,8(1 + 0,15) = 12,4 \text{ V.}$$

7. Изчислява се токът на късо съединение:

$$I_{kc} = I_{kp} \left(1 - \frac{U_o}{U_{i max}} \right) = 0,65 \left(1 - \frac{3}{12,4} \right) = 0,49 \text{ A.}$$

8. Изчислява се съпротивлението на резистора R_2 :

$$R_2 = \frac{U_{BET16}}{I_{kc}} = \frac{0,6}{0,49} = 1,22 \Omega.$$

Избира се резистор със стандартна стойност 1,2 Ω.

9. Изчислява се мощността, отделена в резистора R_2 :

$$P_{R2} = I_{kp}^2 R_2 = 0,65^2 \cdot 1,2 = 0,507 \text{ W.}$$

Избира се резистор с мощност 0,5 W.

10. Избира се токът през делителя R_6 , R_7 :

$$I_{R6} = I_{R7} = 10 \text{ mA.}$$

11. Изчислява се напрежението върху резистора R_6 :

$$U_{R6} = R_2 I_{kp} - 0,6 = 1,2 \cdot 0,65 - 0,6 = 0,18 \text{ V.}$$

12. Изчислява се съпротивлението на резистора R_6 :

$$R_6 = \frac{U_{R6}}{I_{R6}} = \frac{0,18}{0,01} = 18 \Omega.$$

Избира се съпротивление със стандартна стойност 18 Ω.

13. Изчислява се съпротивлението на резистора R_7 :

$$R_7 = \frac{U_o}{I_{R7}} - R_6 = \frac{3}{0,01} - 18 = 282 \Omega.$$

Избира се резистор със съпротивление 270 Ω .

14. Избира се токът през делителя R_4, R_5 :

$$I_{R4} = I_{R5} = 1 \text{ mA.}$$

15. Изчислява се съпротивлението на резистора R_5 :

$$R_5 = \frac{U_o}{I_{R5}} = \frac{3}{0,001} = 3000 \Omega.$$

16. Изчислява се съпротивлението на резистора R_4 :

$$R_4 = \frac{U_{\text{ет}}}{I_{R4}} - R_5 = \frac{7,1}{0,001} - 3000 = 4100 \Omega.$$

17. Изчислява се съпротивлението на резистора R_3 :

$$R_3 = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} = \frac{3,4,1}{3+4,1} = 1,73 \text{ k}\Omega.$$

Избира се стандартна стойност 1,6 k Ω .

18. Изчислява се съпротивлението на резистора R_1 :

$$R_1 < \frac{0,5 \cdot U_{\text{БЕТ1}}}{I_{\text{СВОТИ}}} = \frac{0,5 \cdot 0,6}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 3 \cdot 10^3 \Omega = 3 \text{ k}\Omega.$$

19. Изчислява се коефициентът на стабилизация на стабилизатора:

$$k_{\text{ст}} = \frac{U_o}{U_i} \mu_{\text{ду}} \sigma_{\text{оов}} = \frac{3}{10,8} 2000 \cdot 1 = 555.$$

20. Изчислява се вътрешното съпротивление на стабилизатора:

$$R_i = \frac{U_o}{U_i} \frac{\frac{h_{11T15}}{h_{21ET15}} + R_2}{k_{\text{ст}}} = \frac{3}{10,8} \frac{6000}{555} + 1,2 = 0,0036 \Omega.$$

21. Кондензаторът C_1 се избира

$$C_1 = 510 \text{ pF.}$$

22. Кондензаторът C_2 се изчислява от изискванията на консуматора. Тук не са зададени такива, затова изчисляването няма да бъде направено.

23. Изчисляват се максималните топлинни загуби в T_1 :

$$P_{CT1} = U_{i \max} I_{kp} = 12,4 \cdot 0,65 = 8,06 \text{ W.}$$

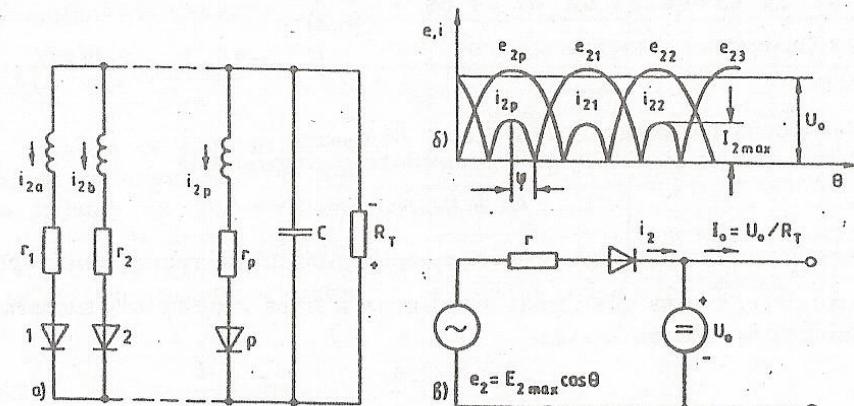
Необходим е охлаждащ радиатор.

8. ПРОЕКТИРАНЕ НА ТОКОИЗПРАВИТЕЛ С КАПАЦИТИВЕН ФИЛТЪР

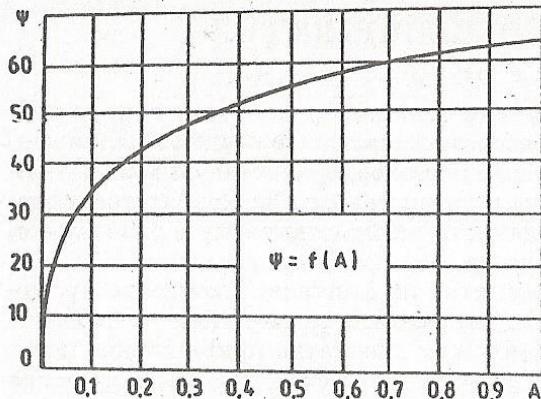
Маломощните токоизправители обикновено се правят едно- и двуфазни и за филтриране на изправеното напрежение се използва кондензатор, свързан паралелно на изхода на токоизправителя. В този случай токоизправителят работи с капацитивен товар. Мрежовият трансформатор е маломощен, съпротивлението на намотките му е значително, затова то не може да се пренебрегне.

