

*Иван*

ОБРАТНИ КОМПЪН

ВРЪЗКИ

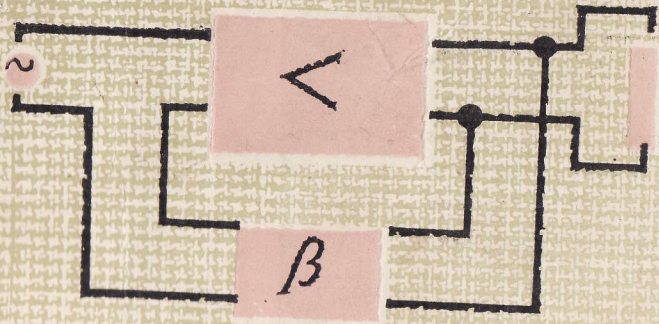
В

УСИЛВАТЕЛИТЕ

В. ВЪЛЧАНОВ И КРЪСТАНОВ

62-24

БИБЛИОТЕКА НА  
ЕЛЕКТРОМОНТБОРА



ТЕХНИКА



КНИЖКА 4  
ДЯЛ ІБ

БИБЛИОТЕКА  
НА ЕЛЕКТРОМОНТЪОРА

И. КРЪСТАНОВ

В. ВЪЛЧАНОВ

# ОБРАТНИ ВРЪЗКИ В УСИЛВАТЕЛИТЕ

ДЪРЖАВНО ИЗДАТЕЛСТВО „ТЕХНИКА“  
СОФИЯ \* 1962



В книгата са разгледани подробно обратните връзки в нискочестотните и високочестотните усилватели. Значително място е отделено на влиянието на различните видове обратни връзки върху параметрите на усилвателите. Разгледани са някои съвременни схеми на вериги с обратна връзка. Накрая са дадени практически указания за ремонт на усилвателите с обратна връзка.

Книжката ще бъде ценно помагало за радиотехниците, радиолюбителите и радиомонтьорите, които се занимават с конструиране, монтаж и поправка на радиоприемници, телевизори, магнитофони, киноусилватели и усилвателни уредби.

## СЪДЪРЖАНИЕ

### 1

#### Общи сведения

1. Условия за висококачествено възпроизвеждане на звука . . . 7
2. Обратни връзки — определения . . . . . 14
3. Коефициент на усилване на усилвател с обратна връзка . 18

### 2

#### Влияние на обратната връзка върху параметрите на усилвателя

1. Честотни характеристики . . . . . 24
2. Регулиране на честотните характеристики с помощта на обратната връзка . . . . . 37
3. Нелинейни изкривявания . . . . . 40
4. Вътрешни шумове . . . . . 47
5. Товарна характеристика . . . . . 52
6. Стабилност на коефициента на усилване . . . . . 60
7. Входно съпротивление . . . . . 62

### 3

#### Самовъзбуждане на радиоприемните и усилвателните устройства

1. Самовъзбуждане вследствие паразитни обратни връзки . . 66
2. Самовъзбуждане на усилвател с отрицателна обратна връзка . . . . . 78

### 4

#### Практически схеми на обратната връзка

1. Обратна връзка чрез катодното съпротивление . . . . . 82
2. Катоден усилвател (повторител) . . . . . 86

3. Фазообръщащо стъпало с разделен товар . . . . .	91
4. Фазообръщащо стъпало с катодна връзка . . . . .	94
5. Усилвател с ултралинейна обратна връзка . . . . .	96

## 5

### Проектиране на усилвател с обратна връзка

1. Изисквания към обратната връзка и тяхното формулиране . . . . .	101
2. Избор на обратната връзка . . . . .	108
3. Изчисление елементите на веригите на обратната връзка . . . . .	116
4. Проверка на влиянието на избраната обратна връзка . . . . .	116
5. Примери за проектиране на усилватели с обратна връзка . . . . .	119

## 6

### Практически указания за ремонта на устройствата с обратна връзка

1. Общи сведения . . . . .	135
2. Проучване действието на схемата. Измервателна апаратура . . . . .	137
3. Ограничаване и премахване на самовъзбуждането . . . . .	141

### Приложения

1. Принципно схема на нискочестотните стъпала на приемник „Среден супер“
2. Принципно схема на нискочестотните стъпала на радиоприемника „Симфония“
3. Принципно схема на нискочестотните стъпала на радиоприемника „Концерт“
4. Принципно схема на предусилвателя от транслационната усилвателна уредба 50 вата, ТУУ-50

## ОБЩИ СВЕДЕНИЯ

### 1. Условия за висококачествено възпроизвеждане на звука

През последните години радиотехниката постигна значителни успехи в усъвършенствването на радиоприемните и усилвателните устройства.

Това са на първо място редицата подобрения и нововъведения, като честотната модулация на УКВ обхват, стереофоничният запис и възпроизвеждане, променливата избирателност, насоченото приемане чрез феритна антена и др. Те доведоха до ограничаване на смущенията, разширяване на честотната лента, стабилизиране на приемането и предаването. Създадох се предпоставки за решително подобряване на нискочестотната и звуковъзпроизвеждащата част на радиоприемните устройства и нискочестотните усилватели. Отнася се най-вече до подобряване на схемата чрез използване на регулатори, които дават възможност за регулиране силата на звука, при което се държи сметка за физиологичните особености на ухото, до най-сполучливо акустическо оразмеряване, като се използват възможностите на псевдостереофонията и стереофонията.

Разглеждането на материала в настоящата книжка ще се ограничи върху нискочестотната част на радиоприемните устройства, нискочестотните усилватели на магнитофоните и другите възпроизвеждащи устройства, както и нискочестотните усилватели за кинематография и жична радиофикация. Поради голя-



мото сходство в различните изброени дотук устройства по отношение на нискочестотните им схеми те ще бъдат наричани общо нискочестотни усилватели.

Преди да се дефинират понятието висококачествено възпроизвеждане и показателите, които го обуславят, ще се разгледат условията на непосредственото слушане и слушането на програма, възпроизведена от нискочестотните усилватели.

*Слушане от оригинал и от възпроизвеждащ нискочестотен усилвател*

Непосредственото слушане (слушането от оригинал) става обикновено в зали с добра акустика и изолация от външни шумове. Но даже и при тези условия не може да се каже, че на всеки слушател, намиращ се в различни точки на залата, може да се осигури еднаква звукова картина. Още по-трудно е да се даде на слушателя същата звукова картина при различните домашни условия, при които той слуша музикалната програма чрез възпроизвеждащия нискочестотен усилвател.

Тези условия се заключават главно в следното.

Помещението (стаята), в което става възпроизвеждането, е винаги различно от това, в което става изпълнението в оригинал.

Липса на обемност на звука. При слушането от оригинал възприятието се получава от определен брой разположени в залата звукови източници (оркестър, хор и др.), докато при възпроизвеждане възприятието се получава най-често от един високоговорител.

Динамичният обхват на звуковата картина при възпроизвеждане винаги е по-малък от този на оригинала. Това се дължи на значителните шумове и ограниченото (при домашни условия) ниво на възпроизвеждане. Дължи се и на ограничените възможности на техниката да се строят усилватели с голяма динамика.

Твърде често се възпроизвежда звукова картина, зафиксирана посредством магнитен, механичен, светлинен или друг запис, при което съществуват редица отклонения от оригинала, дължащи се на техниката на записа.

Наред с изброените различия в условията на слушането трябва да се споменат и тези, свързани с особеностите на човешкото ухо. Те се обуславят преди всичко от различната чувствителност на човешкото ухо при ниските и високите честоти (тонове) в сравнение със средните честоти и в зависимост от силата на звука. Към това се прибавят и различията в слуховите органи на отделните хора. При това качествата на слуховите органи на даден човек се менят с възрастта.

Нелинейните изкривявания не съществуват при слушането от оригинал, но са решаващ фактор за качествено възпроизвеждане. Ето защо необходимо е възпроизвеждащото устройство да внася колкото е възможно по-малко нелинейни изкривявания.

Трябва да се отбележат и различните вкусове и музикална култура на слушателите.

Имайки пред вид казаното дотук, висококачественото възпроизвеждане може да се дефинира като възпроизвеждане от устройство (нискочестотен усилвател, радиоприемник, магнитофон, телевизор и др.), чиято честотна характеристика може да се изменя така, че слушателите да получават впечатление за



максимална естественост. При това звуковата картина трябва да бъде максимално обемна с максимален динамичен обхват, с минимално ниво на шумовете и минимални нелинейни изкривявания.

В това определение ударението е поставено на честотната характеристика, която търпи най-големи промени в условията на възпроизвеждането. При това нивото на шумовете и нелинейните изкривявания са от голямо значение.

### *Характеристики на нискочестотния усилвател*

а) *Честотна характеристика.* Честотната характеристика на даден нискочестотен усилвател представлява графично изобразената зависимост на изходното напрежение от звуковата честота, когато на входа на усилвателя се подава напрежение с постоянна амплитуда.

От определението за висококачествено възпроизвеждане следва, че една единствена честотна характеристика няма да може да удовлетвори изискванията на различните слушатели. Поради това в нискочестотния усилвател трябва да се предвидят възможности за регулиране на честотната му характеристика в най-широки граници. По такъв начин всеки слушател на радиопрограма ще може да подбере такава честотна характеристика, която да му създаде впечатление за максимално висококачествено възпроизвеждане (възприятие).

б) *Нелинейни изкривявания.* Това са изкривяванията на звуковата картина на нискочестотния усилвател. Нелинейни изкривявания имаме, когато на входа на усилвателя се появят напрежения, чиито

честоти се различават от честотата на входното напрежение. Следователно те са нежелателни и стремежът е да се намалят до минимум.

Както е известно, причина за нелинейните изкривявания е нелинейността на характеристиките на радиолампите, транзисторите, трансформаторите, дроселите и високоговорителите.

Тази нелинейност довежда до различни изкривявания в зависимост от това, дали на усилвателя се подава чист тон или група от тонове. Оттук са и определенията за изкривявания на чист тон, наречени нелинейни изкривявания (изразяващи се в поява на хармонични на същия тон) и изкривявания на повече от един тон, наречени интермодулационни. Последните се характеризират с появяването и на честоти, некратни (нехармонични) на подадените.

Обективна мярка за първите изкривявания е коефициентът на нелинейните изкривявания (клирфактор —  $k$ ), а за вторите — коефициентът на комбинационните (интермодулационните) изкривявания — дифтонфакторът  $d$ .

в) *Динамичен обхват.* Динамичният обхват (динамиката) е едно от главните качества на художествената реч и музикалните изпълнения и допринася твърде много за естетичната наслада при слушането им. Той се изразява с отношението на максималната към минималната сила на тоновете при едно и също изпълнение. Това отношение варира в твърде широки граници. При обикновен делови разговор то е от порядъка на 25—30 дБ; при художествена реч и не-големи вокални и инструментални ансамбли то стига до 50 дБ, а при голям симфоничен оркестър — до 70 дБ.

Гореизложените динамични обхвати се отнасят до естественото възпроизвеждане. Но възпроизвеждането



на такива големи динамични обхвати от усилвателя трябва да стане неизкривено, и то най-вече за високите и ниските динамични нива на възпроизвеждания обхват.

Най-високите динамични нива са ограничени от максималната изходна мощност на крайното стъпало на нискочестотния усилвател.

Най-ниските динамични нива се ограничават от маскировката на шумовете и водят до необходимостта да се снижава рязко нивото на същите.

Разбира се, посочените изисквания към нискочестотния усилвател са необходими, но недостатъчни условия за едно добро възпроизвеждане. Към тях трябва да се прибавят и акустическите възможности на помещението, в което ще става възпроизвеждането на звуковата картина, където са налице така наречените акустически шумове на помещението. Те могат да достигнат  $35 \div 40$  дБ за една жилищна стая, намираща се при средни условия (средно оживена улица).

#### *Товарна характеристика*

Товарната характеристика е зависимостта на изходното променливо напрежение на крайното стъпало на нискочестотния усилвател от промяната на товарното съпротивление при постоянно входно напрежение. Този параметър е особено важен за нискочестотните усилватели. Ако промяната на товара води до големи промени в изходното напрежение, това ще има следните последствия:

1. Ще се наруши напасването (съгласуването) на товарното съпротивление, респ. високоговорителя, спрямо вътрешното съпротивление на лампата.

2. Увеличаване на преходните процеси (в случай, когато усилвателят се разтоварва).

3. Големите промени в изходното напрежение (респ. неговото нарастване) правят оразмеряването на такъв усилвател неикономично, тъй като всички елементи на усилвателя (кондензатори, дросели, трансформатори и др.) трябва да се изчислят на напрежения, по-високи от номиналните.

4. Промяната на напреженията в големи граници води до недопустими промени на нивото на слушаната звукова мощност. И ако тая промяна не е закономерна (каквото например е случаят с усилвателите за жична радиофикация, където товарът се мени постоянно и произволно във времето), всеки момент би трябвало да се използва регулаторът на силата, без да се разчита на успех.

Всичко това налага да се вземат такива мерки при проектирането на нискочестотния усилвател, които да гарантират практически стабилна товарна характеристика, която да не зависи от промяната на товара. При усилвателите за жична радиофикация, например съгласно нормите при пълно откачване на товара, изходното напрежение не трябва да нараства повече от 3 дБ.

Към разгледаните дотук изисквания спрямо нискочестотните усилватели следва да се прибавят и изискванията към акустическата система за възпроизвеждането. В случая тази система не е обект на разглеждане и на нея няма да се отдели внимание.

В заключение може да се каже, че съвременната радиотехника разполага с различни средства, които позволяват да се удовлетворят почти напълно предявените към нискочестотния усилвател изисквания, за да може той да дава едно висококачествено въз-



произвеждане на всякакъв вид музикални програми. Едно от най-добрите и сигурни средства, което се използва все по-широко през последните години от радиоконструкторите, е обратната връзка. Тя ще се разгледа в зависимост от поставените дотук изисквания към нискочестотния усилвател за високо качество на възпроизвеждането.

## 2. Обратни връзки — определения

Обратна връзка се нарича такава връзка между електрически вериги, при която енергията на усилвания сигнал се подава в посока, обратна на нормалната, или от верига с по-високо ниво на сигнала към верига с по-ниско ниво на същия. Обикновено сигналът се взема от изходната верига на крайната лампа и се подава във входната верига на същата или друга лампа. Такова обратно предаване на енергия може да се реализира посредством изкуствено създадена верига за обратна връзка или посредством естествено съществуващи вериги от различен род — между отделните електроди на лампата, елементите и съединителните проводници на схемата при тяхното подреждане на шасито. Последните обратни връзки се наричат паразитни, тъй като се създават чрез паразитни вериги. Действието им е обикновено такова, че влошава работата на усилвателя, а в много случаи създава условия за самовъзбуждане на същия.

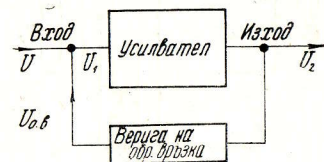
Възможно е следното категоризиране на видовете обратни връзки:

- а) положителна — активна;
- б) отрицателна — активна;
- в) реактивна;

г) комплексна (с положителна или отрицателна активна съставна);

д) нелинейна, която може да бъде както активна (положителна или отрицателна), така и реактивна.

Обратната връзка се нарича положителна, когато входното напрежение ( $U$ ) и напрежението, което се връща по веригата на обратната връзка ( $U_{o.v}$ ), са с еднаква фаза (фиг. 1).



Фиг. 1

Обратната връзка се нарича отрицателна, когато тези напрежения са в противофаза.

В първия случай резултантното променливо напрежение, което се подава на решетката на лампата, се увеличава ( $U_1 = U + U_{o.v}$ ), а във втория случай то се намалява ( $U_1 = U - U_{o.v}$ ).

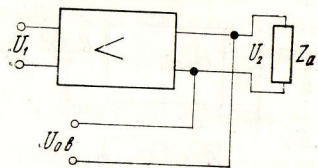
Ако веригата на обратната връзка е изпълнена така, че напрежението на обратната връзка, приложено към входа на лампата, е дефазирано от напрежението на източника ( $U$ ) с  $90^\circ$  или  $270^\circ$ , обратната връзка се нарича реактивна. Тя изменя резултантното входно напрежение  $U_1$  както по амплитудата, така и по фаза.

Ако напрежението на обратната връзка е изместено спрямо напрежението на източника на ъгли, различни от  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $270^\circ$ , обратната връзка се нарича комплексна. Тя също изменя резултантното напрежение по амплитудата и фаза.

Съществуват различни начини за снемане на напрежението на обратната връзка от изхода на схемите и подаването му на входа на същите. Ако напреже-

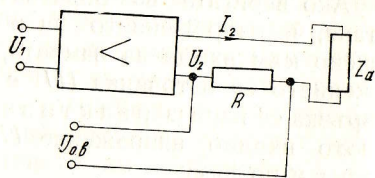


нието на обратната връзка се сема от изхода на схемата паралелно на товарното съпротивление, имаме обратна връзка по напрежение, тъй като в този случай напрежението на обратната връзка е право пропорционално на изходното напрежение на усилвателя (Фиг. 2).



Фиг. 2

Ако напрежението на обратната връзка се сема от съпротивление или друг елемент, включен последователно на товара, имаме обратна връзка по ток, тъй като напрежението на обратната връзка е право пропорционално на изходния ток  $I_2$  (Фиг. 3).