При достатъчно голям капацитет на филтровия кондензатор, когато пулсациите на изправеното напрежение са по-малки от 15%, изправеното напрежение и товарният ток с известно приближение могат да се приемат за постоянни. При това всяка фаза на трансформатора и всеки вентил работят самостоятелно и процесите в токоизправителя не зависят качествено от броя на фазите и вида на схемата – еднополупериодна или двуполупериодна. Разликата е само количествена и се отразява на стойностите на някои коефициенти. Затова тук ще бъде показана обобщена методика за проектиране на p -фазен еднополупериоден токоизправител с уговорката, че при мостовите токоизправители броят на фазите p във формулите се удвоюва.

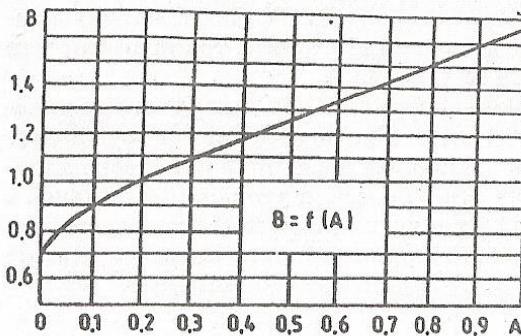
Схемата на един p -фазен еднополупериоден токоизправител с капацитивен товар е показана на фиг. 8.1a. При определяне на основните съотношения между величините на токоизправителя е направено допускането, че понеже индуктивността на трансформатора е много малка в сравнение с активното му съпротивление, влиянието ѝ може да се пренебрегне. По този начин е построена еквивалентната схема на една от фазите (фиг. 8.1c).



Фиг. 8.1. P -фазен еднополупериоден токоизправител с капацитивен товар
a – еквивалентна схема; b – изправен ток и изправено напрежение;
c – еквивалентна схема на една фаза



Фиг. 8.2. Зависимост на ъгъла на отсечка от параметъра A



Фиг. 8.3. Зависимост на параметъра B от параметъра A

За мостов токоизправител $U_{\text{обр}} = E_{2\text{л max}}$.

Ефективната стойност на първичното напрежение е

$$(8.4) \quad E_1 = k_{\text{тр}} E_2,$$

където $k_{\text{тр}} = \frac{E_1}{E_2}$ е коефициента на трансформация на трансформатора.

Амплитудата на тока през вентилите и през вторичната намотка на трансформатора е

$$(8.5) \quad I_{2\text{ max}} = F \frac{I_o}{p},$$

където $F = \frac{\pi(1 - \cos \psi)}{\sin \psi - \psi \cos \psi}$ е функция на ъгъла на отсечката на тока, т.e. и на A . На фиг. 8.4 е показана функцията $F = f(A)$.

Количествено токовете и напреженията в схемата са зависими от ъгъла на отсечка на тока през вентилите ψ , който е свързан с изправеното напрежение и тока на тока и с броя на фазите със зависимостта

$$(8.1) \quad A = \frac{I_o \pi r}{p U_o} = \operatorname{tg} \psi - \psi.$$

Параметърът A е основен за изчисляване на токоизправителя. На фиг. 8.2 е показана функцията $\psi = f(A)$.

Ефективната стойност на вторичното напрежение е

$$(8.2) \quad E_2 = B U_o,$$

$$\text{където } B = \frac{1}{\sqrt{2} \cos \psi}.$$

На фиг. 8.3 е показана функцията $B = f(A)$.

Максималното обратно напрежение върху вентилите е

$$(8.3)$$

$$U_{\text{обр}} = 2E_{2\text{ max}} = 2\sqrt{2} B U_o.$$

Ефективната стойност на тока през една фаза на вторичната намотка на трансформатора е

$$(8.6) \quad I_2 = \frac{I_o}{p} D,$$

където $D = \frac{\sqrt{\pi[\psi(1 + 0,5 \cos 2\psi) - 0,75 \sin 2\psi]}}{\sin \psi - \psi \cos \psi}$ е функция на ъгъла на отсечката на тока, т.e. на A . На фиг. 8.5 е показана функцията $D = f(A)$.

При мостова схема на токоизправител ефективната стойност на тока през вторичната намотка на трансформатора е

$$(8.7) \quad I_2 = \frac{I_o}{p} \sqrt{2} D.$$

Ефективната стойност на първичния ток на трансформатора при еднополупериодните схеми се определя по формулата

$$(8.8) \quad I_1 = \frac{1}{k_{\text{тр}}} \sqrt{I_2^2 \left(\frac{I_o}{p} \right)^2}.$$

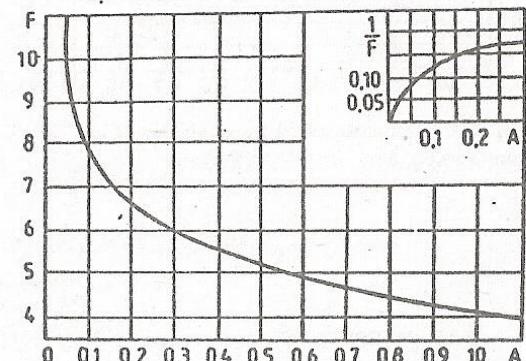
При мостовите и двуполупериодните схеми

$$(8.9) \quad I_1 = \frac{1}{k_{\text{тр}}} I_2.$$

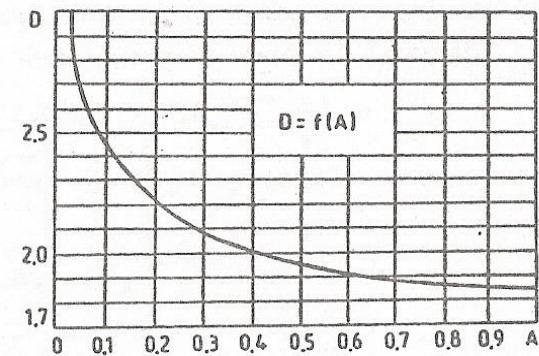
За да се получи желания коефициент на пулсации на изхода на токоизправителя $k_{\text{п}} = \frac{E_{(1)\text{ max}}}{U_o}$, капацитетът на кондензатора трябва да е

$$(8.10) \quad C = \frac{1}{k_{\text{п}} r} H, \mu\text{F},$$

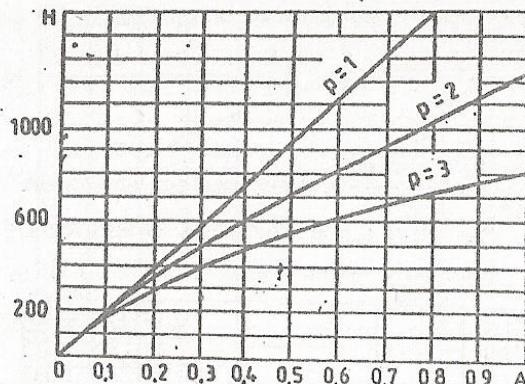
където $H = \frac{10^6 2(\sin p\psi \cos \psi - p \cos p\psi \sin \psi)}{p \omega \pi (p^2 - 1) \cos \psi}$ е функция на ψ т.e. на A .