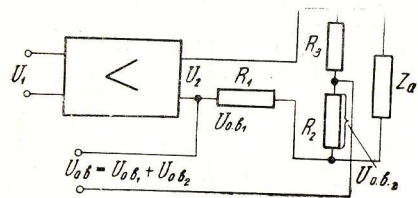


Фиг. 3

Възможна е и комбинация от тези два начина, при която напрежението на обратната връзка има две съставки: едната е пропорционална на изходното напрежение, а другата — пропорционална на изходния ток (Фиг. 4). Такава обратна връзка се нарича комбинирана (смесена) обратна връзка.

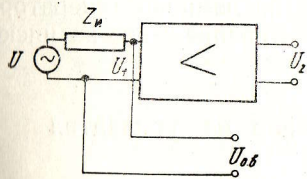
Когато делителят на напрежение във веригата на обратната връзка съдържа нелинеен елемент (съпротивление) и се използва нелинейната част на волтамперната характеристика на последния, обратната връзка се нарича нелинейна.

Напрежението на обратната връзка, което постъпва от изходната във входната верига, може да бъде приложено на решетката на лампата както последователно, така и паралелно на входното променливо

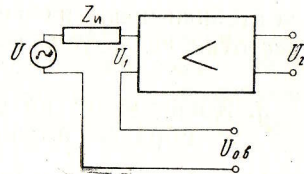


Фиг. 4

напрежение на източника на сигнала. Последователна обратна връзка имаме, когато напрежението на обратната връзка се подава на входа на схемата последователно на източника на сигнала (Фиг. 5).



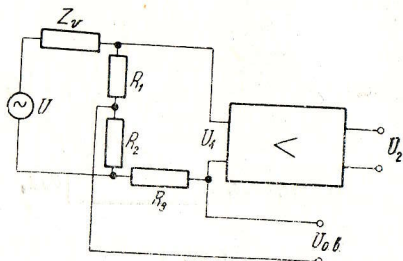
Фиг. 5



Фиг. 6

Паралелна обратна връзка имаме, когато напрежението на обратната връзка се подава паралелно на източника на сигнала (Фиг. 6).

Обратната връзка може да представлява и комбинация от горните два способа. Тогава тя се нарича комбинирана (смесена) по отношение на входа обратна връзка (фиг. 7).



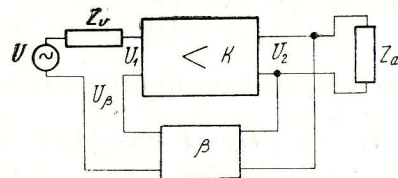
Фиг. 7

В някои случаи напрежението на обратната връзка се подава във входната верига след изправител или след като напрежението ѝ е преобразувано. Такава обратна връзка се употребява за стабилизиране на напреженията или честотите на лампови генератори, за стабилизиране на изходното напрежение на ниско-честотни усилватели и др.

### 3. Коэффициент на усилване на усилвател с обратна връзка

Обратната връзка може да бъде приложена към всички видове усилвателни схеми. Разсъжденията за усилвателните способности на схемата независимо от това, дали тя е предназначена за усилване на ниски или високи честоти, са еднакви и зависят само от знака на обратната връзка.

За определяне на коэффициента на усилване обикновено се изхожда от схема с последователна обратна връзка по напрежение (фиг. 8).



Фиг. 8

Приети са следните обозначения:

- $K$  — коэффициентът на усилване на усилвателното стъпало без обратна връзка;
- $K_\beta$  — коэффициентът на усилване на стъпалото, обхванато от обратната връзка;
- $U_1$  — напрежението, подавано непосредствено на управляващата решетка на лампата на усилвателното стъпало;
- $U_1 U_2$  — входното, респ. изходното, напрежение на усилвателното стъпало;
- $U_\beta$  — напрежението на обратната връзка ( $U_{o.в}$ );
- $\beta$  — коэффициентът на обратната връзка. Той показва каква част от изходното напрежение се подава обратно във входната верига:

$$\beta = \frac{U_\beta}{U_2}. \quad (1)$$

Коэффициентът на обратната връзка  $\beta$  в зависимост от вида на същата се движи от 0 до +1 за положителна и от 0 до -1 за отрицателна обратна връзка.



С увеличение на стойността на коефициента  $\beta$  обратната връзка става по-дълбока. По такъв начин в най-общия случай напрежението на обратната връзка ще бъде

$$U_{\beta} = \pm \beta U_2. \quad (2)$$

Напрежението, приложено на решетката на лампата, ще бъде

$$U_1 = U + U_{\beta} = U + (\pm \beta U_2).$$

От друга страна, коефициентът на усилване на усилвателя без обратна връзка е

$$K = \frac{U_2}{U}.$$

Оттук

$$U_2 = KU_1 = K[U + (\pm \beta U_2)] = KU + K(\pm \beta U_2).$$

Като се разделят двете страни на уравнението с  $U$  се получава

$$\frac{U_2}{U} = K + K(\pm \beta \frac{U_2}{U}).$$

Но  $\frac{U_2}{U} = K_{\beta}$  е коефициентът на усилване на стъпалото, обхванато от обратна връзка.

Тогав

$$K_{\beta} = K + K(\pm \beta K_{\beta}).$$

Като се реши уравнението спрямо  $K_{\beta}$ , се получава следният окончателен израз за коефициента на усилване на стъпалото, обхванато от обратна връзка:

$$K_{\beta} = \frac{K}{1 - (\pm \beta K)} = \frac{K}{1 \mp \beta K}. \quad (3)$$

Този израз е основен за усилвателя, обхванат от обратна връзка. По него може да се изчисли усилването за всяка честота на пропускания обхват, а оттам и честотната характеристика на усилвателя, обхванат от обратна връзка. Същият израз, но в комплексен вид се използва за изчисление и на честотно-фазовата характеристика на такъв усилвател.

Произведението  $\pm \beta K$  се нарича фактор на обратната връзка. Знакът на фактора е обратен на знака на обратната връзка. При положителна обратна връзка знаменателят на дробта намалява, а коефициентът на усилване на обхванатия от обратната връзка усилвател нараства  $1 - \beta K$  пъти. При отрицателна обратна връзка знаменателят расте и коефициентът на усилване се намалява  $1 + \beta K$  пъти.

Следователно положителната обратна връзка увеличава коефициента на усилване, докато отрицателната обратна връзка го намалява. Въпреки това голям недостатък на отрицателната обратна връзка тя е намерила най-голямо приложение в съвременните усилвателни схеми поради това, че подобрява качествените показатели на усилвателя — намалява нелинейните и честотните изкривявания, понижава нивото на шумовете, увеличава стабилността на усилването и др. Положителната обратна връзка е намерила приложение най-вече в генераторните, регенеративните и свръхрегенеративните схеми, които тук не ще се разглеждат.

В някои случаи подходяща комбинация от положителната и отрицателната обратна връзка дава много добри резултати за подобряване на някои характеристики на усилвателните схеми.

Величината  $1 \pm \beta K$  показва с колко се изменя усилването на усилвателя, обхванат от обратна връзка



ка, под действието на същата и се нарича дълбочина на обратната връзка.

Трябва да се добави, че величината  $1 \pm \beta K$  зависи от честотата. При това в зависимост от броя и стойностите на елементите (капацитети, индуктивности и др.), участващи във веригите на усилвателя, може да се внесат фазови измествания между изходното и входното напрежение, които стигат до стотици градуси и са различни за различните честоти. Ако за някоя честота се получи фазово изместване от  $180^\circ$  и повече ( $540^\circ$ ), обратната връзка сменя характера си, като от положителна става отрицателна и обратно. Следователно усилвател, обхванат от отрицателна обратна връзка за определени честоти, може да се окаже обхванат от положителна обратна връзка за други честоти. За да се избягнат грешки и неточности, в практиката обратната връзка се определя по нейния знак за средните работни честоти, където фазовите измествания са малки.

При много дълбока обратна връзка (когато  $\beta K \gg 1$ ) единицата в израза  $K_\beta = \frac{K}{1 - \beta K}$  може да се пренебрегне. В такъв случай за усилването на такъв усилвател се получава

$$K_\beta \cong \frac{1}{\beta},$$

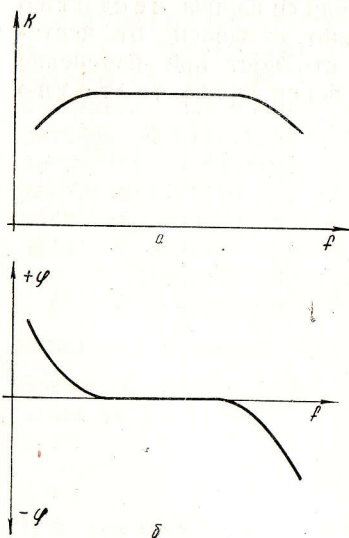
т. е. усилването на усилвателя не зависи от неговите усилвателни свойства. Такова устройство има много ценни качества и е намерило широко приложение.

В случаите, когато при положителна обратна връзка факторът на обратната връзка  $\beta K = 1$ , знаменателят на формула 3 става равен на нула и коефициентът на усилване на такъв усилвател става тео-

ретически безкрайно голям. Това значи, че даже когато не се подава напрежение на входа на усилвателя, амплитудата на изходното му напрежение ще има някаква крайна стойност, която се определя от захранващото постоянно напрежение. В такъв режим на работа усилвателят се превръща в генератор, който преобразува енергията на постояннотоковия източник в енергия на собствени променливи електрически колебания. Ако  $\beta$  не зависи от честотата, обратната връзка на усилвателя се нарича честотно независима. Обратно, ако  $\beta$  зависи от честотата (променя се по знак и стойност при изменение на честотата), обратната връзка се нарича честотно зависима.

## 1. Честотни характеристики

Честотната характеристика на усилвателя представлява графически изобразената зависимост на коефициента на усилване на усилвателя от честотата.



Фиг. 9

Най-голяма промяна на коефициента на усилване (честотни изкривявания) в сравнение с този за средните честоти съществува за ниските и високите честоти. Първата от тях (снижението на честотната характеристика за ниски честоти) се дължи главно на междустъпалните кондензатори и самоиндукцията на първичната намотка на

изходния трансформатор. Втората (снижение на честотната характеристика за високите честоти) се причинява главно от паразитните капацитети между различните точки от схемата и самоиндукцията на разсейване на същия трансформатор.

Обикновено когато се разглежда един нискочестотен усилвател, честотната характеристика на същия се смята достатъчна, за да бъде той характеризиран по отношение на честотата. Когато обаче се проектира усилвателят да бъде обхванат от обратна връзка, оказва се, че тази характеристика е недостатъчна. Налага се едновременно с нея да се има пред вид и фазовата характеристика на усилвателя. На фиг. 9б е показана тази характеристика. Същата представлява графически изобразената зависимост на фазовия ъгъл  $\varphi$  (ъгълът на дефазирание между изходното и входното напрежение на усилвателя) от честотата. От фигурата се вижда, че за средните честоти фазовият ъгъл е нула, докато за ниските и високите честоти той е значителен. При сравнение на честотната и фазовата характеристика се забелязва, че те са неравномерни в едни и същи области. Това се дължи на факта, че причините за неравномерността на фазовата характеристика съвпадат с тези за неравномерността на честотната характеристика. Когато върху един усилвател бъде приложена обратна връзка, настъпват значителни промени в неговата честотна и фазова характеристика.

Определянето на честотната характеристика на усилвател с обратна връзка изисква да бъде изчислен коефициентът на усилване на същия за известен брой честоти по формула 3.

Между двата гранични случая, при които  $\beta K$  е положителна или отрицателна величина (активна отри-



цателна и положителна обратна връзка), съществуват и редица други случаи. Всички те могат да бъдат обхванати заедно с граничните, когато изразът за коефициента на усилване се представи в комплексен вид.

Качествата на обратната връзка проличават по-ясно, ако се разгледат поотделно двата вида обратни връзки — честотно независимата и честотно зависимата.

а) *Честотно независима обратна връзка.* Това е обратна връзка, веригата на която не причинява нито честотни, нито фазови изкривявания на преминаващите през нея сигнали ( $\beta$  не зависи от честотата).

Внимателното разглеждане на израза за коефициента на усилване при наличност на обратна връзка (формула 3) показва, че особен интерес представлява знаменателят и най-вече факторът на обратната връзка  $\beta K$ .

При отрицателна обратна връзка знаменателят добива вида  $1 + \beta K$ . Като се има пред вид този израз, може да се определи каква ще бъде честотната характеристика на усилвателя след прилагането на отрицателната обратна връзка.

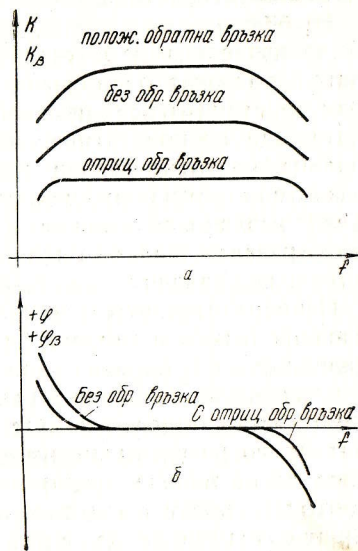
В областта на средните честоти, за които коефициентът на усилване  $K$  е постоянен,  $1 + \beta K$  ще бъде постоянна величина. Следователно при наличност на отрицателна обратна връзка коефициентът на усилване за тези честоти ще бъде  $(1 + \beta K)$  пъти по-малък от коефициента на усилване при липса на обратна връзка. В тази област честотната характеристика ще бъде успоредна на абсцисната ос и по-ниска от честотната характеристика без обратна връзка. За ниските и високите честоти коефициентът на усилване  $K$  намалява. Тъй като коефициентът  $\beta$  остава постоянен, изразът  $1 + \beta K$  ще се окаже по-малък от този

за средните честоти. Там, където коефициентът на усилване  $K$  е по-малък, действието на отрицателната обратна връзка е по-слабо. В резултат се получава известно „изравняване“

на честотната характеристика. Това личи от фиг. 10а, на която е показана честотната характеристика на усилвател със и без честотно независима отрицателна обратна връзка.

Не е трудно да се разбере какво ще се получи, ако обратната връзка е положителна. Тук трябва само да се припомни, че знаменателят  $1 - \beta K$  за разглежданите случаи е винаги по-голям от нула и положителен, т. е.  $\beta K$  е по-малък от единица (липсва самовъзбуждане). Тогава за средните

честоти  $1 - \beta K$  ще бъде постоянна величина, по-малка от единица. Следователно честотната характеристика при положителна обратна връзка ще бъде успоредна на абсцисната ос и над честотната характеристика на същия усилвател без обратна връзка. За ниските и високите честоти, за които коефициентът на усилване  $K$  е по-малък,  $1 - \beta K$  ще нарастне. Следователно  $K_{\beta}$  ще се намали повече, отколкото това става с коефициента на усилване на усилвателя без обратна връзка. Полу-



Фиг. 10



чената честотна характеристика е посочена също на фиг. 10а. От фигурата се вижда, че положителната обратна връзка увеличава неравномерността на честотната характеристика.

Въз основа на направеното разглеждане може да бъде изчислена честотната характеристика на усилвател, обхванат от обратна връзка. Ако същата характеристика бъде измерена и сравнена с изчислената, ще се констатира, че в областите, където са налице честотно-фазови изкривявания, съществуват значителни разлики между двете характеристики. Тези разлики се дължат на факта, че при направеното разглеждане не бяха взети под внимание фазовите изкривявания.

Непосредственото въвеждане на фазовите изкривявания в израза на коефициента на усилване при наличност на обратна връзка налага да се оперира с комплексни величини. Това изисква специална математическа подготовка. От друга страна, чисто математичното разглеждане на въпроса не дава възможност да се вникне лесно в качествените изменения, които настъпват вследствие обратната връзка. Въпросният случай може да се разгледа и по следния начин.

Във всички случаи коефициентът на усилване представлява отношение на изходното към входното напрежение. Следователно при постоянно изходно напрежение за коефициента на усилване можем да съдим по входното напрежение.

Когато усилвателят е обхванат от отрицателна обратна връзка, може да се напише зависимостта

$$U_1 = U - U_\beta.$$

Тя може да се представи и по следния начин:

$$U = U_1 + U_\beta.$$

Така при наличност на обратна връзка определянето на коефициента на усилване се свежда до извършване на означеното алгебрично действие. Но тъй като  $U_1$  и  $U_\beta$  са синусоидални величини, това алгебрично действие (събиране) може да стане непосредствено само ако двете напрежения са във фаза или противофаза. В разглеждания случай се прие, че веригата на обратната връзка е честотно независима, т. е. изходното напрежение  $U_2$  и напрежението на обратната връзка  $U_\beta$  са във фаза. Но за ниските и високите честоти между входното напрежение  $U_1$  и изходното напрежение  $U_2$  съществува известно фазово изместване. Следователно непосредственото извършване на означеното действие между  $U_1$  и  $U_\beta$  е невъзможно. Налага се то да се извърши „точка по точка“ или векторно, като синусоидалните напрежения  $U_1$  и  $U_2$  се представят като вектори със съответна големина и фазов ъгъл помежду им. При това за улеснение се правят следните допускания.