Фиг. 8.4. Зависимост на параметъра F от параметъра A



Фиг. 8.5. Зависимост на параметъра D от параметъра A



На фиг. 8.6 са показани функциите $H = f(A)$ за различен брой фази на токоизправителя при честота на захранващото напрежение 50 Hz.

Външната характеристика на токоизправител с капацитивен товар може да се изчисли, като се използува зависимостта

$$(8.11) \quad I_o = \frac{pE_{2\max}}{r} \gamma_o,$$

където $\gamma_o = \frac{\sin \psi - \psi \cos \psi}{\pi}$ е функция на ψ . Оттук може да се определи γ_o :

$$(8.12) \quad \gamma_o = I_o \frac{r}{pE_{2\max}}.$$

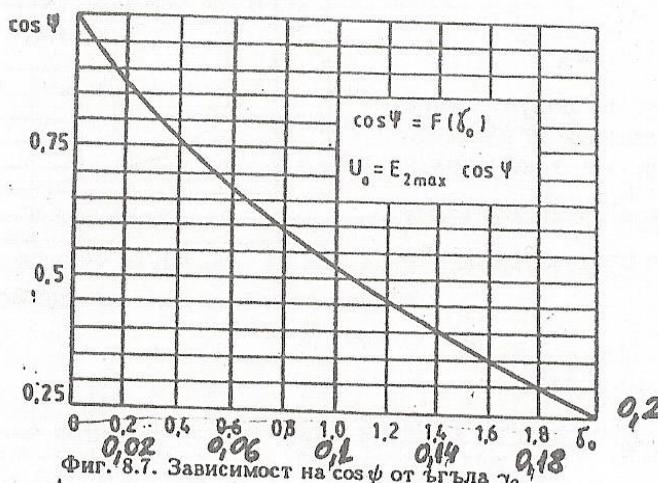
Ако се построи зависимостта $\gamma_o = f(\cos \psi)$, може да се построи и външната характеристика на токоизправителя, тъй като

$$(8.13) \quad \cos \psi = \frac{U_o}{E_{2\max}},$$

следователно

$$(8.14) \quad U_o = E_{2\max} \cos \psi = \sqrt{2} U_2 \cos \psi.$$

На фиг. 8.7 е показана зависимостта $\cos \psi = f(\gamma_o)$.



Пример 8.1. Да се изчисли еднофазен мостов токоизправител с капацитивен характер на товара със следните данни: напрежение върху товара $U_o = 24$ V; ток на товара $I_o = 1$ A; коефициент на пулсации в изхода $k_p < 0,2$; напрежение на захранващата мрежа $U_1 = 220$ V; $f_{mp} = 50$ Hz.

Изчисляване

1. Избира се вътрешното съпротивление на токоизправителя с такава стойност, че да се получи очакван к.п.д. $\eta = 80 \div 90\%$

$$r = \frac{U_o}{I_o} \cdot \frac{1 - \eta}{\eta} = \frac{24}{1} \cdot \frac{1 - 0,85}{0,85} = 4,24 \Omega.$$

2. Изчислява се параметърът A

$$A = \frac{I_o \pi r}{p U_o} = \frac{1,3,14,4,24}{2,24} = 0,277.$$

Тук $p = 2$, защото схемата е двуполупериодна (мостова).

3. От фиг. 8.2 се отчита $\psi = 47^\circ$.

4. От фиг. 8.3 се отчита $B = 1,09$.

5. Изчислява се ефективната стойност на напрежението на вторичната намотка на трансформатора

$$E_2 = BU_o = 1,09 \cdot 24 = 26,2 \text{ V.}$$

6. Изчислява се максималното обратно напрежение върху вентилите (за мостова схема)

$$U_{obp} = E_{2\max} = \sqrt{2} E_2 = \sqrt{2} \cdot 26,2 = 37 \text{ V.}$$

7. Изчислява се коефициентът на трансформация на трансформатора

$$k_{tr} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{220}{26,2} = 8,4.$$

8. От фиг. 8.4 се отчита $F = 6$.

9. Изчислява се амплитудата на тока през вентила и през вторичната намотка на трансформатора

$$I_{2\max} = F \frac{I_o}{p} = 6 \frac{1}{2} = 3 \text{ A.}$$

10. От фиг. 8.5 се отчита $D = 2,1$.

11. Изчислява се ефективната стойност на тока през вторичната намотка на трансформатора

$$I_2 = \sqrt{2} D \frac{I_o}{p} = \sqrt{2} \cdot 2,1 \cdot \frac{1}{2} = 1,48 \text{ A.}$$

12. Изчислява се ефективната стойност на тока през първичната намотка на трансформатора

$$I_1 = \frac{1}{k_{tr}} I_2 = \frac{1}{8,4} 1,48 = 0,176 \text{ A.}$$

13. От фиг. 8.6 се отчита за $p = 2, H = 450$.

14. Изчислява се капацитетът на филтрировия кондензатор

$$C = \frac{1}{k_{nr}} H = \frac{1}{0,24,24} 450 = 531 \mu\text{F.}$$

Избира се стандартна стойност $C = 1000 \mu\text{F}$.