Приема се, че усилвателят внася само фазови, но не и честотни изкривявания. Това предположение не се изпълнява точно на практика, но то опростява много разглеждането на въпроса и дава възможност да се изясни качествената му страна.

За да бъдат обхванати всички случаи, приема се, че фазовият ъгъл между  $U_1$  и  $U_2$  може да се изменя от нула до  $360^\circ$ .

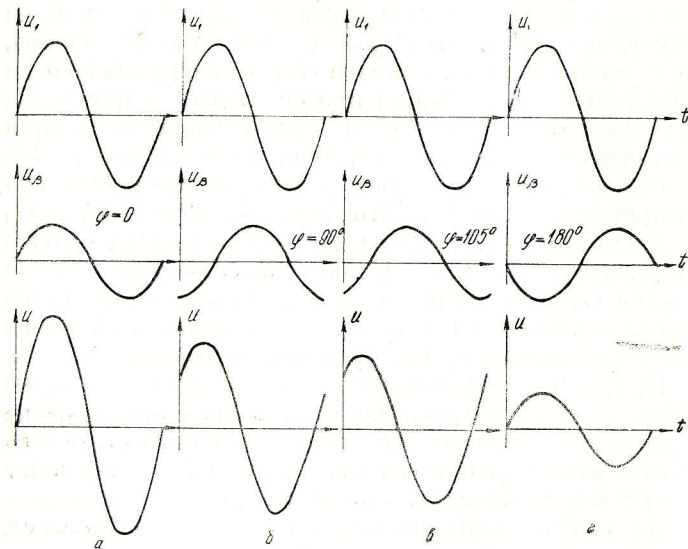
Тъй като предимно се използва отрицателната обратна връзка, приема се, че при нея няма фазови изкривявания ( $\varphi = 0$ ). Това е отразено и в самата зависимост, дадена по-горе. На фиг. 11 и 12 е извършено графическо и векторно построение на израза

$$U = U_1 + U_\beta$$



за няколко стойности на фазовия ъгъл, след като са взети под внимание горните условия.

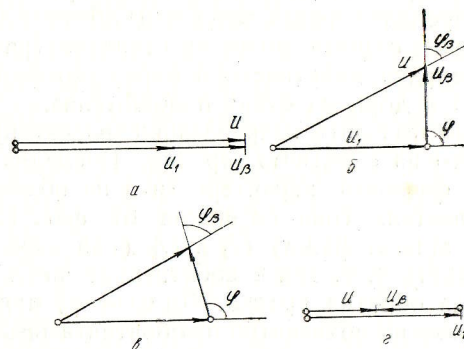
На фиг. 11а и 12а е показан граничният случай, отговарящ на отрицателната обратна връзка. Резултатът при него се изразява в повишаване на  $U$ .



Фиг. 11

Това означава, че за да се получи постоянно изходно напрежение, е необходимо да се повиши входното такова. От това следва, че коефициентът на усилване намалява вследствие прилагането на отрицателната обратна връзка.

На фиг. 11г и 12г е показан другият граничен случай, отговарящ на положителната обратна връзка. Пониженото  $U$  показва, че при тази връзка коефициентът на усилване се увеличава.



Фиг. 12

От графиките се вижда, че във всички останали случаи  $U$  се намалява или увеличава в по-малка степен, отколкото при граничните случаи. Освен това обратната връзка се превръща от положителна в отрицателна и обратно. На фиг. 11в и 12в е посочен случаят, който разграничава областите на положителната и отрицателната обратна връзка. Тук въпреки наличието на обратна връзка  $U$ , а следователно и усилването не се променят. Това е тъй наречената неутрална обратна връзка.

От направеното разглеждане става ясно, че причините от усилвателя фазови изкривявания водят до значителни промени в действието на обратната връзка. Може да се предположи (и това на практика



обикновено е изпълнено), че за средните честоти липсват фазови изкривявания и обратната връзка е отрицателна. Ако за някои честоти се появят фазови изкривявания, това ще доведе до намаляване на ефективността на отрицателната обратна връзка. Явно е, че при определен фазов ъгъл и дълбочина на обратната връзка същата може да стане неутрална (т. е. да се прекрати действието ѝ върху коефициента на усилване) и дори да стане положителна.

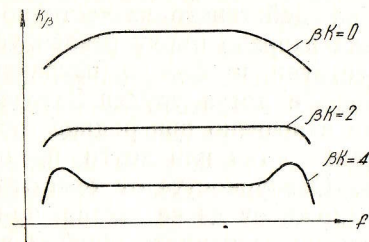
Не само фазовите изкривявания внасят промени в действието на обратната връзка. Последната също променя фазовата характеристика на обхванатия от нея усилвател. Това се вижда от фиг. 12б и 12в. Тук  $\varphi$  е ъгълът между  $U_2$  и  $U_1$  (тъй като  $U_2$  и  $U_\beta$  са във фаза), т. е. той е собственият ъгъл на усилвателя без обратна връзка. Ъгълът  $\varphi_\beta$  между  $U_2$  и  $U$  е ъгълът на обхванатия от обратната връзка усилвател.

Отрицателната обратна връзка намалява силно фазовите изкривявания, когато те не са големи. Значителните фазови изкривявания се намаляват слабо от нея.

На фиг. 10б е показана фазовата характеристика на взетия за пример усилвател със и без обратна връзка.

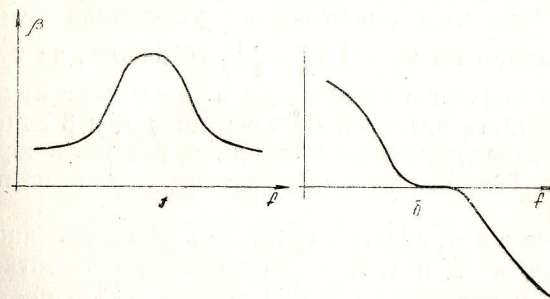
В зависимост от вида, броя и честотно-фазовите характеристики на стъпалата, от които се състои усилвателят, обхванат от честотно независима обратна връзка, а също и от дълбочината на последната честотната характеристика на усилвателя се изменя различно. Посочените на фиг. 9 и 10 характеристики се отнасят до едностъпален RC-усилвател. На фиг. 13 са показани характеристиките на двустъпален RC-усилвател при различни стойности на  $\beta K$ . Тук е ха-

рактерно повдигането на ниските и високите честоти при прилагане на по-дълбока отрицателна обратна връзка, дължащо се на честотно-фазовите изкривявания в тези области.



Фиг. 13

б) Честотно зависима обратна връзка. Честотно зависима обратна връзка е онази обратна връзка, чийто



Фиг. 14

коэффициент  $\beta$  зависи от честотата както по големината, така и по фаза. Честотната зависимост на големината



на  $\beta$  от честотата може да бъде представена като честотна характеристика. (фиг. 14а). Фазовата характеристика, представляваща зависимостта на фазовия ъгъл  $\varphi_{0\beta}$  между  $U_2$  и  $U_\beta$  от честотата, е показана на фиг. 14б.

Анализът на действието на честотно зависимата обратна връзка направо върху реален усилвател със собствени честотни и фазови изкривявания, даже само качествено, е доста труден. Затова разглеждането ще бъде направено при редица отделни случаи, като се направят едни или други предположения и опростявания. Съвкупността от тези отделни случаи ще даде възможност да се схване по-пълно влиянието на честотно зависимата обратна връзка върху честотно-фазовите характеристики на реалния усилвател.

Най-напред може да се приеме, че  $\beta$  зависи само по стойност, но не и по фаза от честотата. За този случай коефициентът на усилване, а следователно и честотната характеристика на усилвателя се определят също по израза  $K_\beta = \frac{K}{1 \pm \beta K}$ . Явно е, че тук са възможни редица комбинации в зависимост от знака на обратната връзка и от това, дали  $K$  и  $\beta$  едновременно намаляват, нарастват или се изменят в обратни посоки. Това налага конкретно изследване на всеки случай.

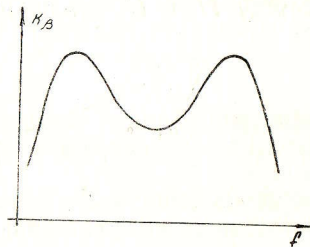
Най-често се среща случаят на едновременно намаляване на  $K$  и  $\beta$ . Ако е налице една честотно зависима отрицателна обратна връзка, дълбочината на последната  $(1 + \beta K)$  ще намалява по-бързо, отколкото това става при честотно независимата такава. Причината за това е, че освен  $K$  намалява също и  $\beta$ . В резултат „изравняващото“ действие на честотна

зависимата отрицателна обратна връзка се оказва по-голямо от това на честотно независимата. Затова чрез подходящ подбор на веригата на обратната връзка може да се получи пълно изравняване на честотната характеристика. Нещо повече, при бързо намаляване на  $\beta$  е възможно значително „повдигане“ на честотната характеристика. Както беше посочено, подобен ефект се получава при прилагането на честотно независима отрицателна обратна връзка към многостъпални  $RC$ -усилватели.

Не е трудно да се предвиди в случая и ефектът от прилагането на положителна обратна връзка. Той представлява още по-голямо увеличаване на неравномерността на честотната характеристика.

Особен интерес представлява случаят, когато  $\beta$  намалява в област, в която  $K$  остава постоянен. Лесно е да се разбере, че тогава се получава „повдигане“ на честотната характеристика в тази област. За взетите като пример усилвател и верига на обратната връзка това е показано на фиг. 15.

По-рядко се среща случаят, при който  $K$  и  $\beta$  се изменят в обратни посоки. Ако  $K$  намалява (както това е обикновено) и е налице една отрицателна обратна връзка, изразът  $1 + \beta K$  ще намалява по-слабо, отколкото това става при честотно независимата отрицателна обратна връзка. Следователно при този случай „изравняващото“ действие на отрицателната обратна връзка върху честотната харак-

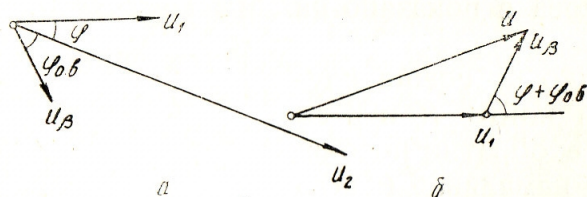


Фиг. 15



теристика на усилвателя е по-слабо. Възможен е и случай, при който  $K$  и  $\beta$  се изменят така, че  $\beta = \frac{1}{K}$ . Тогава обратната връзка не влияе върху хода на честотната характеристика на усилвателя.

Влиянието на честотно зависимата обратна връзка върху  $\beta$  при вземане под внимание на фазовите изкривявания може да бъде изяснено, ако се изхожда от същите положения, както при честотно независимата обратна връзка. Разликата се състои в следното: при честотно зависимата обратна връзка съществува фазов ъгъл  $\varphi_{o.v}$  между  $U_\beta$  и  $U_2$ , който следва да се вземе пред вид, когато се извършва действието, означено с израза  $U = U_1 - U_\beta$ . Тук също следва да бъде извършено опростяване: приема се, че по стойност  $U_1$  и  $U_\beta$  не зависят от честотата. За по-голяма яснота построяването на израза е извършено само векторно. На фиг. 16а са показани трите напрежения  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_\beta$ . Тук с  $\varphi$  е отбелязан ъгълът между  $U_1$  и  $U_2$ , дължащ се на фазовите изкривя-



Фиг. 16

вания на самия усилвател, а с  $\varphi_{o.v}$  — ъгълът между  $U_2$  и  $U_\beta$ , дължащ се на веригата на обратната връзка. Построението може да се извърши по същия начин, както при честотно независимата обратна връзка (фиг. 16б). Следователно от гледна точка на

влиянието на фазовите изкривявания върху честотната характеристика на усилвателя е все едно дали имаме работа с усилвател и честотно зависима обратна връзка, причиняващи поотделно фазови изкривявания съответно  $\varphi$  и  $\varphi_{o.v}$ , или с усилвател със собствени фазови изкривявания ( $\varphi + \varphi_{o.v}$ ) и честотно независима обратна връзка.

Разбира се, наличността на фазови изкривявания във веригата на обратната връзка изменя по най-различен начин честотния ход на общите фазови изкривявания.

Ясно е, че прилагането на честотно зависима обратна връзка създава големи възможности за изменение на честотно-фазовите характеристики на усилвателя. От друга страна, обаче то често води до неочаквани, а нерядко и нежелани резултати. Предварителното изследване на честотно зависимата обратна връзка налага разглеждането на всеки конкретен случай. Обикновено то е твърде сложно. Ето защо често се правят ориентировъчни (качествени) изчисления, а окончателното решение се намира по експериментален път.

## 2. Регулиране на честотните характеристики с помощта на обратната връзка

Обратните връзки се оказват незаменимо средство за създаване на усилватели с широка гама от честотни характеристики (фиксиращи или променливи) с оглед да се получи висококачествено възпроизвеждане.

Както бе посочено, честотно независимата обратна връзка е подходяща главно за „изравняване“ на честотната характеристика или за увеличаване на съществуващата неравномерност на същата. Следова-



телно тя не е много подходяща за удовлетворяване на горните изисквания. Тези изисквания се удовлетворяват най-пълно от честотно зависимата обратна връзка. Направеното по-горе разглеждане показва, че чрез подходящ подбор на честотно-фазовите характеристики на веригата на обратната връзка честотно зависимата обратна връзка дава възможност за истинско „моделиране“ на честотната характеристика на усилвателя.

Наистина от израза за коефициента на усилване при наличност на обратна връзка се вижда, че при слабо изменящ се  $K$  видът на честотната характеристика се определя главно от  $\beta$ . Най-характерен и практически полезен е случаят на дълбока обратна връзка. При нея  $\beta K \gg 1$ . Тогава изразът за коефициента на усилване добива вида  $K_{\beta} = \frac{1}{\beta}$ . Става ясно, че в този случай честотната характеристика на усилвателя представлява обратна (реципрочна) характеристика на тази на веригата на самата обратна връзка. Следователно въпросът за създаване на определена честотна характеристика при тези условия се свежда до този за намиране на верига на обратната връзка с обратна честотна характеристика. Разбира се, към краищата на честотния обхват неравенството  $\beta K \gg 1$  изгубва силата си. Тук обаче са налице значителни фазови изкривявания, които в повечето случаи благоприятствуват „моделирането“ на честотната характеристика в същата, а понякога и в по-голяма от предположената степен.

Регулирането на формата на честотната характеристика при посочените условия се постига чрез различни промени във веригата на обратната връзка. Плавното регулиране на честотната характеристика

налага промяна в стойността на един или повече елементи. Обикновено това са потенциометри. Степенчатото регулиране на честотната характеристика се извършва чрез превключване, при което се променят или стойностите на някои елементи от веригата на обратната връзка, или пък се изменя самата схема на тази верига.

Получаването на големи и сложни промени на честотните характеристики изисква спазването на някои условия:

а) Посочено бе, че при дълбока обратна връзка характерът на честотната характеристика на усилвателя се определя изключително от вида на честотната характеристика на веригата на обратната връзка. Следователно налага се в последната да се извършат големи и сложни промени. Това се постига при наличност на значителен брой елементи. Всеки от тези елементи обаче внася известно затихване. В резултат от това в повечето случаи коефициентът на обратната връзка намалява.

б) За да се спазва изискването  $\beta K \gg 1$ , е необходимо  $K$  и  $\beta$  поотделно да бъдат по-големи от единица или един от тях да бъде много по-голям от единица. По условие  $\beta < 1$ . Нещо повече, сложността на веригата на обратната връзка, както беше посочено, прави обикновено  $\beta$  значително по-малък от единица. Следователно налага се  $K$  да бъде много по-голям от единица — понякога няколко стотици. Такова усилване обикновено не може да се получи само от едно, а от повече стъпала. Ето защо получаването на сложни и големи промени в честотните характеристики на усилвателя изисква сложна верига на обратната връзка, обхващаща няколко стъпала на същия.



Обикновено големите възможности на обратната връзка за „моделиране“ на честотните характеристики се комбинират с възможностите на различните тонкоригиращи вериги, поставени във веригата на усилването. Така се получават още по-добри резултати.

### 3. Нелинейни изкривявания

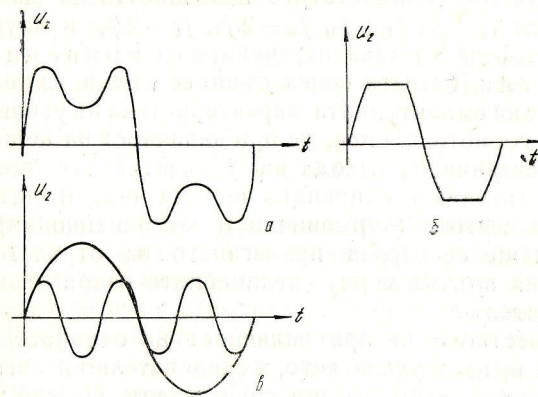
Едно от най-важните качества на обратната връзка е, че тя намалява нелинейните изкривявания на обхванатия от нея усилвател, когато същата е отрицателна.

Известно е, че нелинейните изкривявания на преминаващите през усилвателя сигнали се причиняват от нелинейността на амплитудните характеристики<sup>1</sup> на отделните му елементи. Нелинейните изкривявания се проявяват в изменение на формата на подадения синусоидален сигнал (фиг. 17а и 17б). Теоретически и практически е доказано, че какъв и да е несинусоидален сигнал може да бъде разложен на редица синусоидални такива. От фиг. 17 се вижда, че взетият за пример несинусоидален сигнал на изхода на усилвателя (фиг. 17а) се състои от един синусоидален сигнал с честота, равна на честотата на несинусоидалния изходен сигнал, плюс един синусоидален сигнал, чиято честота е два пъти по-висока от честотата на изходния сигнал (фиг. 17б). При разлагане на по-сложен несинусоидален сигнал се оказва, че той се състои от повече синусоидални съставни сиг-

<sup>1</sup> Амплитудната характеристика на даден елемент или устройство представлява зависимостта на амплитудата на изходното напрежение на елемента от амплитудата на входното синусоидално напрежение.

нали. При това разлагане се спазват винаги следните условия:

а) честотата на най-нисочестотния сигнал е равна на честотата на несинусоидалния сигнал; тя съвпада



Фиг. 17

с честотата на входния сигнал и се нарича основна честота;

б) всички останали съставни сигнали са с честота, кратна и по-висока от основната; те се наричат хармонични.

По такъв начин при подаване на входа на усилвателя на един синусоидален сигнал на изхода му освен този сигнал се получават и хармонични.

Обикновено на входа на усилвателя не се подава синусоидален сигнал с една честота, а доста голям брой синусоидални сигнали с твърде различни честоти. В такъв случай се оказва, че на изхода на усилвателя са налице не само основната и хармоничните съставни, но и



съставни с други честоти. Това явление проличава най-добре, когато на входа на усилвателя се подават само два синусоидални сигнала с честоти  $f_1$  и  $f_2$ . На изхода освен сигналите с честоти  $f_1$  и  $f_2$  и хармоничните им се констатира наличието на сигнали с честоти  $f_1 - f_2$ ,  $f_1 + f_2$ ,  $f_1 - 2f_2$ ,  $f_1 + 2f_2$  и други подобни. Това са така наречените комбинационни сигнали. Тяхната поява също се дължи на нелинейността на амплитудната характеристика на усилвателя.

От горното следва, че при наличие на нелинейни изкривявания на изхода на усилвателя се появяват освен сигнали с основната честота още и сигнали с други честоти (хармонични и комбинационни).

Как ще се отрази прилагането на отрицателната обратна връзка върху нелинейните изкривявания на усилвателя?

Известно е, че при наличие на отрицателна обратна връзка усилването, а следователно и сигналите с основна честота ще се намалят  $(1 + \beta K)$  пъти. Едновременно с това ще се намалят същото число пъти и всички сигнали с хармонични и комбинационни честоти, възникнали в усилвателя. Но намалението на основния сигнал може да се компенсира, като подаваният на усилвателя сигнал бъде увеличен  $(1 + \beta K)$  пъти. Тогава на изхода на усилвателя същият сигнал с основна честота (т. е. самият усилван сигнал) ще остане както преди реализирането на отрицателната обратна връзка, а сигналите с хармонични и комбинационни честоти ще бъдат намалени  $(1 + \beta K)$  пъти. Следователно при прилагане на отрицателна обратна връзка коефициентът на нелинейните изкривявания ще бъде

$$K_{\beta} = \frac{K}{1 + \beta K}, \quad (4)$$

т. е. ще се намали също толкова пъти, колкото пъти е намалено усилването.

Тук  $K$  е коефициентът на нелинейните изкривявания без обратна връзка;

$K_{\beta}$  — коефициентът на нелинейните изкривявания с обратна връзка.

Прилагането на положителна обратна връзка води до увеличаване на нелинейните изкривявания съгласно изрза

$$K_{\beta} = \frac{K}{1 - \beta K}. \quad (5)$$

При прилагането на изведения по-горе израз за стойността на коефициента на нелинейните изкривявания на усилвател, обхванат от отрицателна обратна връзка, следва да се имат пред вид следните положения:

а) Коефициентът на нелинейните изкривявания е толкова по-малък, колкото по-голяма е дълбочината на обратната връзка. Последната обаче зависи повече или по-малко от честотата. Следователно отделните хармонични и комбинационни сигнали няма да се намаляват толкова, колкото се намаляват основните сигнали. Може да се разгледа случай, в който дълбочината на обратната връзка е голяма в средата на пропускания честотен обхват и малка за по-високите честоти. Хармоничните, а следователно и коефициентът на нелинейните изкривявания на сигнали с честота, намираща се в средата на честотния обхват, ще бъдат по-малко намалени, отколкото основния сигнал. За да бъде коефициентът на нелинейните изкривявания точно определен, следва да бъдат известни амплитудите на отделните хармонични и комбинационни сигнали. Като се приложи изразът (4) поотделно за всеки един от тях, може с достатъчна



точност да бъде определен коефициентът на нелинейните изкривявания за всяка честота. Обикновено на практика тези данни липсват. Това води до значителна неточност при определянето на коефициента на нелинейните изкривявания. Последният ще може да се определи съгласно израза (4) и ще бъде намален за целия честотен обхват само ако отрицателната обратна връзка е честотно независима и самият усилвател внася малки честотни и фазови изкривявания.

б) Оказва се, че даже и при най-точно изчисление на коефициента на нелинейните изкривявания се явява пак разлика между изчислената и измерената стойност на същия. Тези отклонения се дължат на факта, че извеждането на израза (4) е направено при допускане на известни условия, които на практика не винаги са идеално спазени. Изследванията на влиянието на отрицателната обратна връзка върху нелинейните изкривявания показват, че този израз е валиден само когато нелинейните изкривявания на самия усилвател са не по-големи от 10%. Изкривявания от самия усилвател се намаляват твърде слабо от прилагането на обратна връзка, ако тяхната стойност надвишава 10%.

Този въпрос може да бъде изяснен, ако се разгледа един граничен случай, посочен на фиг. 17б, при който обратната връзка изобщо не променя нелинейните изкривявания. Както се вижда от фигурата, поради резкия преход в амплитудната характеристика на устройството (например радиолампа) и поради това, че се работи с голям сигнал, върхът на синусоидалния сигнал е „отрязан“. В резултат от прилагането на отрицателна обратна връзка усилването ще се намали. Ако след това бъде увеличен входният сигнал с цел да се получи същият сигнал на изхода,

„отрязването“ и нелинейните изкривявания ще останат същите както преди прилагането на обратната връзка. Това е така, защото изходният сигнал не може да превиши граничната стойност, определена от възможностите на усилвателя.

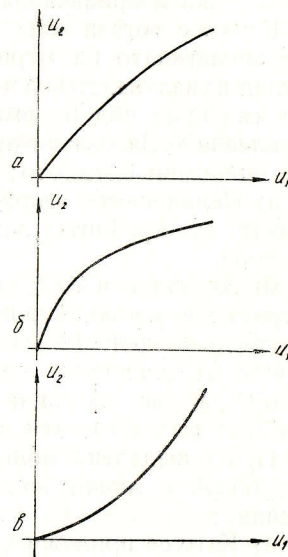
От точния анализ на влиянието на отрицателната обратна връзка върху нелинейните изкривявания се установяват следните факти:

а) Когато отклоненията на амплитудната характеристика на усилвателя без обратна връзка са малки и нерезки (фиг. 18а), нелинейните изкривявания се намаляват съгласно изведения израз.

б) Влиянието на обратната връзка върху нелинейните изкривявания се оказва незначително, ако амплитудната характеристика на усилвателя има големи и резки отклонения (фиг. 18б).

в) Когато амплитудната характеристика на усилвателя има вида, показан на фиг. 18в, нелинейните изкривявания се намаляват повече, отколкото показва изведеният израз.

От направеното дотук разглеждане следва, че при прилагане на отрицателна обратна връзка не бива да очакваме силно намаляване на големите собствени



Фиг. 18



нелинейни изкривявания на усилвателя. Обратно, ако искаме да получим голям ефект от прилагането на обратната връзка, следва да положим всички усилия, щото усилвателят да има по възможност по-малки нелинейни изкривявания.

Какъв е тогава смисълът и практическият ефект от прилагането на отрицателната обратна връзка с оглед намаляването на нелинейните изкривявания, като се има пред вид и намалението на коефициента на усилване? За изясняване на този въпрос следва да се припомни следното:

а) Нелинейните изкривявания обикновено се причиняват от крайните лампи и изходните трансформатори.

б) За малки и средни сигнали амплитудните характеристики на лампите и трансформаторите имат вида, посочен на фиг. 18а, а за силни сигнали — този, посочен на фиг. 18б.

в) Крайните лампи и изходните трансформатори са най-скъпите елементи на усилвателя.

При определена мощност от усилвателя може да се получат малки нелинейни изкривявания по два начина:

а) Като се приложи съответна отрицателна обратна връзка. Това, разбира се, ще доведе до намаление на усилването на усилвателя. За да се възстанови стойността на същото, налага се използването на усилвателни стъпала по напрежение.

б) Като се употребят крайни лампи или трансформатори, предназначени за по-голяма мощност от изисканата. При това положение тези елементи внасят по-малки нелинейни изкривявания.

В по-голямата част от практическите случаи се оказва, че икономически е по-изгодно да се включат

допълнителни стъпала по напрежение, отколкото да се използват по-мощни лампи и трансформатори.

Освен икономическа въпросът има и още една страна. Лампите, трансформаторите и особено транзисторите даже и тогава, когато работят в облекчен режим, внасят известни нелинейни изкривявания. Обикновено тези изкривявания са по-големи от изискваните. В тези случаи прилагането на отрицателна обратна връзка е единственият начин за намаляване на нелинейните изкривявания до желаната стойност.

#### 4. Вътрешни шумове

Едно от условията за качествено възпроизвеждане е постигането на необходимия динамичен обхват. Както бе посочено в увода, максималната амплитуда на възпроизвеждането е доста ограничена. За постигане на желания динамичен обхват се налага минималните амплитуди да бъдат с много малки стойности. Тук обаче ограничаващо действие оказват шумовете, които често „замаскират“ (правят практически нечуваемо) възпроизвеждането на сигналите, чиято амплитуда е от порядъка на шумовете. Тези шумове имат най-различен произход. Една значителна част от тях се създават от самия усилвател. Те могат да бъдат класифицирани, както следва:

а) Шумове, чийто източник е променливотоковото хранване на усилвателите. Те се наричат фон. На първо място това е напрежението с мрежова честота, което прониква директно (чрез отоплението на лампите) или по индуктивен, респ. капацитивен, път в чувствителните вериги на усилвателя. На второ място това са напреженията, дължащи се на недоброто



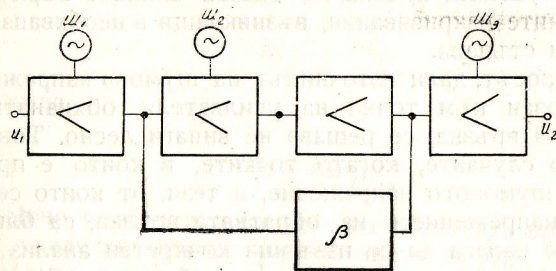
филтриране на постояннотоковите напрежения, получени при изправяне на мрежовото напрежение. Честотата на тези напрежения е различна и зависи от типа на изправителя и броя на фазите на захранващите напрежения. Така например в маломощните усилватели (за радиоприемници, телевизори, магнитофони и т. н.) се използват еднопътни и двупътни схеми на изправители при еднофазно захранване. Напреженията на фона, създавани от тях, имат честота 50 и 100 хц (за еднопътно изправяне) и 100 и 200 хц (за двупътно изправяне). Разбира се, при изправянето се създават и напрежения с по-високи честоти, но техните амплитуди са твърде малки и затова могат да се пренебрегнат.

В усилвателите, захранвани от трифазна мрежа, напреженията на фона имат честота 150 и 300 хц. Появилите се при изправянето променливи напрежения проникват в самия усилвател по веригите на постояннотоковото захранване. Оттук те попадат във входовете на отделните стъпала и се усилват наравно с полезните сигнали.

б) Шумови напрежения, създавани от елементите на самата схема. Такива напрежения се създават в съпротивленията, лампите и транзисторите. Те също попадат във входовете на усилвателните стъпала и се усилват. Честотният им спектър е твърде широк.

При определяне влиянието на обратната връзка върху шумовете е важен не производът на последните, а точките, в които са свързани еквивалентните им източници към усилвателя. На фиг. 19 е показан един усилвател с няколко стъпала, част от които са обхванати от обратна връзка. Последната оказва влияние само върху шумовете, чиито еквивалентни генератори са свързани към точки от схемата, оста-

ващи „вътре“ в частта, обхваната от обратната връзка. В случая такъв е само еквивалентният генератор  $\mathcal{U}_2$ . Всички шумови напрежения, внесени от този



Фиг. 19

генератор, могат да се разглеждат като равностойни на напреженията, които възникват вследствие нелинейните изкривявания. Поради това и връзката между шумовите напрежения при наличие на обратна връзка  $U_{ш\beta}$  и шумовите напрежения при отсъствие на обратна връзка ( $U_{ш}$ ) има същия вид, както връзката между нелинейните изкривявания при същите условия, т. е.

$$U_{ш\beta} = \frac{U_{ш}}{1 \pm \beta K}. \quad (6)$$

Следователно при отрицателна обратна връзка шумовите напрежения се намаляват, а при положителна те се увеличават.

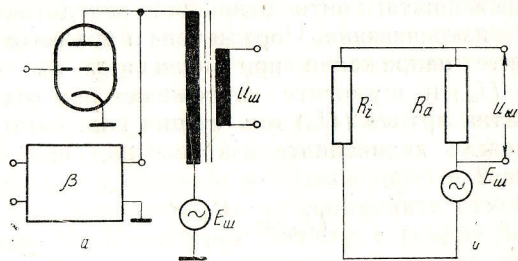
На практика точното определяне влиянието на обратната връзка върху шумовите напрежения се затруднява от пречки, подобни на тези при нелинейните изкривявания. Направените там разсъждения вадат почти напълно и за настоящия случай.



Шумовите напрежения, дължащи се на еквивалентните генератори  $\mathit{Ш}_1$  и  $\mathit{Ш}_2$  (фиг. 19), няма да се намалят от прилагането на отрицателна обратна връзка — обратната връзка не оказва влияние върху нелинейните изкривявания, възникващи в необхванатите от нея стъпала.

Въпросът, дали източникът на шумови напрежения е свързан към точки на усилвателя, обхванати от обратна връзка, се решава не винаги лесно. Това са главно случаите, когато точките, в които е приложено шумовото напрежение, и тези, от които се отнема напрежението на обратната връзка, са близки. Тук се налага да се извърши конкретен анализ.

На фиг. 20 е представен подобен случай. Както се посочва в т. 5 на настоящата глава, вследствие прилагането на отрицателна обратна връзка по на-



Фиг. 20

прежение (каквато е разглежданата) изходното съпротивление на усилвателя намалява. Ако горната схема се замени с нейната еквивалентна схема (фиг. 20 б), за стойността на шумовото напрежение

на изхода  $U_{ш}$  може да се напише

$$U_{ш} = I_{ш} R_a.$$

Но

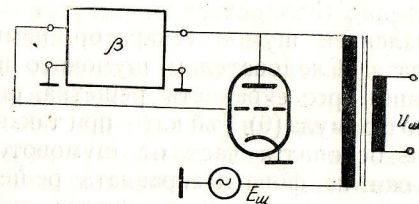
$$I_{ш} = \frac{E_{ш}}{R_i + R_a}.$$

Тогава

$$U_{ш} = E_{ш} \frac{R_a}{R_i + R_a} \quad (7)$$

Явно е, че при прилагане на обратната връзка  $U_{ш}$  се увеличава поради намаляването на  $R_i$ .

Такъв е показаният на фиг. 21 конкретен случай — прилагане на паралелна отрицателна обратна връзка (анод — анод) при използване на триодна лампа.

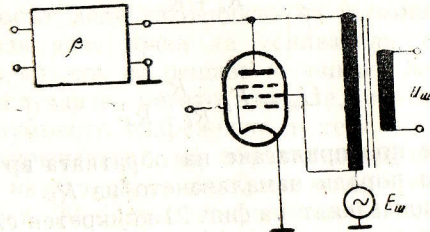


Фиг. 21

На фиг. 22 е представен друг конкретен случай на прилагане на обратна връзка, когато е използван пентод. Тук също важи изводът, направен за схемата на фиг. 20, по отношение на постъпващото на анода шумово напрежение. Обаче шумовото напрежение, което постъпва на екранната решетка, е от еквивалентен източник, който се намира вътре в обхванатия от обратната връзка усилвател. Това може



лесно да се разбере, като се обърне внимание на факта, че самата лампа е обхваната от обратна връзка, а шумовото напрежение, създавано от екранната решетка, може да се представи като напреже-



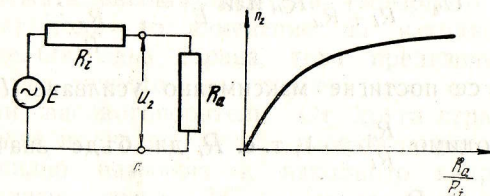
Фиг. 22

ние от еквивалентен шумов генератор, намиращ се вътре в лампата. Следователно шумовото напрежение, постъпващо чрез екранната решетка, ще се намали съгласно формула (6). Тъй като при такава схема на захранване основната част от шумовото напрежение се дължи на фона в екранната решетка, отрицателната обратна връзка причинява значително намаление на същия.