15. Изчисляват се стойностите на γ_o за четири стойности на товарния ток и от фиг. 8.7 се отчитат съответните стойности на $\cos \psi$

$$I_{o1} = 0,25 \text{ A}; \quad \gamma_{o1} = 0,25 \frac{4,24}{2,37} = 0,014; \quad \cos \psi_1 = 0,90$$

$$I_{o2} = 0,50 \text{ A}; \quad \gamma_{o2} = 0,50 \frac{4,24}{2,37} = 0,028; \quad \cos \psi_2 = 0,83$$

$$I_{o3} = 0,75 \text{ A}; \quad \gamma_{o3} = 0,75 \frac{4,24}{2,37} = 0,043; \quad \cos \psi_3 = 0,75$$

$$I_{o4} = 1,00 \text{ A}; \quad \gamma_{o4} = 1 \frac{4,24}{2,37} = 0,057; \quad \cos \psi_4 = 0,65$$

16. Изчислява се външната характеристика на токоизправителя

$$U_{o1} = E_{2 \max} \cos \psi_1 = 37,0 \frac{0,90}{0,98} = 33,9 \text{ V}$$

$$U_{o2} = E_{2 \max} \cos \psi_2 = 37,0 \frac{0,83}{0,97} = 30,7 \text{ V}$$

$$U_{o3} = E_{2 \max} \cos \psi_3 = 37,0 \frac{0,75}{0,96} = 27,8 \text{ V}$$

$$U_{o4} = E_{2 \max} \cos \psi_4 = 37,0 \frac{0,65}{0,95} = 24,2 \text{ V}$$

От тези данни се построява графиката $U_o = f(I_o)$, която е външна характеристика на токоизправителя.

9. МРЕЖОВИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Мрежовият трансформатор изпълнява няколко функции в токозахранващото устройство – разделя галванично мрежата от веригата на изправеното напрежение, трансформира мрежовото напрежение до необходимата за вентилната група стойност и при необходимост променя фазите на захранващата мрежа. По-долу са дадени няколко метода за изчисляване на маломощни мрежови трансформатори за честота 50 Hz.

9.1. АНАЛИТИЧЕН МЕТОД ЗА ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА МРЕЖОВИ ТРАНСФОРМАТОРИ ЗА ТОКОЗАХРАНВАЩИ УСТРОЙСТВА

Съществуват различни методи за изчисляване на трансформаторите. При всички от тях се използват едни и същи изходни данни, а именно:

- първично напрежение на захранващата мрежа U_1 ;
- напрежения на вторичните намотки U_2, U_3, \dots, U_n ;
- токове на вторичните намотки I_2, I_3, \dots, I_n ;
- пълна изчислителна мощност на трансформатора P_i ;
- честота на захранващата мрежа f_{mp} ;
- максимална температура на околната среда t_a^o ;
- допустима температура на нагряване на трансформатора t_1^o .

За мрежови трансформатори с мощност до 2 kVA добра точност при проектирането се получава чрез използването на следния метод.

1. Определя се сечението на магнитопровода

$$(9.1) \quad S_{ct} = k \sqrt{P_i}, \text{ cm}^2.$$

Тук k е коефициент, който приема различни стойности:

$k = 0,98 \div 1,25$ – за еднофазен трансформатор с Ш-образен магнитопровод (броневи) тип;

$k = 0,7$ – за П-образен магнитопровод на еднофазен трансформатор колонен тип, бобинирано само единото бедро;

$k = 0,5$ – за еднофазен трансформатор с П-образен магнитопровод, бобинирани двете бедра;

$k = 0,4$ – за трифазен трансформатор.

С P_i е означена изчислителната мощност на трансформатора във волт-амperi. При многонамотъчните трансформатори това е сумата от мощностите на всички вторични намотки. При трифазните трансформатори P_i е сумата от мощностите на трите фази. Когато трансформаторът захранва токоизправителна схема, P_i е изчислителната мощност, получена при изчисляване на съответната схема на токоизправител и при съответния режим на работа.

Коефициентът k има посочените по-горе стойности при магнитна индукция $B_{max} = 1,2 \text{ T}$. Ако трансформаторът трябва да работи при друга магнитна индукция B_{1max} , коефициентът се преизчислява по

формулата

$$(9.2) \quad k_1 = \frac{1,2}{B_{1\max}} k.$$

2. Определяне на широчината b на магнитопровода. Желателно е магнитопроводът да има квадратна форма на напречното си сечение. Тогава страната на квадрата е

$$(9.3) \quad b_{\max} = \sqrt{S_{ct}}, \text{ см.}$$

Ако не е възможно да се постигне квадратна форма със стандартни размери на ламелите, предпочтата се правоъгълна форма с по-голяма дебелина на пакета от ламели, но непревишаваща 1,5 пъти широчината му. В такъв случай минималната широчина на магнитопровода е

$$(9.4) \quad b_{\min} = \sqrt{\frac{S_{ct}}{1,5}} = 0,85\sqrt{S_{ct}}, \text{ см.}$$

Избира се стандартна широчина b , която е $b_{\min} < b < b_{\max}$.

При изчисляване на размера на магнитопровода трябва да се има предвид дебелината на изолацията между ламелите и оттам сечението на магнитопровода, т.е. дебелината на пакета от ламели трябва да се увеличи с $5 \div 10\%$.

3. Изчислява се броя на навивките. Основната формула, използвана за това, е

$$(9.5) \quad E = 4,44 f w S_{ct} B_{\max}, \text{ V.}$$

При $f = 50 \text{ Hz}$

$$(9.6) \quad w = 45 \frac{E}{S_{ct} B_{\max}}.$$

За компенсиране на пада на напрежението в намотките обикновено навивките на вторичната намотка се увеличават с $5 \div 10\%$.

4. Изчислява се тока в намотките. Токът през i -тата намотка, ако не е зададен предварително, е

$$(9.7) \quad I_i = \frac{P_i}{U_i}, \text{ A}$$

Поради наличие на загуби в трансформатора токът през първичната намотка се увеличава с $5 \div 10\%$.

5. Изчислява се диаметърът на проводниците без изолацията. Диаметърът d на проводника зависи от ефективната стойност на тока I и от неговата плътност j

$$(9.8) \quad d = 1,13 \sqrt{\frac{I}{j}}, \text{ mm.}$$

където I е ефективната стойност на тока, A;

j – плътността на тока, A/mm^2 ;

d – диаметърът на проводника, mm.

Плътността на тока се избира. Тя може да варира в широки граници – от 1 до 6 A/mm^2 . Тя зависи от мощността на трансформатора, от неговите размери, начина на охлаждане, допустимото прегряване и пр. За малки трансформатори до 100 W , изработени от стандартни пакети ламели, за средна плътност на тока се препоръчва $2,5 \text{ A/mm}^2$. След като се изчисли диаметърът на проводника, се избира най-близката стандартна стойност. След това се изчислява действителната плътност на тока. Това се прави за всяка намотка поотделно по формулата

$$(9.9) \quad j_i = j \frac{d_{\text{изчислено}}^2}{d_{\text{избрано}}^2}, \text{ A/mm}^2.$$

6. Изчислява се коефициента на запълване на прозореца на магнитопровода. Коефициентът на запълване е

$$(9.10) \quad k_3 = \frac{S_m}{S_{\text{проз}}},$$

където $S_{\text{проз}}$ е площта на прозореца, mm^2 ;

S_m – сечението на проводниците на намотките, mm^2 .

То се изчислява по формулата

$$(9.11) \quad S_m = \frac{\pi}{4} (w_1 d_1^2 + w_2 d_2^2 + \dots + w_n d_n^2), \text{ mm}^2.$$

където w_1, w_2, \dots, w_n са броят на навивките на съответните намотки; d_1, d_2, \dots, d_n – диаметрите на проводниците на съответните намотки, mm.

За намотка от кръгъл проводник с емайлова изолация коефициентът на запълване има максимална стойност $k_3 = 0,3 \div 0,35$.

7. Изчислява се масата на употребената мед и загубите в нея. За i -тата намотка масата на медта е

$$(9.12) \quad G_{mi} = 10^{-5} \gamma_m l_{cp} w_i q_i, \text{ kg} \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

където $\gamma_m = 8,9 \text{ g/cm}^3$ е плътността на медта;

l_{cp} – средната дължина на една навивка;

w_i – броят на навивките на i -тата намотка;

q_i – сечението на проводника, mm^2 .

Загубите в медта при средна работна температура 75°C се изчисляват по формулата

$$(9.13) \quad P_m = 2,4 \sum_{i=1}^n j_i^2 G_{mi}, \text{ W.}$$

8. Изчисляват се загубите в магнитопровода. Използва се формулата

$$(9.14) \quad P_{ct} = p_{ct} B_{max}^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_{ct}, \text{ W.}$$

където p_{ct} са специфичните загуби на феромагнитния материал при честота 50 Hz и магнитна индукция $B_{max} = 1 \text{ T}$ (за най-често употребяваните електротехнически стомани p_{ct} е в границите $1 \div 5 \text{ W/kg}$);

B_{max} – максималната магнитна индукция, T;

f – работната честота на трансформатора, Hz;

G_{ct} – масата на магнитопровода, kg.

Масата на магнитопровода се изчислява по формулата

$$(9.15) \quad G_{ct} = 10^{-3} \gamma_{ct} V_{ct}, \text{ kg,}$$

където $\gamma_{ct} = 7,8 \text{ g/cm}^3$ е плътността на стоманата;

V_{ct} – обемът на стоманения магнитопровод, cm^3 .

Обемът на магнитопровода се отчита от таблици или се изчислява от геометричните му размери.

9. Изчислява се коефициентът на полезно действие на трансформатора

$$(9.16) \quad \eta = \frac{P_u}{P_u + P_m + P_{ct}}.$$

10. Изчислява се прегряването на трансформатора. Температурата до която се нагрява повърхността на трансформатора, е

$$(9.17) \quad t_a^o = t_a^o + \frac{P_m + P_{ct}}{\alpha_t S_{okl}}, \text{ } ^\circ\text{C,}$$

където t_a^o е температурата на околната среда;

$\alpha_t = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ – коефициентът на топлоотдаване;

S_{okl} – охлаждащата повърхност на целия трансформатор (изчислява се от геометричните му размери).

Температурата на най-нагрятата точка на трансформатора превишава температурата на повърхността му с $10 \div 15 \text{ } ^\circ\text{C}$ и това трябва да се има предвид.

Пример 9.1. Да се изчисли еднофазен двунамотъчен трансформатор със следните данни: напрежение на захранващата мрежа $U_1 = 220 \text{ V}$, вторично напрежение $U_2 = 18 \text{ V}$, вторичен ток $I_2 = 3 \text{ A}$, характер на товара – активен, честота на захранващата мрежа $f = 50 \text{ Hz}$, температура на околната среда $45 \text{ } ^\circ\text{C}$, допустима температура на прегряване на трансформатора $\Delta t^o = 55 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Изчисляване

1. Изчислителната мощност на трансформатора е

$$P_u = U_2 I_2 = 18.3 = 54 \text{ W.}$$

2. Избира се Ш-образен магнитопровод (броневи тип).

3. Избира се максимална магнитна индукция $B_{max} = 1,2 \text{ T}$.

4. Определя се сечението на магнитопровода (9.1)

$$S_{ct} = \sqrt{P_u} = \sqrt{54} = 7,35 \text{ cm}^2.$$

5. Изчисляват се максималната и минималната широчина на ламелите на магнитопровода (9.3), (9.4)

$$b_{max} = \sqrt{S_{ct}} = \sqrt{7,35} = 2,71 \text{ cm;}$$

$$b_{min} = \sqrt{\frac{S_{ct}}{1,5}} = \sqrt{\frac{7,35}{1,5}} = 2,21 \text{ cm.}$$

6. Избира се подходящ стандартен пакет ламели. В случая това е LM24 x 36 с широчина на ламелата $y = 24 \text{ mm}$ (средна между b_{max} и b_{min}) и сечение на пакета $S_{ct} = 7,61 \text{ cm}^2$. Изчисленията се провеждат за това сечение.

7. Изчислява се броят на навивките (9.6):

a) за първичната намотка

$$w_1 = 45 \frac{U_1}{S_{ct} B_{max}} = 45 \frac{220}{7,61 \cdot 1,2} = 1084 \text{ nav;}$$

б) за вторичната намотка

$$w'_2 = 45 \frac{U_2}{S_{ct} B_{max}} = 45 \frac{18}{7,61 \cdot 1,2} = 89 \text{ nav.}$$

За компенсиране на пада на напрежението в трансформатора навивките на вторичната намотка се увеличават с 10%

$$w_2 = 1,1 w'_2 = 1,1 \cdot 89 = 98 \text{ nav.}$$

8. Изчислява се токът през първичната намотка (9.7)

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{1,1 \cdot P_u}{U_1} = \frac{1,1 \cdot 54}{220} = 0,27 \text{ A.}$$

Тук мощността на първичната намотака е увеличена с 10% спрямо изчислителната мощност на трансформатора поради наличието на загуби в него.