### 5. Товарна характеристика

Товарната характеристика на усилвателя представлява графически изобразената зависимост на изходното му напрежение от товарното съпротивление. Нейният характер се определя от качествата на усилвателя. Известно е, че по отношение на товарното съпротивление усилвателят представлява един

генератор (източник) на електрическа енергия. А всеки източник може да бъде представен чрез заместителната схема, показана на фиг. 23 а.



Фиг. 23

Тук  $E$  представлява е. д. с., която е равна на напрежението на изхода при изключен товар;  
 $R_i$  — вътрешното (изходното) съпротивление на усилвателя;  
 $R_a$  — товарното съпротивление;  
 $U_2$  — напрежението на изхода при включено товарно съпротивление.

Ясно е, че основният параметър, който определя товарната характеристика, е изходното съпротивление на усилвателя.

На фиг. 23б е показана товарната характеристика на нискочестотен усилвател. Тук като независима променлива се явява не товарното съпротивление  $R_a$  а отношението  $\frac{R_a}{R_i}$ .

Обикновено при усилвателите се предпочита  $R_i$  да бъде малко. Основните съображения, които налагат това, са следните:



### I. За усилвателите на напрежение

а) Постигане на максимално усилване. Наистина

$$U_2 = \frac{E}{R_i + R_a} R_a, \text{ или } \frac{U_2}{E} = \frac{R_a}{1 + \frac{R_a}{R_i}}.$$

За да се постигне максимално усилване ( $U_2 = E$ ), е необходимо  $\frac{R_a}{R_i} \gg 1$ , т. е.  $R_i$  да бъде значително по-малко от  $R_a$ .

б) Постигане на по-голяма равномерност на честотната характеристика. Наистина, ако  $R_i$  е по-голямо от  $R_a$ ,  $\frac{U_2}{E} \approx \frac{R_a}{R_i}$ , т. е. всяка промяна на  $R_a$  и  $R_i$  при изменение на честотата ще води до промяна на честотната характеристика. Това влияние ще бъде по-малко, когато  $\frac{R_a}{R_i}$  е от порядъка на единица, и съвсем ще изчезне, когато  $R_i$  е съвсем малко, т. е. когато  $\frac{R_a}{R_i} \gg 1$ .

### II. За усилвателите на мощност

Както е известно, като товар на крайните стъпала на нискочестотните усилватели, използвани в радиоприемниците, телевизорите, магнитофоните и на усилвателите за жична радиофикация и кинефикация, служат главно различни комбинации от високоговорители. Голямото изходно съпротивление на усилва-

теля в този случай има следните неблагоприятни последици:

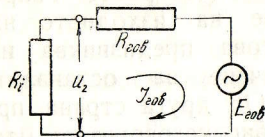
а) За усилвателите за жична радиофикация. Изменението на броя на свързаните към радиомрежата високоговорители (товарното съпротивление) води до изменение на изходното напрежение. От една страна, това предизвиква изменение на нивото на звучене на останалите включени високоговорители. От друга страна, при изключване на голям брой високоговорители товарът силно намалява и изходното напрежение се увеличава рязко. За да се предотврати опасността от пробив в различните елементи на крайните стъпала, налага се същите да се изчислят не за нормален режим на работа, а за режим, отговарящ на минималния товар. Естествено това води до оскъпяване на крайното стъпало.

б) За всички усилватели, натоварени на високоговорители. Високото изходно съпротивление на усилвателя създава твърде неблагоприятни условия за потискане на преходните процеси във високоговорителите.

Ако на един високоговорител се подаде някакъв импулс, същият, както всяка механическа система, не преустановява трептението си веднага след прекратяването на импулса. Той продължава да трепти още известно време с намаляваща амплитуда. Това представлява и самият преходен процес. Акустическият ефект от това е известно „ечене“. Най-неприятен акустически ефект се получава, когато на усилвателя се подават импулси един след друг (както това е нормално при възпроизвеждането). В този случай върху трептението от преходния процес на предния импулс се наслажда трептението от преходния процес



на следващия импулс. Получените изкривявания на възпроизвеждането вследствие преходния процес във високоговорителите се наричат акустични изкривявания вследствие преходния процес. За изясняване на влиянието на  $R_i$  върху този процес може да се използва заместителната схема, показана на фиг. 24. Тук високоговорителят е заменен с еквивалентен генератор с вътрешна е. д. с., равна на  $E_{20в}$ , която се индуктира в шпунката през време на преходния процес, и вътрешно съпротивление, равно на собственото съпротивление  $R_{20в}$  на високоговорителя. През веригата протича ток  $I_{20в}$ , чиято стойност се определя от израза



Фиг. 24

$$I_{20в} = \frac{E_{20в}}{R_i + R_{20в}}$$

Този ток създава в шпунката на високоговорителя магнитно поле, което се противопоставя на трептението на шпунката. Колкото токът  $I_{20в}$  е по-силен, толкова преходните трептения на високоговорителя затихват по-бързо. Ясно е, че за да стане това, е необходимо  $(R_i + R_{20в})$  да бъде минимално. Съпротивлението на високоговорителя се определя от конструкцията му и не може да се намали под определена стойност. При липса на обратна връзка изходното съпротивление на усилвателя е обикновено по-голямо (понякога значително) от  $R_{20в}$ . Следователно потискането на преходните процеси може да се постигне чрез намаляване на  $R_i$ .

Оказва се, че различните видове обратни връзки влияят различно върху  $R_i$  — докато едни го намаляват силно, други могат да го увеличат.

Въз основа на еквивалентната схема, показана на фиг. 23а, бе намерено, че

$$U_2 = \frac{E}{R_i + R_a} R_a, \quad (8)$$

или

$$\frac{E}{U_2} = 1 + \frac{R_i}{R_a}. \quad (9)$$

С помощта на формула (9) може да се направи преценка за влиянието на обратната връзка върху изходното съпротивление на усилвателя. Ако при разтоварване на усилвателя изходното напрежение се

променя малко (т. е. ако  $\frac{E}{U_2} \approx 1$ ), идваме до заключение, че  $R_i$  е твърде малко ( $\frac{R_i}{R_a} \ll 1$ ). Обратно, го-

лямата промяна на изходното напрежение е признак, че изходното съпротивление на усилвателя  $R_i$  е голямо.

а) Серийна обратна връзка по напрежение. Разтоварването на усилвателя (увеличаването на  $R_a$ ) води до повишаване на изходното напрежение. Повишава се и напрежението на обратната връзка. В такъв случай при отрицателна обратна връзка коефициентът на усилване, а следователно и изходното напрежение се увеличават по-малко, отколкото ако обратната връзка липсваше. При положителна обратна връзка коефициентът на усилване, а оттам и изходното напрежение се повишават.



Следователно обратната връзка по напрежение влияе различно върху изходното съпротивление на усилвателя — отрицателната го намалява, а положителната го увеличава.

Математичният анализ показва, че при отрицателна обратна връзка

$$R_{i\beta} = \frac{R_i}{1 + \beta K}, \quad (10)$$

а при положителна обратна връзка

$$R_{i\beta} = \frac{R_i}{1 - \beta K} \quad (11)$$

б) Серийна обратна връзка по ток. И тук разтоварването на усилвателя води до увеличаване на изходното напрежение. Напрежението на обратната връзка обаче намалява, тъй като то е пропорционално на изходния ток, който намалява при разтоварване.

Тогава при отрицателна обратна връзка коефициентът на усилване и изходното напрежение се увеличават още повече.

При положителна обратна връзка коефициентът на усилване, а оттам и изходното напрежение се намаляват.

Следователно отрицателната обратна връзка по ток увеличава изходното съпротивление на усилвателя, а положителната обратна връзка по ток го намалява.

Математичният анализ показва, че при отрицателна обратна връзка

$$R_{i\beta} = R_i + (1 + K_{np.x})R_\beta, \quad (12)$$

а при положителна обратна връзка

$$R_{i\beta} = R_i + (1 - K_{np.x})R_\beta. \quad (13)$$

Тук  $K_{np.x}$  е коефициентът на усилване на усилвателя без обратна връзка при празен ход;  $R_\beta$  — съпротивлението в токовата верига, от което се взема напрежението на обратната връзка.

Вижда се, че положителната обратна връзка има едно твърде ценно свойство — при нея съществува възможност изходното съпротивление да стане равно на нула. Това се постига, когато

$$R_i = -(1 - K_{np.x})R_\beta. \quad (14)$$

в) Смесена обратна връзка. Твърде често в усилвателите съществуват едновременно и двата вида обратна връзка — по ток и по напрежение. Понякога обаче те се използват съзнателно, като се комбинират подходящо с оглед да се получат добри резултати по отношение на изходното съпротивление.

От израза за изходното съпротивление на усилвателя при наличност на обратна връзка по напрежение се вижда, че същото може да се намали многократно, но не и да се сведе до нула.

Обратната връзка по ток дава възможност да се постигне пълно анулиране на изходното съпротивление. Това обаче става при положителна обратна връзка, която, както е известно, влошава редица други параметри на усилвателя.

При подходящо комбиниране на двата типа обратни връзки може да се постигне анулиране на изходното съпротивление, като останалите параметри на усилвателя се запазят или даже подобрят.

Това се постига чрез прилагане на смесена обратна връзка при подходящо подбрана дълбочина на положителната обратна връзка по ток и отрицателната обратна връзка по напрежение.



Разглеждането на влиянието на обратната връзка върху изходното съпротивление на усилвателя бе направено на базата на серийния тип обратна връзка. Оказа се, че това влияние остава същото и при паралелния тип обратна връзка.

## 6. Стабилност на коефициента на усилване

Коефициентът на усилване на усилвателя зависи от редица променящи се фактори. Затова той не остава постоянен. Един от тези фактори е стареенето на усилвателните елементи. Това стареене и свързаните с него промени в параметрите на усилвателя протича най-бързо при радиоламбите. Транзисторите практически не стареят. Върху коефициента на усилване оказват влияние също промените на мрежовото напрежение и промените на стойностите на пасивните елементи в схемата на усилвателя. Усилвателите, произведени по една и съща схема и с едни и същи елементи, имат повече или по-малко различни коефициенти на усилване. Това се дължи на неизбежните отклонения (толеранси) на елементите на схемата от номиналните им стойности.

Под стабилност на коефициента на усилване се разбира неговото постоянство при промяна на изборените по-горе фактори.

Отрицателната обратна връзка е най-доброто средство за повишаване на стабилността на коефициента на усилване. За изясняване на действието ѝ може пак да бъде разгледана основната зависимост (3) за граничния случай, когато обратната връзка е толкова дълбока, че зависимостта добива вида  $K_{\beta} = \frac{1}{\beta}$ . Ясно е, че в този случай коефициентът на усилване

на обхванатия от обратната връзка усилвател ще се определя изключително от коефициента на обратната връзка  $\beta$ . Тъй като във всички разглеждани случаи веригата на обратната връзка се състои само от пасивни елементи (съпротивления, кондензатори и др.), които при това могат да бъдат специално подбрани със стабилни стойности, налице е един практически напълно стабилен усилвател.

Разбира се, такава голяма стабилност освен в специални случаи (измерителни и други подобни усилватели) е трудно постижима и даже нежелана. Последното е лесно обяснимо — високата стабилност се изкупва с голяма дълбочина на обратната връзка и следователно с голямо намаляване на коефициента на усилване.

В общия случай изразът за стабилността на коефициента на усилване, която се дефинира като относително изменение на същия, има вида

$$\frac{\Delta K_{\beta}}{K_{\beta}} = \frac{\Delta K}{K} \cdot \frac{1}{1 + \beta K} \quad (15)$$

Тук  $\Delta K$  е едно малко изменение на коефициента на усилване без обратна връзка;

$\frac{\Delta K}{K}$  — стабилността на коефициента на усилване без обратна връзка;

$\Delta K_{\beta}$  — едно малко изменение на коефициента на усилване с обратна връзка;

$\frac{\Delta K_{\beta}}{K_{\beta}}$  — стабилността на коефициента на усилване при наличност на обратна връзка.

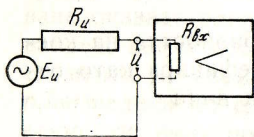
Вижда се, че вследствие прилагането на обратната връзка стабилността на коефициента на усилване се увеличава  $(1 + \beta K)$  пъти.



## 7. Входно съпротивление

Всеки усилвател представлява товарно съпротивление за източника на входния сигнал. В разглежданите случаи източникът може да има най-разнообразни електрически параметри. Така например параметрите на детектора в приемника за амплитудно модулирани сигнали се различават от данните на детектора в приемника за честотно модулирани сигнали. Твърде различни са параметрите на грамофонната кристална мембрана, на микрофона, на възпроизвеждащата глава на магнитофона и т. н.

Въпреки голямото разнообразие в параметрите всички източници могат да бъдат представени с



Фиг. 25

една заместителна схема, която е показана на фиг. 25. Тя представлява схема на екивалентен генератор с вътрешна е. д. с.  $E_u$ , равна на изходното напрежение на източника, и вътрешно съпротивление  $R_u$ , равно на въ-

трешното (изходното) съпротивление на същия.

За да може напрежението  $E_u$  да се подаде без всякакви изкривявания и изцяло на входа на усилвателя, необходимо е  $R_{вх} \gg R_u$ . Наистина

$$\frac{U}{E_u} = \frac{R_{вх}}{R_u + R_{вх}}.$$

При спазване на горното условие изразът се превръща в  $\frac{U_{вх}}{E_u} = 1$ , т. е.  $U_{вх} = E_u$ .

На практика е необходимо входното съпротивление на усилвателя да бъде по възможност по-голямо.

Какво е влиянието на обратната връзка върху входното съпротивление на усилвателя?

а) *Серийна обратна връзка.* Определянето на входното съпротивление на усилвателя може да се извърши лесно, като се припомни, че то представлява отношение на входното напрежение към тока, протичащ във входната верига на усилвателя. Входът на усилвателя, обхванат от серийна обратна връзка, и присъединеният към него източник са посочени на фиг. 26а.

$$\text{В този случай } R_{вх \cdot \beta} = \frac{U}{I} = \frac{U_1 \pm U_\beta}{I}.$$

Но  $\frac{U_1}{I} = R_{вх}$  представлява входното съпротивление на самия усилвател без обратна връзка.

Тогава

$$R_{вх \cdot \beta} = R_{вх} \pm \frac{U_\beta}{I}.$$

При наличност на отрицателна обратна връзка знакът пред  $\frac{U_\beta}{I}$  е плюс. Затова входното съпротивление на усилвателя с обратна връзка е по-голямо от това на усилвателя без обратна връзка.

При положителна обратна връзка знакът пред  $\frac{U_\beta}{I}$  е минус. Затова входното съпротивление на усилвателя с обратна връзка е по-малко от входното съпротивление на усилвателя без обратна връзка. По-точният анализ показва, че за  $R_{вх \cdot \beta}$  важат зависимостите:

$$R_{вх \cdot \beta} = R_{вх} (1 + \beta K) \quad (15a)$$

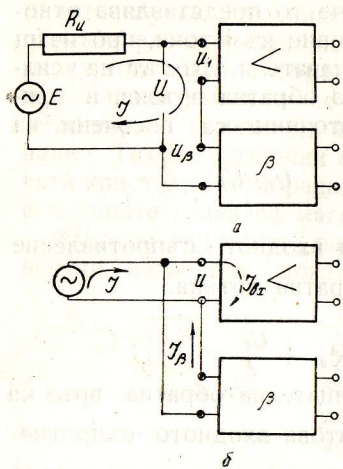
при отрицателна обратна връзка и

$$R_{вх \cdot \beta} = R_{вх} (1 - \beta K) \quad (15б)$$

при положителна обратна връзка.



б) *Паралелна обратна връзка.* Заместителната схема на входа на усилвателя, обхванат от този тип обратна връзка, и присъединения към него източник е посочена на фиг. 26б.



Фиг. 26

Тук входното напрежение  $U$  остава постоянно при наличие и отсъствие на обратната връзка. Токът  $I$  представлява сума или разлика от тока  $I_{вх}$  и тока  $I_{\beta}$ , дължащ се на обратната връзка.

$$R_{вх \cdot \beta} = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_{вх} \pm I_{\beta}}$$

Вижда се, че в зависимост от големината и знака на  $I_{\beta}$  входното съпротивление  $R_{вх \cdot \beta}$  може да приема различни стойности.

По-точният анализ дава за  $R_{вх \cdot \beta}$  зависимостите

$$R_{вх \cdot \beta} = \frac{R_{вх}}{1 + (1+K) \frac{R_{вх}}{R_{\beta}}} \quad (16)$$

при отрицателна обратна връзка и

$$R_{вх \cdot \beta} = \frac{R_{вх}}{1 + (1-K) \frac{R_{вх}}{R_{\beta}}} \quad (17)$$

при положителна обратна връзка.

Тук  $R_{\beta}$  е еквивалентното съпротивление на генератора на обратната връзка.

От горните два израза се вижда, че докато отрицателната обратна връзка винаги намалява входното съпротивление на усилвателя, положителната го увеличава, като може да го направи безкрайно голямо и дори отрицателно.



### 3. САМОВЪЗБУЖДАНЕ НА РАДИОПРИЕМНИТЕ И УСИЛВАТЕЛНИ УСТРОЙСТВА

#### 1. Самовъзбуждане вследствие паразитни обратни връзки

Паразитните обратни връзки са постоянните нежелани спътници както на нискочестотните, така и на високочестотните усилватели. Те могат да бъдат положителни и отрицателни. Отрицателните обратни връзки намаляват общото усиление. При достатъчна дълбочина и внасяне на големи фазови измествания положителната обратна връзка може да доведе усилвателя до състояние на самовъзбуждане. Аналогичен е и случаят, когато усилвателят е обхванат от дълбока отрицателна връзка, при която факторът  $\beta K = 1$ . Тогава отрицателната обратна връзка преминава в положителна и създава условия за самовъзбуждане.

Усилвателят, доведен до състояние на самовъзбуждане, е неспособен да усили повече подадените му сигнали. Затова при всички случаи явлението самовъзбуждане е недопустимо за нормалната работа на един усилвател. Нещо повече, последният трябва да работи в режим, който е далеч от състоянието на самовъзбуждане с цел да се получи стабилно усиление при нормалната за практиката стойност на стойностите на елементите на усилвателя.

Самовъзбуждането може да настъпи независимо от това, дали на входа на усилвателя се подава или не променливо напрежение. Веднаж доведен до състояние, близко до самовъзбуждане, усилвателят

започва да генерира при наличието на всеки сигнал, чиято честота влиза в пропусканата лента на усилвателя. Такива сигнали представляват собствените или външните шумове или импулсите, предизвикани от захранващия източник.

В радиоприемниците самовъзбуждането се характеризира с появяване във високоговорителя на свистене, пукане или шум, наподобяващ шума от мотора на моторна лодка (мотор ботинг).

Възможните паразитни обратни връзки, които довеждат един усилвател до състояние на самовъзбуждане, са най-разнообразни. Това са връзки между входа и изхода на отделните усилвателни стъпала или целия усилвател, дължащи се на различни взаимодействия от индуктивен, капацитивен или друг характер между елементите на усилвателя.

Съществуват следните основни видове паразитни обратни връзки:

а) обратна връзка между изхода и входа на усилвателното стъпало, дължаща се на междуелектродния паразитен капацитет на лампата;

б) индуктивна паразитна обратна връзка;

в) паразитна обратна връзка чрез захранващия източник;

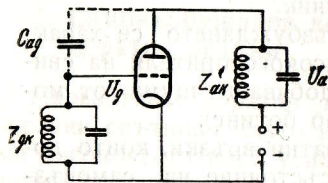
г) електроакустическа обратна връзка.

а) *Паразитна обратна връзка чрез междуелектродния капацитет.* Паразитната обратна връзка чрез междуелектродния капацитет е характерна в резонансните и междинночестотните усилватели за радиоприемниците. Затова физическите процеси на самовъзбуждането ще се разгледат чрез схемата на едностъпален резонансен усилвател (фиг. 27).

Изхожда се от условието, че на входа на усилвателя не се подава сигнал. Колебателният процес



може да възникне произволно под действието на случаен импулс. Такъв импулс може да бъде напрежение на топлинен или друг шум, както и произволното нарастване на постоянния ток в анодната



Фиг. 27

верига при включване на захранващия източник. В този случай за начало на самовъзбуждането на усилвателното стъпало се приема краткотрайното изменение на постоянния ток в бобината на анодния кръг. То е напълно достатъчно, за да възникне е. д. с. в кръга, поради което се получава променливото напрежение  $U_a$ . То се прилага на делителя на напрежение, състоящ се от паразитния кондензатор анод-решетка  $C_{ag}$  и съпротивлението на решетъчния кръг  $Z_{gk}$ . Напрежението върху решетъчния кръг се подава на решетката на лампата и се явява управляващо за анодния ток. Изменящият се аноден ток на лампата създава в анодния трептящ кръг незатихващи колебания. По този начин усилвателят се превръща в автогенератор. Автоколебанията ще продължават дотогава, докато променливата съставна на анодния ток е достатъчна, за да компенсира активните загуби на кръга. На свой ред големината на променливата съставна на анодния ток се определя от променливото напрежение на решетъчната верига на лампата. Последното пък зависи от съотношенията на съпротивленията в рамената на делителя. За да не се създадат условия за самовъзбуждане на усилвателното стъпало, необходимо е решетъчното напрежение да бъде малко. Това условие е

налице, когато паразитният кондензатор  $C_{ag}$  е малък. Тогава по-голямата част от анодното напрежение  $U_a$  остава приложена върху  $C_{ag}$ , а останалата част, която е недостатъчна за разколебаването (самовъзбуждането) на стъпалото, остава върху съпротивлението на решетъчния кръг  $Z_{gk}$ .

Усилването на усилвателя е стабилно, когато усилвателят не се самовъзбужда и е далеч от състоянието на самовъзбуждане. Максималният възможен коефициент на усилване, при който усилването на усилвателя е стабилно, се нарича устойчив коефициент на усилване. Той се определя по следната формула:

$$K_{уст} \leq 0,42 \sqrt{\frac{S}{\omega C_{ag}}} \quad (18)$$

От нея следва, че усилването зависи много от типа на употребената лампа. Най-голямо устойчиво усилване се постига при лампа с малък паразитен кондензатор анод-решетка  $C_{ag}$  и голяма стръмност  $S$ . Колкото отношението  $\frac{S}{C_{ag}}$  е по-голямо, толкова работата на усилвателя е по-устойчива. На това условие отговарят преди всичко пентодните лампи, които се употребяват най-много във високочестотните усилватели. От формулата следва още, че устойчивият коефициент на усилване зависи и от честотата  $\omega$ . Колкото е по-висока честотата, толкова условието за устойчива работа се постига по-трудно, защото капацитивното съпротивление  $\frac{1}{\omega C_{ag}}$  намалява, а с това дълбочината на паразитната обратна връзка се увеличава.

От изложеното дотук следва, че коефициентът на усилване на стъпалото  $K$  не трябва да преви-



шава устойчивия коефициент на усилване  $K_{уст}$  (форм. 18). Това се постига чрез подходящ подбор на типа на лампата и на резонансното съпротивление на анодния кръг. Оттук следва, че в практиката не може едни и същи междинночестотни трансформатори (филтри) да се употребяват при различни лампи и още по-малко в различни радио- и телевизионни приемници.

б) *Индуктивна и капацитивна паразитна обратна връзка.* Индуктивните и капацитивните паразитни обратни връзки възникват от съществуващите разсеяни магнитни полета, които се създават в резултат от протичането на токове през проводниците, бобините, трансформаторите и др., които могат да бъдат близкостящи и успоредни помежду си. Тези обратни връзки могат да бъдат значителни. При неподходящо подреждане на изброените елементи върху шасито на усилвателя може да се получат силни паразитни обратни връзки от споменатия тип.

Ефектът на индуктивната паразитна обратна връзка е приблизително еднакъв с този на капацитивната обратна връзка. Резултатът от нея може да бъде също самовъзбуждане на усилвателя.

За намаляване влиянието на паразитната индуктивна обратна връзка в практиката се прилагат следните мерки.

Отдалечаване на проводниците на входната и изходната верига на лампите и избягване на тяхното паралелно монтиране.

Увеличаване разстоянието между различните видове трансформатори и практическо установяване на тяхното разположение един спрямо друг и спрямо останалите елементи на схемата така, че да се получи възможната най-слаба магнитна връзка между тях.

Екраниране на проводници, бобини, прехвърлящи кондензатори и др., чрез които може да се прехвърли енергия по магнитен път от една верига в друга.

Екраниране на трансформаторите, които се поставят в един или няколко екрана от феромагнитен материал. В повечето случаи е достатъчно да се екранира само един от трансформаторите и винаги входният, ако има такъв. Малко разсеяно магнитно поле имат тороидалните трансформатори.

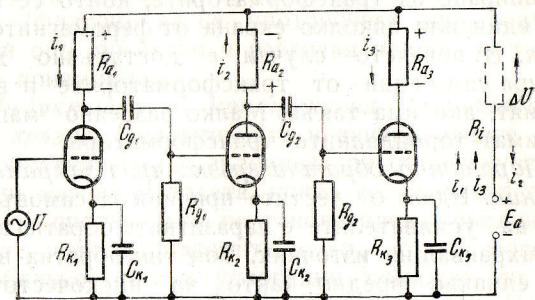
в) *Паразитна обратна връзка чрез захранващия източник.* Една от честите причини за самовъзбуждане на усилвателите е паразитната обратна връзка чрез захранващия източник. Тоя тип обратна връзка влияе еднакво вредно както на нискочестотните, така и на високочестотните усилватели. Освен от общия постояннотоков захранващ източник тоя вид обратна връзка може да се създаде и от източника на отоплителните вериги на отделните лампи.

В този случай елемент на обратната връзка е вътрешното съпротивление на източника на захранването. Процесите на самовъзбуждането се илюстрират най-добре с един тристъпален нискочестотен усилвател, какъвто е този, показан на фиг. 28.

Предполага се, че вследствие колебанията на анодните токове в отделните стъпала на усилвателя на решетката на първата лампа ще се появи положителна полувълна на напрежението, т. е. решетката ще получи положителен потенциал. Той ще предизвика увеличаване на анодния ток на първата лампа и променливата съставна на същия ток ще бъде еднаква по посока с тая на постоянния ток. На схемата тази променлива съставна е означена с  $i_1$ . Поради това, че всяко усилвателно стъпало



обръща фазата на подаденото му напрежение на  $180^\circ$ , решетката на втората лампа ще получи отрицателен потенциал. С това тя става по-отрицателна. В резултат от това анодният ток на втората лампа се на-



Фиг. 28

малява, като посоката на променливата му съставна ще бъде обратна на посоката на постоянната му съставна. По аналогичен начин решетката на третата лампа ще стане по-положителна и анодният ѝ ток ще се увеличи. Посоката на променливата съставна на същия ще бъде еднаква с тази на тока на първата усилвателна лампа. Като се вземе пред вид усиляването на стъпалата, следва да се приеме, че сумата от моментните стойности на токовете  $i_1$  и  $i_3$  ще бъде по-голяма от тока  $i_2$ , тъй като  $i_3 > i_2 > i_1$ . Моментната стойност на сумата от токовете  $i_1 + i_3 - i_2$ , минаващи през източника на захранването, ще създаде върху неговото вътрешно съпротивление моментното падение на напрежение  $\Delta U_1$ . Посоката на това напрежение ще съвпада с тази на токовете  $i_1$  и  $i_3$ . Следователно поляритетът

на напрежението  $\Delta U_1$  ще съвпада с поляритета на напрежението върху товарното съпротивление на първата лампа и ще се сумира с него. Поради това променливото напрежение на решетката на втората лампа ще се увеличи. Това значи, че там е налице положителна обратна връзка. В зависимост от дълбочината ѝ за отделните честоти тази обратна връзка може да доведе усилвателя до състояние на самовъзбуждане.

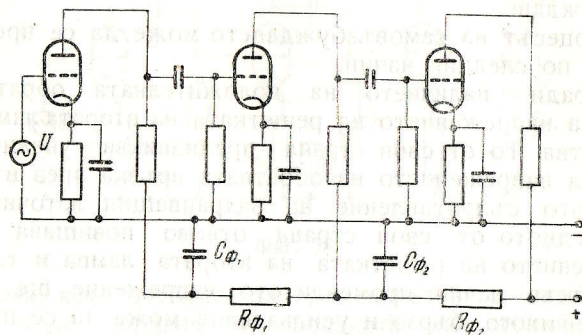
Процесът на самовъзбуждането може да се представи по следния начин.

Поради наличието на положителната обратна връзка напрежението на решетката на втората лампа нараства. То от своя страна предизвиква увеличаване на напрежението на обратната връзка чрез вътрешното съпротивление на захранващия източник. Последното от своя страна отново повишава напрежението на решетката на втората лампа и т. н. По такъв начин променливото напрежение ще нарасне много бързо и усилвателят може да се превърне в генератор на собствени колебания.

При двустъпалния усилвател не съществуват условия за създаване на такава положителна обратна връзка. Паразитната обратна връзка през захранващия източник е толкова по-слаба, колкото е по-малко вътрешното съпротивление на захранващия източник. Последното може да се намали изкуствено, като паралелно на изхода на захранващия източник се включи електролитен кондензатор с достатъчно голям капацитет ( $50 \div 100$  мкф). Това е особено задължително при схеми с транзистори, които се захранват с батерии, чието вътрешно съпротивление расте през време на експлоатацията. При ламповите и селеновите изправители ролята на блокиращ кон-



дензатор изпълнява последният електролитен кондензатор на изглаждащия филтър. Най-ефикасното и най-често употребяваното в практиката средство за отстраняване на условията за самовъзбуждане на усилвателя са развързващите (декуплиращи) Г-образни филтри, състоящи се от съпротивленията  $R_{\phi}$  и кондензаторите  $C_{\phi}$  (фиг. 29).



Фиг. 29

Г-образният филтър може да се разглежда като делител на напрежение (фиг. 30).

На входа на филтъра са включени две напрежения, съответстващи на два източника. Единият от тях е за постоянното захранващо напрежение  $E$ , а другият — за променливото напрежение  $\Delta U$ . Последното се разпределя пропорционално на съпротивленията от делителя на филтъра  $R_{\phi}$  и  $X_{C_{\phi}}$ . Напрежението върху кондензатора  $E' + \Delta U'$  се подава на анода на усилвателните лампи. В зависимост от съотношението на съпротивленията  $R_{\phi}$  и  $X_{C_{\phi}}$  про-

менливото напрежение на изхода на филтъра  $\Delta U'$  може да се намали в сравнение с напрежението  $\Delta U$  500 до 1000 пъти, докато постоянното напрежение  $E'$  става равно на  $(0,6 \div 0,9) E$ .

Капацитетът на кондензатора  $C_{\phi}$  се движи в границите от 0,2 до 16 мкф за нискочестотните усилватели и от 0,05 до 0,2 мкф за високочестотните усилватели.

Стойността на съпротивленията  $R_{\phi}$  се движи в границите от 10 до 200 ком за нискочестотните усилватели и от 1 до 5 ком за високочестотните усилватели.

Отношението  $\frac{\Delta U'}{\Delta U}$  се нарича коефициент на филтрацията и се бележи с  $K_{\phi}$ . Той се изразява със следния приблизителен израз:

$$K_{\phi} \cong R_{\phi} \omega C_{\phi}, \quad (19)$$

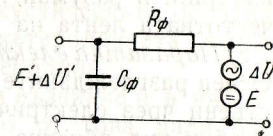
когато

$$R_{\phi} \omega C_{\phi} \gg 1.$$

Последното неравенство е необходимо условие за по-голяма ефикасност на филтъра.

От формула (19) се вижда, че колкото честотата е по-висока, толкова филтърът е по-ефикасен.

Ако елементите на филтъра  $R_{\phi}$  и  $C_{\phi}$  не са достатъчно големи и честотата е много ниска, филтърът е неефикасен. Тогава може да се създадат условия за генерация. Такава генерация или самовъзбуждане има звуков ефект, наподобяващ мотор ботинг. В такива случаи се прибегва до стесняване на пропускащата честотна лента на усилвателя откъм ниските зву-



Фиг. 30



кови честоти. Това най-лесно се постига чрез намаляване капацитета на прехвърлящите кондензатори в схемата. Разбира се, това намаляване трябва да се извърши в разумни граници, за да не пострада много честотната лента на усилвателя.

2) *Паразитна електроакустическа обратна връзка.* Освен разглежданите видове обратни връзки, осъществени чрез електрически вериги, съществува и един особен вид обратна връзка, наречена електроакустическа. Последната се реализира чрез акустическа среда. В радиоприемниците тази обратна връзка е често явление поради наличието на акустическа среда — високоговорители, кутия, въздух, шаси и др. Необходимите за затваряне на веригата елементи, преобразуващи звуковите колебания, също са налице — променлив кондензатор, лампи и др.

Тъй като принципно действието на такава обратна връзка съответствува на работата на микрофона, тя се нарича микрофонен ефект.

Микрофонният ефект в радиоприемниците се появява под действието на звуковите вълни, излъчвани от високоговорителя. Те предизвикват вибриране на елементите на радиоприемника (лампата на честотния преобразувател, променливия кондензатор, високо-честотните бобини, свързващите проводници, елементите на ниско-честотните стъпала и др.). Звуковите колебания от високоговорителя въздействуват чрез акустичната въздушна среда например върху пластинките на променливия кондензатор, включен в осцилаторния кръг на приемника. Те се разтрептяват и започват да изменят стойността на работния капацитет в такт с падащите от високоговорителя звукови вълни. В резултат от това честотата на междинно-честотния усилвател се мени и в зависимост от до-

пълнително внесените фазови измествания може да възникне самовъзбуждане. Аналогично явление се развива и ако действието на акустическата обратна връзка се осъществява чрез хетеродинната лампа или елементите, свързани с хетеродина.

Микрофонният ефект може да възникне и в ниско-честотния усилвател (независимо от това, дали последният е включен в радиоприемник, грамофон, магнитофон и др.), ако неговите лампи попаднат под действието на създадените от високоговорителя звукови вълни и ако входът му е много чувствителен (например микрофонен усилвател). Тези колебания предизвикват изменения на анодния ток и усилвателят започва да микрофонира. Звуковият ефект, който се чува от високоговорителя вследствие микрофонията, има характер на ниско-честотен сигнал с честота  $50 \div 100$  хц или на сигнал с честота  $1000 \div 3000$  хц.