9. Токът през вторичната намотка е зададен и не се изчислява.

$$I_2 = 3 \text{ A.}$$

10. Изчислява се диаметърът на проводниците без изолация при избрана плътност на тока $j'_1 = j'_2 = 2,5 \text{ A/mm}^2$.

a) за първичната намотка

$$d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{I_1}{j'_1}} = 1,13 \sqrt{\frac{0,27}{2,5}} = 0,37 \text{ mm.}$$

От таблица се избира най-близкият стандартен диаметър $d_1 = 0,38 \text{ mm.}$

Действителната плътност на тока през първичната намотка е (9.9)

$$j_1 = j'_1 \frac{d_{\text{изчислено}}^2}{d_{\text{избрано}}^2} = 2,5 \frac{0,37^2}{0,38^2} = 2,36 \text{ A/mm}^2.$$

b) за вторичната намотка

$$d_2 = 1,13 \sqrt{\frac{I_2}{j'_2}} = 1,13 \sqrt{\frac{3}{2,5}} = 1,24 \text{ mm.}$$

Избира се проводник с диаметър $d_2 = 1,25 \text{ mm.}$ Действителната плътност на тока през вторичната намотка е

$$j_2 = j'_2 \frac{d_{\text{изчислено}}^2}{d_{\text{избрано}}^2} = 2,5 \frac{1,24^2}{1,25^2} = 2,45 \text{ A/mm}^2.$$

11. Изчислява се общото сечение на проводниците в намотките (9.11)

$$S_m = \frac{\pi}{4} (w_1 d_1^2 + w_2 d_2^2) = \frac{3,14}{4} (1084 \cdot 0,38^2 + 98 \cdot 1,25^2) = 243 \text{ mm}^2.$$

12. Изчислява се коефициентът на запълване на прозореца на магнитопровода (9.10)

$$k_3 = \frac{S_m}{S_{\text{проз}}} = \frac{243}{36 \cdot 12} = 0,56.$$

Тази стойност е недопустимо голяма и означава, че практически е невъзможно проводниците да се съберат в прозореца на избрания магнитопровод. Затова се избира следващия по-голям размер пакет с приблизително същото сечение. В случая това е Ш30×30 с $S_{\text{ст}} = 7,92 \text{ cm}^2$.

Изчисленията по т. 7, 11 и 12 се повтарят с новите данни

$$7. w_1 = \frac{45,220}{7,95 \cdot 1,2} = 1042 \text{ нав;}$$

$$w'_2 = \frac{45,18}{7,92 \cdot 1,2} = 85 \text{ нав;}$$

$$w_2 = 1,185 = 94 \text{ нав.}$$

$$11. S_m = \frac{3,14}{4} (1042 \cdot 0,38 + 94 \cdot 1,25) = 234 \text{ mm}^2.$$

$$12. k_3 = \frac{S_m}{S_{\text{проз}}} = \frac{234}{45,15} = 0,35.$$

Тази стойност на коефициента на запълване е допустима.

13. Изчислява се масата на медта в трансформатора (9.12)

$$G_{m1} = 10^{-5} \gamma_m l_{cp1} w_1 q_1 = 10^{-5} \cdot 8,915 \cdot 1042 \cdot 0,1134 = 0,158 \text{ kg;}$$

$$G_{m2} = 10^{-5} \gamma_m l_{cp2} w_2 q_2 = 10^{-5} \cdot 8,921 \cdot 94 \cdot 1,227 = 0,216 \text{ kg.}$$

14. Изчисляват се загубите в медта (9.13)

$$P_m = 2,4 (j_1^2 G_{m1} + j_2^2 G_{m2}) = 2,4 (2,37^2 \cdot 0,158 + 2,46^2 \cdot 0,216) = 5,26 \text{ W.}$$

15. Изчислява се масата на магнитопровода (9.15)

$$G_{ct} = 10^{-3} \gamma_{ct} V_{ct} = 10^{-3} \cdot 7,8162 = 1,26 \text{ kg.}$$

16. Изчисляват се загубите в магнитопровода (9.14)

$$P_{ct} = p_{ct} B_{\max}^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_{ct} = 2,1 \cdot 2^2 \cdot 1^{1,3} \cdot 1,26 = 3,63 \text{ W.}$$

17. Изчислява се коефициентът на полезно действие на трансформатора (9.16)

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + P_m + P_{ct}} = \frac{54}{54 + 5,26 + 3,63} = 0,86.$$

18. Изчислява се температурата на повърхността на трансформатора (9.17)

$$t^\circ = t_a + \frac{P_m + P_{ct}}{\alpha_t S_{\text{окл}}} = 45 + \frac{5,26 + 3,63}{1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 360} = 71,3 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Прегряването на повърхността на трансформатора е $26,3 \text{ }^\circ\text{C.}$ Най-нагрятата точка в дълбочина ще има температура на прегряване $\Delta t^\circ = 26,3 + 15 = 41,3 \text{ }^\circ\text{C}$ – по-малко от зададената допустима стойност $55 \text{ }^\circ\text{C.}$

9.2. ПРИБЛИЗИТЕЛНО (СЪКРАТЕНО) ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА МАЛОМОЩЕН ТРАНСФОРМАТОР

При еднофазни трансформатори с мощност до 50 VA, изчисленията могат да се извършват по опростен метод, когато се проектира единична бройка трансформатор за неотговорен случай. При приета максимална стойност на магнитната индукция $B_{max} = 1$ T се определят:

- сечението на магнитопровода

$$(9.18) \quad S_{ct} = \sqrt{P_u}, \text{ cm}^2;$$

— броят на навивките на намотките

$$(9.19) \quad w_1 = 48 \frac{U_1}{S_{ct}};$$

$$(9.20) \quad w_2 = 52 \frac{U_2}{S_{ct}};$$

— диаметрите на проводниците

$$(9.21) \quad d = 0,7\sqrt{I}, \text{ mm.}$$

Коефициентът на запълване на прозореца на магнитопровода и прегръдането на трансформатора не се изчисляват.