Борбата с микрофонния ефект е много трудна, защото тя обикновено е свързана с конструкцията в цялост. Това налага още при проектирането на отделните устройства да се провери дали съществува такъв ефект и да се набележат конструктивни и електрически мерки за неговото отстраняване. Най-ефикасни мерки за борба с микрофонния ефект са: използване на стабилен променлив кондензатор (за да не се подават пластинките му на механически трептения) и стегнат добре разположен монтаж с възможно най-къси съединителни проводници около хетеродина. Други мерки са отдалечаване на високоговорителите от шасито, респ. от променливия кондензатор, и разкъсване веригата на акустическата обратна връзка с гумени амортизъри. С последните високоговорителят се отделя от кутията, кутията —



от шасито, променливият кондензатор — от шасито и цоклите на лампите — от шасито.

## 2. Самовъзбуждане на усилвател с отрицателна обратна връзка

Едно от сериозните препятствия, което спира въвеждането на отрицателната обратна връзка в практиката, е възможността да възникне самовъзбуждане. Както вече се спомена, при определени условия отрицателната обратна връзка може да промени знака си и да премине в положителна. С това усилването се увеличава и при определена честота и дълбочина на връзката е възможно да възникне самовъзбуждане. А такива условия често са налице.

Усилвателят, обхванат от обратна връзка, представлява затворена верига на едно или няколко стъпала, в които се подават напрежения последователно от вход към изход и след това по веригата на обратната връзка — от изхода отново към входа. В тая затворена верига са включени редица лампи и активни и реактивни елементи (съпротивления, бобини, дросели, трансформатори и др.), които влияят по най-различни начини върху фазата на усилването напрежение. В повечето практически случаи на свързване всяка лампа обръща фазата на напрежението от решетката до анода на  $180^\circ$ . Към това фазово изместване се прибавят и други допълнителни измествания, причинени от реактивни елементи, индуктивни и капацитивни паразитни обратни връзки, разсеяни магнитни полета и др. Поради това при отрицателната обратна връзка стабилизирането на необходимите измествания от  $180^\circ$  представлява голяма трудност в многостъпалните усилвателни схеми, особено когато последните

имат и широка честотна лента. Ако за някоя честота фазовите измествания, обусловени от изброените елементи, създадат допълнителен фазов ъгъл от още  $90^\circ$ , обратната връзка преминава от отрицателна в положителна и тогава усилвателят може да се самовъзбуди за тая честота. Обикновено значителни фазови измествания се наблюдават главно в граничните честоти на пропусканата от усилвателя честотна лента. Следователно самовъзбуждането се появява най-често за честотите извън работния обхват. Самовъзбуждането за такива случаи често не се проявява с характерните звукови сигнали или шумове. Затова справянето с него е по-трудно. Нещо обикновено е част от енергията на захранващия източник да се превърне в незатихващи колебания и отдадената полезна мощност в изходния товар да е значително малка. Последното говори, че е налице не напълно възбуден усилвател. Това може да се установи лесно с осцилограф, на чийто екран се виждат двата вида напрежения — полезното и наложеното върху него колебание на генерацията.

Устойчивата работа на усилвател с отрицателна обратна връзка зависи силно от броя на стъпалата, обхванати от същата. При конструирането на такъв усилвател трябва да се държи сметка кои негови параметри трябва да се подобряват с цел да се определи броят на стъпалата, върху които ще се разпростре влиянието на отрицателната обратна връзка. Всяко излишно увеличаване на броя на стъпалата, обхванати от влиянието на обратната връзка, увеличава нестабилността на усилвателя.

При прилагане на обща отрицателна обратна връзка най-подходяща междустъпална връзка за усилвателите се явява съпротивително-капацитивната, тъй



като тя причинява малки и плавно изменящи се фазови измествания, които не надминават  $90^\circ$  за всяко стъпало. Поради това всяко усилвателно стъпало с  $RC$ -връзка може да бъде обхванато от произволно дълбока честотно независима обратна връзка, без ни най-малко да се наруши устойчивостта на усилването при експлоатация. Две стъпала с  $RC$ -връзка, обхванати от честотно независима обратна връзка, теоретически трябва да бъдат устойчиви при всяка дълбочина на същата. Това на практика не се получава поради допълнително внесените фазови измествания от съществуващите в схемата паразитни обратни връзки.

Дроселната междустъпална връзка в усилватели, обхванати от отрицателна обратна връзка, е по-неподходяща от съпротивително-капацитивната, тъй като големият собствен паразитен капацитет на дросела обуславя фазови измествания повече от  $90^\circ$ .

Най-неподходяща междустъпална връзка е трансформаторната, която, особено за високите честоти, внася фазови измествания, стигащи до няколко стотици градуси при ненатоварени трансформатори. Затова обхващането на многостъпален усилвател с отрицателна обратна връзка трябва да се избягва, когато отделните стъпала са свързани чрез трансформатори. Ако все пак във веригата на обратната връзка се намира например изходният трансформатор, желателно е напрежението на обратната връзка да се снесе от първичната намотка на същия. По този начин изходният трансформатор ще влиза частично във веригата на обратната връзка и при по-дълбока връзка ще внася по-малки фазови измествания. Така е изпълнена обратната връзка в усилвателите за жич-

на радиофикация ТУ100 и ТУ600, производство на Електроакустичния завод — Михайловград.

Когато се налага целият трансформатор да бъде обхванат от отрицателна обратна връзка (например за намаляване нелинейните изкривявания, внесени от самия него), трансформаторът трябва да бъде натоварен с активен товар. С това намаляват силно внесените от трансформатора фазови измествания за ниските и високите честоти. В практиката активното натоварване е намерило най-голямо приложение при драйверните и входните трансформатори.

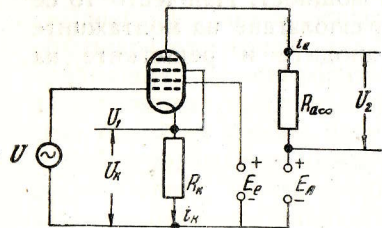
Самовъзбуждане може да се получи и на свръхвисоки честоти. То се среща предимно при двутактните усилватели с голяма мощност. Най-често то се появява при симетрично разполагане на монтажните проводници, свързващи анодите и решетките на лампите.



Ще бъдат разгледани най-основните схеми на обратна връзка, които са намерили приложение в нискочестотните усилватели.

### 1. Обратна връзка чрез катодното съпротивление

На фиг. 31 е показана схема на усилвател с отрицателна обратна връзка по ток чрез катодното съпротивление на лампата. Обратната връзка има следното действие.



Фиг. 31

това резултатното напрежение  $U_1$  на решетката на лампата е по-малко от напрежението  $U$  на източника. Това говори за наличие на отрицателна обратна връзка. Тя намалява коефициента на усилване и увеличава входното и изходното съпротивление на усилвателното стъпало. След като се преработи форм. 3, коефициентът на усилване на стъпалото при активен товар получава следния израз:

$$K_{\beta} = \frac{K}{1 + S_{dk} R_k}, \quad (20)$$

където  $K$  е коефициентът на усилване на стъпалото при отсъствие на  $R_k$ ;

$S_{dk}$  — динамичната стръмност на характеристиката на катодния ток.

Изразът  $(1 + S_{dk} R_k) \approx 2 \div 3$ . От това следва, че наличието на обратната връзка чрез катодното съпротивление намалява усилването 2—3 пъти.

За триодната лампа катодният ток е равен на анодния (при условие, че лампата работи без решетъчен ток). Поради това динамичната стръмност на характеристиката на катодния ток  $S_{dk}$  е равна на динамичната стръмност на характеристиката на анодния ток  $S_a$ . При наличие на съпротивлението  $R_k$  последната се определя от израза

$$S_a = \frac{S}{1 + \frac{R_{a\infty} + R_k}{R_i}} \quad (21)$$

Тук  $S$  е статичната стръмност на характеристиката в работната точка;

$R_{a\infty}$  — товарното съпротивление на лампата.

За екранирана лампа  $R_i \gg R_{a\infty} + R_k$ .

Затова

$$S_{dk} = S_k = S \frac{I_{ao} + I_{eo}}{I_{ao}} \quad (22)$$

Тук  $I_{ao}$  е анодният ток на покой, а;

$I_{eo}$  — токът на екранната решетка.

При наличие на такава обратна връзка коефициентът на нелинейните изкривявания може да се изчисли с помощта на израза 3, който след преработка дава:



за триод

$$k_{\beta} = \frac{k}{1 + S_d R_k}; \quad (23)$$

за екранирана лампа

$$k_{\beta} = \frac{k}{1 + S_k R_k}. \quad (24)$$

Тук  $k$  е коефициент на нелинейните изкривявания без обратна връзка.

Изходното съпротивление на усилвателя се изчислява съответно по следните формули:

за триод

$$R_{i\beta} = R_i + (1 + K_{n.p.x}) R_k;$$

за екранирана лампа

$$R_{i\beta} = R_i (1 + S_k R_k),$$

където  $K_{n.p.x} = \mu$ .

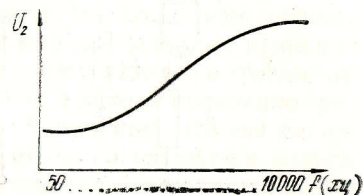
Шунтирането на съпротивлението  $R_k$  с един кондензатор, чийто капацитет е от порядъка на 30—100 мкф, дава накъсо променливото напрежение върху катодното съпротивление. Тогава обратната връзка по променливо напрежение престава да съществува. При малък капацитет катодният кондензатор дава накъсо напрежението на обратната връзка само за високите честоти. В този случай обратната връзка е честотно зависима и представлява удобно средство за коригиране на честотната характеристика при необходимост от повдигане на високите честоти. Това повдигане се обяснява по следния начин.

Катодният кондензатор има честотно зависим импеданс, който за високите честоти е минимален. По-

ради това за същите честоти напрежението върху съпротивлението  $R_k$  ще бъде минимално и няма да влияе върху резултантното напрежение на решетката на лампата. По този начин напреженията с високи честоти запазват характера си такъв, какъвто го получават от източника на сигнала  $U$ . Обратно, за ниските честоти импедансът на кондензатора  $C_k$  ще бъде голям, а напрежението върху съпротивлението  $R_k$  — също голямо. В случая това напрежение се явява като напрежение на обратната връзка. То се събира с напрежението на източника  $U$ . Двете напрежения са в противофаза. Резултантното напрежение  $U_1$  на решетката на лампата ще бъде по-малко от напреженията с високи честоти. Следователно обратната връзка за ниските честоти предизвиква потискане на същите. В краен резултат честотната характеристика на усилвателя добива вида, показан на фиг. 32.

Друго свойство на този вид обратна връзка е намаляването на напрежението на шумовете. Това следва от увеличаването на вътрешното съпротивление на лампата, което образува делител на напрежение с товарното съпротивление. По-

голяма част от напрежението на шумовете остава върху вътрешното съпротивление на лампата и по-малка — върху товарното съпротивление. Тази обратна връзка е намерила широко приложение в усилвателите с транзистори. Както е из-



Фиг. 32

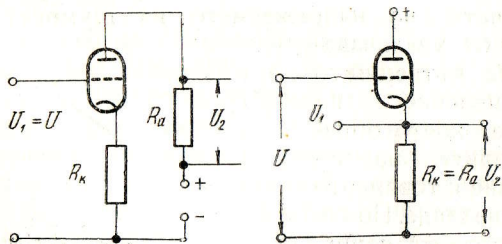


вестно, транзисторният усилвател има много малко входно съпротивление (до 1000 ом) и изходно съпротивление от порядъка на десетки и стотици ком. Тази обратна връзка, приложена към транзисторно усилвателно стъпало, повишава входното му съпротивление. В резултат от това се подобрява напасването между две стъпала и оттам се получава по-голямо усилване.

Аналогично е действието и на обратната връзка, която се получава, когато съпротивлението  $R_{g2}$  във веригата на екранната решетка не се шунтира с кондензатор  $C_{g2}$ .

## 2. Катоден усилвател (повторител)

Катодният повторител е усилвателно стъпало, чието товарно съпротивление е включено в катодната верига на лампата (фиг. 33б). За разлика от стъпалото



Фиг. 33

с аноден товар (фиг. 33а), в което напрежението  $U_1$  е равно на напрежението  $U$ , в стъпалото с катоден товар (фиг. 33б) управляващото напрежение  $U_1$  е равно

на разликата между входното и изходното напрежение на стъпалото:

$$U_1 = U - U_2.$$

По такъв начин катодният усилвател внася 100% отрицателна обратна връзка по напрежение, която има характер на последователна обратна връзка спрямо входната верига. Това следва и от едновременното участие на товарното съпротивление в анодната и решетъчната верига на лампата. Поради това целият променливотоков потенциал на това съпротивление се подава обратно във входа на лампата.

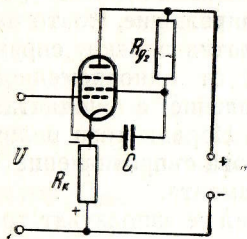
Най-често за катоден усилвател се използват триодни лампи или пентодни лампи в триодно включване. Ако се налага да се употреби пентод в пентодно включване, трябва екранната решетка да има нула променлив потенциал спрямо катода на лампата. Това може да се реализира, като захранването на екранната решетка стане чрез гасящо съпротивление  $R_{g2}$  и между катода и екранната решетка на лампата се включи кондензатор  $C_{g2}$  (фиг. 34).

Схемата на фиг. 33б може да бъде използвана само в случай, че постоянната съставна на напрежението върху катодното съпротивление е равна на необходимото за режима на лампата постоянно решетъчно преднапрежение. В противен случай се използва делител на напрежение в катодната верига (фиг. 35). Тази схема е приложима, когато захранващият източник има малко вътрешно съпротивление и утечното съпротивление е голямо в сравнение с катодния товар.

Наличността на дълбока отрицателна обратна връзка в катодния усилвател определя всички негови свойства. Очевидно коефициентът на усилване ще бъде



по-малък от единица, тъй като изходното напрежение  $U_2$  представлява част от напрежението на входа  $U$ .



Фиг. 34

Коефициентът на усилване на катодния усилвател се определя от формула 3, която важи за усилвателно стъпало, обхванато от отрицателна обратна връзка:

$$K_{\beta} = \frac{K}{1 + \beta K}$$

В този израз  $\beta$  е отношението на напрежението на обратната връзка  $U_{\beta}$  към изходното напрежение на усилвателя  $U_2$ . В случая двете напрежения са еднакви поради наличието на 100% обратна връзка. Затова  $\beta = 1$ . Следователно коефициентът на усилване на катодния усилвател ще бъде

$$K_{\beta} = \frac{K}{1 + K} < 1.$$

Поради това, че коефициентът на усилване  $K$  е приблизително равен на вътрешния коефициент на

усилване  $\mu$  на лампата, еквивалентният вътрешен коефициент на усилване ще бъде

$$\mu_e \cong K_{\beta} = \frac{K}{1 + K} \cong \frac{\mu}{1 + \mu}. \quad (25)$$

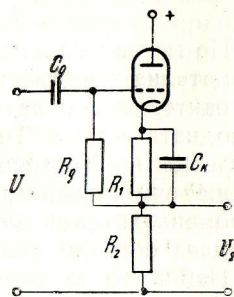
От последния израз може лесно да се изчисли коефициентът на усилване на катодния усилвател, като за  $\mu$  се използват данните от каталога. Колкото  $\mu$  е по-голям, толкова коефициентът  $K_{\beta}$  се приближава до 1.

При  $K_{\beta} \approx 1$  входното напрежение ще бъде равно на изходното. Оттук следва, че катодният усилвател не усилва, а само повтаря подаденото му напрежение, запазвайки неговия поляритет. Поради това катодният усилвател е получил в практиката и названието катоден повторител. Коефициентът на усилване  $K_{\beta}$  е средно 0,9.

Свойствата и изразите, характеризиращи катодния усилвател, могат лесно да се получат, като се има пред вид, че по същество той представлява усилвател, обхванат от обратна връзка по напрежение. Затова е понятно защо се намалява коефициентът на усилване. По същата причина се намалява и изходното съпротивление на стъпалото. Съгласно изр. 10 той добива следния вид:

$$R_{i\beta} \cong \frac{R_i}{1 + \mu} \approx \frac{R_i}{\mu} = \frac{1}{S}. \quad (26)$$

Последният израз показва, че изходното съпротивление на катодния повторител е по-малко от реципрочната стойност на стръмността на характеристиката на лампата. Тъй като стръмността на ламповата характеристика се движи между 1 и 10 ма/в, изходното съпротивление получава стойности между 100 и 1000 ом.



Фиг. 35



Известно е, че изходното съпротивление е определящ фактор за пропускането на високите честоти от усилвателя. Малката стойност на изходното съпротивление шунтира значително изходния паразитен капацитет  $C_0$  и съдейства за разширяване на пропусканата честотна лента, която в тези случаи достига до няколко мгхц.