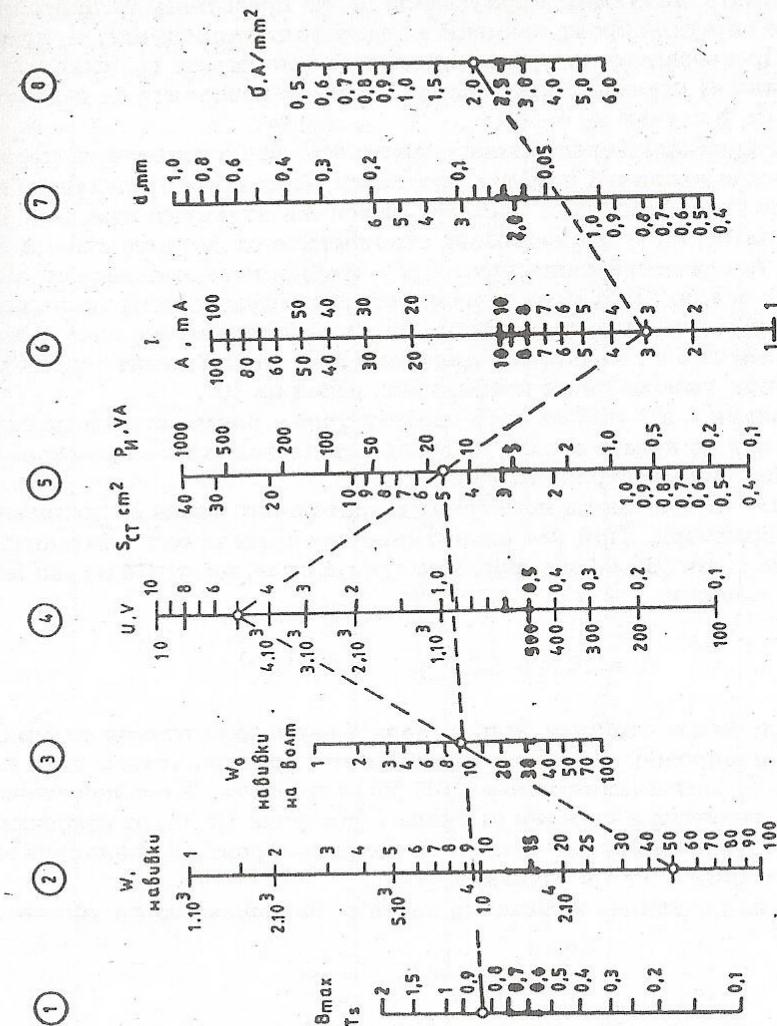
Изчисляване на трансформатор по номограми. За предварително изчисляване на маломощни трансформатори или за единични неотговорни случаи могат да се използват номограми. Те са построени на базата на опростените методи за изчисление и дават приблизителни резултати със задоволителна точност.

На фиг. 9.1 е дадена номограма, която важи за следните изходни данни: $f = 50$ Hz, сечение на магнитопровода $S_{ct} = 1,25\sqrt{P}$, навивки на волт $w_o = \frac{36}{B_{max} P_u}$ и диаметър на проводниците $d = 1,13\sqrt{\frac{I}{j}}$, mm. Ползването на номограмата за изчисляване на маломощен трансформатор е илюстрирано с пример, показан с щрихова линия на фигурата и описан по-долу.

Пример 9.2. Да се изчисли трансформатор с вторично напрежение $U_2 = 5$ V и ток $I_2 = 3$ A.

Изчисляване

Избира се плътността на тока във вторичната намотка върху скала 8 ($2,0 \text{ A/mm}^2$). Тази точка се съединява посредством права линия с точката, съответстваща на стойността на тока I_2 (3 A) върху скала 6. Върху скала 7, на пресечната точка с тази линия, се отчита диаметърът на проводника, в случая 1,5 mm. Лявата страна на скала 7 се използва за стойностите на токовете от лявата страна на скала 6 (в ампера). Дясната страна на скала 7 се използва за стойностите на токовете от дясната страна на скала 6 (в милиампера).



Фиг. 9.1. Номограма за изчисляване на трансформатори

След определяне на тока във вторичната намотка, съединява се точката, съответстваща на стойността на тока I_2 (скала 6), с точката, отговаряща на напрежението U_2 (скала 4). Пресечната точка на тази линия със скала 5 определя мощността на трансформатора и сечението на магнитопровода, в случая $P_u = 15$ VA и $S_{ct} = 5 \text{ cm}^2$. Като се прекара права линия между пресечната точка от скала 5 и избраната стойност

на магнитната индукция върху скала 1, от пресечната ѝ точка със скала 3 се определя броят на навивки на един волт напрежение, в случая $w_o = 10$. Прекарването на права линия през точките на w_o (скала 3) и на U_2 (скала 4) показва върху скала 2 броя на навивките за даденото напрежение, в случая $w_2 = 50$.

Ако трансформаторът е многонамотъчен, изчисленията се провеждат за всяка вторична намотка поотделно, като при определянето на P и S_{ct} се взема сумарната мощност от всички вторични намотки. За напрежения до 100 V се използват стойностите от дясните страни на скали 2 и 4, а за напрежения над 100 V – стойностите от левите страни на същите скали. Тъй като зависимостите са правопропорционални, дясните страни на същите скали могат да се умножават с общ мащабен коефициент 10^n , където n е цяло число. В случая левите скали са получени при умножаване с коефициент, равен на 10^3 .

При скали 6 и 7 има същото съответствие – лявата страна на скала 6 отговаря на лявата страна на скала 7, а дясната страна на скала 6 отговаря на дясната страна на скала 7.

На фиг. 9.2 е показана номограма за още по-опростено изчисляване на трансформатори. При нея аналитично се определя изчислителната мощност на трансформатора, равна на сумата от мощностите на всички вторични намотки:

$$(9.22) \quad P_i = U'_2 I'_2 + U''_2 I''_2 + \dots + U^{(n)}_2 I^{(n)}_2.$$

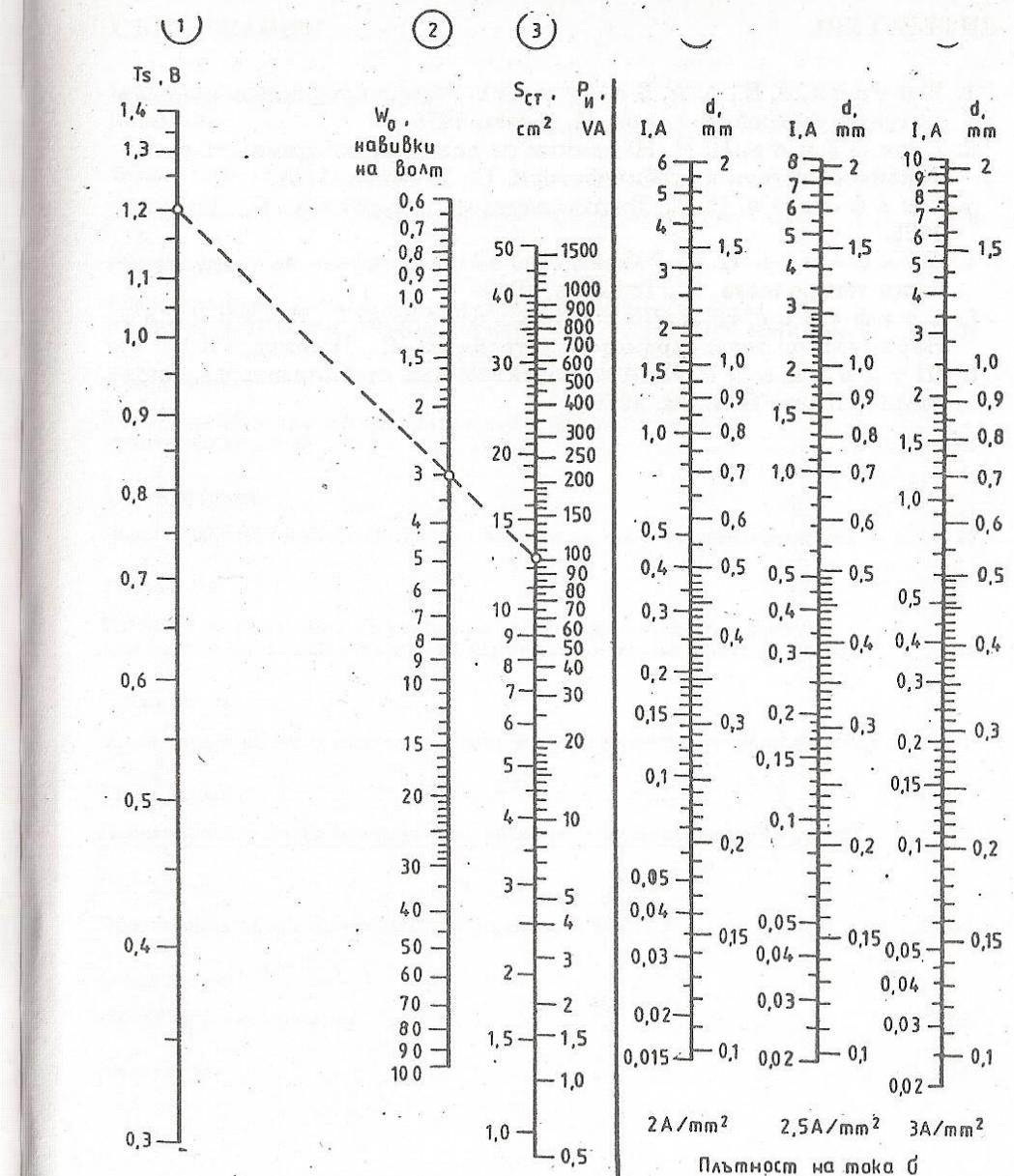
От получената стойност върху скала 3 направо се отчита сечението на магнитопровода S_{ct} . Като се съедини с права линия точката на мощността (в разгледания пример 100 VA) с точката на стойността на избраната магнитна индукция от скала 1 (в случая 1,2 T), от пресечната точка на тази линия със скала 2 се получава броят на навивките за напрежение един волт – в случая $w_o = 3$.

Броят на навивките за всяка намотка се изчислява по формулата

$$(9.23) \quad w_n = w_o U_n.$$

Диаметърът на проводника за дадена намотка се отчита направо от скали 4, 5 или 6 в зависимост от избраната плътност на тока. Не се проверява коефициентът на запълване на прозореца на магнитопровода.

Изчисляването на трансформатори по номограми е бързо, лесно и просто, но с малка точност (приближително). Затова този метод се използва за предварително, ориентировъчно изчисляване или за изчисляване при ремонт на изгорял трансформатор. Във всички други случаи се използват по-точните аналитични методи, което може да бъде улеснено с помощта на компютър.



Фиг. 9.2. Опростена номограма за изчисляване на трансформатори

ЛИТЕРАТУРА

1. Китаев, В. Е., А. А. Бокуяев. Расчет источников электропитания устройств связи. М., Связь, 1975.
2. Степанов, Н. Й. Наръчник по електронни схеми. Част II – токоизправители и стабилизатори. С., Техника, 1981.
3. Степанов, Н. Й. Токозахраниващи устройства. С., Техника, 1985.
4. Степанов, Н. Й. Ръководство за проектиране на токозахраниващи устройства. С., Техника, 1985.
5. Степанов, Н. Й., Т. Б. Атанасов, А. Г. Маноилов. Наръчник по токозахраниващи устройства. С., Техника, 1992.
6. Штильман, В. И. Микроэлектронные стабилизаторы напряжения. Киев, Техника, 1976.

СЪДЪРЖАНИЕ

Предговор	3
Въведение	4
Глава първа	
Проектиране на параметрични стабилизатори на напрежение	6
Глава втора	
Общи принципи за проектиране на токозахраниващи устройства с компенсационни стабилизатори на напрежение от последователен тип	37
Глава трета	
Проектиране на охлаждящия радиатор на мощни транзистори и интегрални схеми	39
Глава четвърта	
Зашита на стабилизаторите от претоварване по ток и от пренапрежение	43
Глава пета	
Избиране на режима на регулация транзистор в последователните компенсационни стабилизатори на напрежение с непрекъснато действие	58
Глава шеста	
Проектиране на стабилизатори на напрежение с интегрална схема $\mu\text{A } 70XX$	71
Глава седма	
Проектиране на стабилизатори на напрежение с интегрална схема $\mu\text{A } 723$	83
Глава осма	
Проектиране на токоизправител с калацитивен филтър	99
Глава девета	
Мрежови трансформатори	105
Литература	116