Характерно за катодния усилвател е и неговото голямо входно съпротивление, което се определя съгласно израза 15 а. След допълнителна преработка на същия израз получаваме

$$R_{вх, \beta} = \frac{R_{вх}}{1 - K_{\beta}}$$

Тук  $R_{вх}$  е съпротивлението между решетка и маса, а  $K_{\beta}$  — усилването на катодния повторител.

Ако  $K_{\beta} = 0,9$ ,

$$R_{вх, \beta} = 10R_{вх}$$

Голямото входно и малкото изходно съпротивление на катодния усилвател обуславят голям коефициент на усилване по ток. От това следва, че катодният повторител може да се използва като усилвател на мощ, въпреки че има малък коефициент на усилване по напрежение.

Коефициентът на усилване по ток се определя от израза

$$K_i = \frac{R_{вх}}{R_{изх}}$$

Колкото това отношение е по-голямо, толкова и коефициентът на усилване по ток ще бъде по-голям.

Ако  $R_{вх} = 5$  мгом,  $R_{изх} = 1$  ком,

$$K_i = \frac{5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^3} = 5 \cdot 10^3 = 5000 \text{ пъти.}$$

Следва да се очаква, че катодният усилвател има и другите предимства на усилвателя, обхванат от отрицателна обратна връзка, а именно: подобрени честотна и фазова характеристика, малки нелинейни изкривявания, подобрена товарна характеристика и др.

Всички дотук изброени предимства са особено подчертани, когато катодният усилвател е обхванат допълнително от отрицателна обратна връзка.

Свойствата на катодния усилвател определят до голяма степен и неговото приложение. Неговото голямо входно съпротивление и малкото му изходно такова го правят много подходящ за съгласуване на различни съпротивления. Такъв е случаят например със съгласуването на високоомния изход на един телевизионен усилвател с нискоомния кабел, водещ към студиото.

Свойството му да не изменя поляритета на подадения на входа му импулс се използва много в радарната техника. Малкото изходно съпротивление прави катодния усилвател много удобен за драйверно стъпало в мощните усилватели, работещи в режими и решетъчни токове. Тогава внасяните нелинейни изкривявания от решетъчния ток се намаляват.

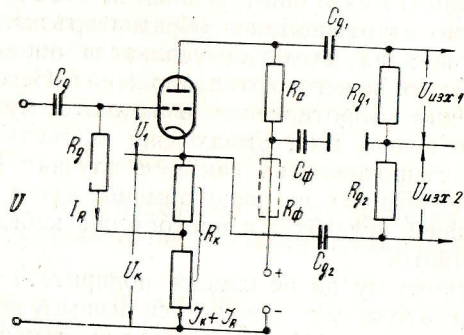
Катодният повторител често се използва и като усилвателно стъпало на мощ. Тук неговият нискоомен изход способствува за намаляване на преходните процеси и за устойчива работа.

### 3. Фазообръщащо стъпало с разделен товар

Фазообръщащото стъпало се използва в случаите, когато е необходимо да се преобразува еднофазно напрежение в две напрежения, равни по амплитуда и противоположни по фаза (дефазирани на ъгъл  $180^\circ$ )



Действието на фазообръщащото стъпало, показано на фиг. 36, се основава на влиянието на отрицателната обратна връзка. То представлява усилвателно стъпало, товарът на което се състои от две равни помежду си съпротивления  $R_k$  и  $R_a$ , включени съответно в катодната и анодната верига на лампата.



Фиг. 36

Напреженията от двете товарни съпротивления се подават на следващото стъпало посредством свързващите вериги  $R_{g1}C_{g1}$  и  $R_{g2}C_{g2}$ . При равни токове в анодната и катодната верига на лампата тези две напрежения ще бъдат равни по амплитуда и противоположни по фаза.

Обикновено постоянното падение на напрежението върху  $R_k$  не съвпада с необходимото постоянно преднапрежение за режима на лампата. Затова се създава делител на напрежение, като постоянното напрежение в горното рамо служи за преднапрежение и се подава чрез  $R_g$  на решетката на лампата.

При фазообръщащото стъпало напрежението на обратната връзка се сменя от катодното съпротив-

ление и е равно на половината от общото изходно напрежение (понеже  $R_a = R_k$ ). Затова тук за разлика от катодния усилвател,  $\beta = 0,5$ .

Коефициентът на усилване на фазообръщащото стъпало може да се изчисли, като се използва формула 3:

$$K_{\phi 0} = \frac{K}{1 + \beta K} = \frac{1}{\frac{1}{K} + \beta} = \frac{1}{\frac{1}{K} + 0,5} < 2. \quad (27)$$

Свойствата на фазообръщащото стъпало се определят също от дълбочината на обратната връзка, която се създава чрез катодния товар  $R_k$ . И тук имаме подобрана честотна характеристика, намалени нелинейни изкривявания и др.

Към недостатъците на тази схема се отнасят трудностите по симетриране на двете изходни напрежения поради изглаждащия филтър  $R_{\phi}C_{\phi}$  и различните изходни капацитети (паразитни) на двата товара. Изходните капацитети водят до несиметрия на схемата за високите честоти, а филтърът — до несиметрия за ниските честоти. Известна несиметрия се появява и за средните честоти, особено когато се използва екранирана лампа. При нея токовете в катодната и анодната верига са различни. Тяхната разлика е равна на екранния ток.

В практиката тази схема намира голямо приложение поради своята простота. Несиметрията не оказва голямо влияние, тъй като тя се изразява по-силно за честотите извън звуковия обхват. Съпротивленията  $R_k$  и  $R_a$  се избират в границите 10—50 ком. Останалите елементи имат стойности както в обикновеното RC-стъпало с аноден товар.

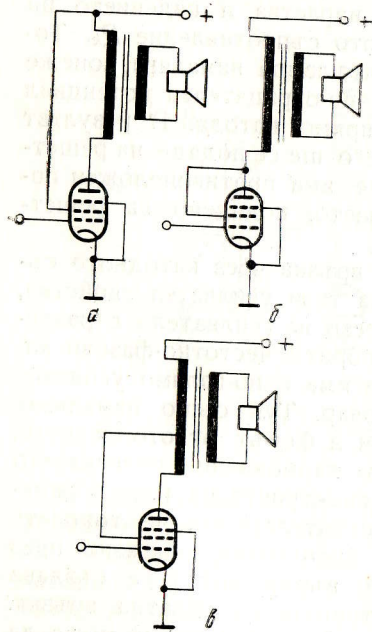






## 5. Усилвател с ултралинейна обратна връзка

Усилвателят с ултралинейна обратна връзка представлява еднотактно или двутактно крайно стъпало с екранирани лампи, чиито екранни решетки са съ-



Фиг. 38

единени към отвод (отводи) на определен брой навивки в първичната намотка на изходния трансформатор (фиг. 38в). Нормалното включване на екранната лампа (фиг. 38а) се характеризира с голям к. п. д., нуждае се от малко входно напрежение, но внася големи нелинейни изкривявания и потиска слабо преходните процеси във високоговорителите (товара) поради високоомния изход на усилвателя.

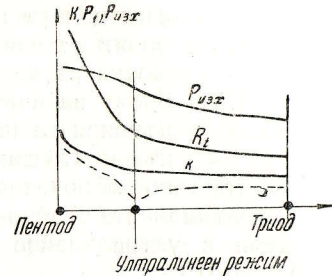
Включването на екранната лампа като триод (фиг. 38б) се характеризира с малки нелинейни изкривявания и добро потискащо действие върху преходните процеси. Но всичко това

При постепенното пренасяне на свързващата точка на екранната решетка на лампата между двата края на първичната намотка на изходния трансформатор се стига до една точка, респ. едно напрежение, което, подадено на екранната решетка, създава условия за обединяване предимствата на триодното и пентодното включване на екранната лампа, без да са налице техните недостатъци. По такъв начин при оптимално включване на екранната решетка към първичната намотка на изходния трансформатор стъпалото дава голяма изходна мощност (голям к. п. д.) при малка амплитуда на решетъчно разколебаващо напрежение, малки нелинейни изкривявания и добро потискане на преходните процеси.

На фиг. 39 са показани типичните характеристики на усилвателя при тяхното преминаване от пентодно (през ултралинейно) към триодно свързване на екранната решетка на лампата.

Тук максималната изходна мощност, изходното съпротивление и коефициентът на нелинейните изкривявания са изразени като функция на коефициента на товара  $p$ , който представлява отношението

$$p = \frac{W_e}{W_a} = \frac{R_e}{R_a}, \quad (28)$$



Фиг. 39



където  $R_e$  е съпротивлението на товара, приведено към частта на първичната намотка на трансформатора, включена във веригата на екранната решетка;

$R_a$  — съпротивлението на товара, приведено към цялата намотка;

$W_a$  — броят на навивките на първичната намотка на изходния трансформатор;

$W_e$  — броят на навивките на онази част от първичната намотка на трансформатора, към която е включена екранната решетка.

При триодно включване  $p=0$ , а при пентодно —  $p=1$ . Оптималната стойност на  $p$  за различните лампи за схема с ултралинейна обратна връзка се движи от 0,2 до 0,3.

От приведената графика се вижда, че при преминаване от пентодно към триодно включване вътрешното съпротивление и коефициентът на нелинейните изкривявания намаляват бързо, докато изходната мощност се изменя незначително. Всички тези явления се обясняват с наличието на особената отрицателна обратна връзка в схемата. За разлика от всички дадени дотук случаи на обратни връзки, при които напрежението на обратната връзка се подава в същата верига, в която действа входното напрежение, при тази схема част от изходното напрежение се подава на екранната решетка на лампата. В резултат от това лампата получава други статически характеристики, които в зависимост от отношението  $p$  могат да приличат повече на характеристиката на пентодното или триодното включване на лампата.

Най-интересният ефект на тая схема на свързване се наблюдава, когато разпределението на товара се прави в двутактен усилвател, работещ в клас  $AB_1$ .

Тогава кривите на изходното съпротивление и изходната мощност запазват характера си (фиг. 39), а коефициентът на нелинейните изкривявания за оптимална стойност на отношението  $p$  достига минимална стойност, непостижима нито при пентодното, нито при триодното включване (пунктираната линия на фиг. 39). Режимът на най-малките нелинейни изкривявания се нарича ултралинейен, а обратната връзка в описания вид — ултралинейна.

Всички предимства, които притежават усилвателните схеми, обхванати от отрицателна обратна връзка, по отношение на честотните и фазовите характеристики важат и за ултралинейната схема. Освен това при по-малка дълбочина тази обратна връзка дава по-добри резултати, като с това се печели усилване.

Към недостатъците на тая обратна връзка се отнасят по-големите изисквания към изходния трансформатор (преди всичко той да има малко разсейване).



## 5 ПРОЕКТИРАНЕ НА УСИЛВАТЕЛ С ОБРАТНА ВРЪЗКА

От направеното дотук разглеждане се вижда, че прилагането на обратна връзка води до подобрене или до промяна на всички параметри на обхванатия от нея усилвател. При проектирането на обратна връзка обаче се цели да се постигне подобряване или изменение по определен начин на един или няколко параметра на усилвателя. Промяната на останалите параметра се явява като последствие.

Задачата за проектирането на усилвател с обратна връзка се поставя практически по следния начин: да се определят типът, начинът и мястото на свързване и се изчислят стойностите на елементите на веригата на обратната връзка така, че определен параметър (или параметри) на усилвателя да добие едно предварително зададено значение.

Решаването на тази задача наведнъж е невъзможно или поне твърде трудно. Налага се това да стане, като се премине последователно през следните етапи:

а) числено или графично формулиране на желаните стойности на параметрите след прилагане на обратната връзка;

б) подбор на обратна връзка по тип, начин и място на свързването ѝ с оглед да се получат параметри, близки до желаните;

в) изчисление елементите на веригата на обратната връзка;

г) проверка с цел да се установи доколко избраната обратна връзка задоволява поставените изисква-

ния и как се изменят стойностите на останалите параметри;

д) корекция на обратната връзка с оглед резултатите от проверката;

е) окончателна проверка на параметрите на усилвателя, обхванат от обратна връзка.

Успешното преминаване през тези етапи изисква освен теоретично още и практическо познаване на възможностите на обратната връзка. Освен това то изисква познания и по редица технико-икономически въпроси на усилвателите, към които се прилагат обратните връзки.

### 1. Изисквания към обратната връзка и тяхното формулиране

Изискванията, които се предявяват към обратните връзки, зависят от вида и предназначението на усилвателите, към които те ще бъдат приложени. От тази гледна точка усилвателите могат да бъдат разделени на няколко групи:

а) Маломощни усилватели за радиоприемници, телевизори, магнитофони, микрофонни усилватели.

Те представляват двустъпални и в редки случаи тристъпални усилватели с еднотактно крайно стъпало и изходна мощност от 1 до 3 вт.

Транзисторни усилватели с двутактно крайно стъпало и изходна мощност от няколкостотин миливата до 1 ÷ 2 вата.

Тук основните изисквания към обратната връзка са: осигуряване на определена (често пъти променлива) форма на честотните характеристики, намаляване на нелинейните изкривявания, възможно по-просто и икономично изпълнение на веригата на об-



ратната връзка при добра стабилност на усилвателя. Често се изисква още приложената обратна връзка да не намали или да намали незначително чувствителността на усилвателя.

При транзисторно изпълнение към обратната връзка се предявява в известни случаи и изискването тя да увеличи входното съпротивление на всяко усилвателно стъпало с цел то да бъде съгласувано към товара на предното стъпало.

б) Средно мощни усилватели за радиоприемници телевизори, магнитофони, музикални шкафове.

Това са многостъпални усилватели обикновено с двукратно крайно стъпало и изходна мощност 5 до 10 вт. Тук към обратната връзка се поставят сложни и разнообразни изисквания: намаляване на коефициента на нелинейните изкривявания под 3—4% и дори до 1—2%; осигуряване на фиксирани и променливи честотни характеристики с предварително определена форма; намаляване на брума; намаляване на изходното съпротивление с оглед да се потискат преходните процеси.

в) Мощни усилватели за целите на жичната радиофикация и кинематографията и за озвучаване на открити площи и помещения.

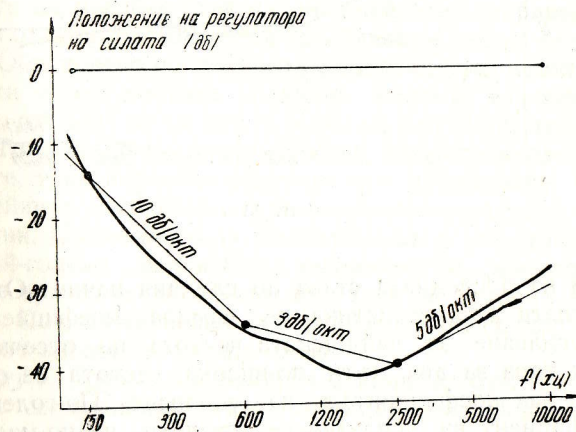
Това са многостъпални усилватели с двукратно изпълнение (често от самия вход) с изходна мощност от 10—20 вт до няколко квт.

Към обратните връзки, прилагани в тези усилватели, се предявяват също твърде големи изисквания: снижение на коефициента на нелинейните изкривявания за почти целия честотен обхват в някои случаи под 1—2%; получаване на широка честотна лента с малка неравномерност; силно намаляване на изходното съпротивление с оглед да се стабилизира

коефициентът на усилване при промяна на товара.

За проектирането е необходимо да се формулира изменението на всеки от параметрите на усилвателя. Това става по следния начин:

а) *Честотна характеристика.* Начертава се търсената честотна характеристика. Често се задават няколко честотни характеристики (зависещи от положението на регулатора на силата) с оглед да се получи максимално приближаване към кривите на еднакво чуване. В други случаи различните характеристики отговарят на изискванията за слушане на оркестър, говор, джаз и т. н.



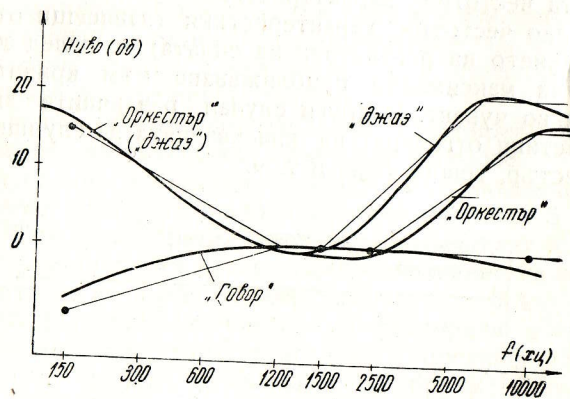
Фиг. 40

На фиг. 40 са посочени за пример две характеристики, съставени с оглед изискванията на еднаквото



чуване, а на фиг. 41 — три такива: за оркестър, джаз и говор.

Тези честотни характеристики се опростяват, като се представят чрез няколко отсечки. Върху всяка от отсечките се написва стръмността  $\gamma$ . Определя-



Фиг. 41

нето на последната става по следния начин. От честотната характеристика се намира коефициентът на усилване за най-ниската честота на отсечката; след това за два пъти по-висока честота се определя пак коефициентът на усилване. По-големият коефициент на усилване се разделя на по-малкия. Полученото отношение, изразено в децибели, представлява стръмността на отсечката. Ако по-високата честота се окаже извън обсега на отсечката, чиято стръмност се търси, същата се продължава с пунктир до необходимата стойност. На фиг. 40 е

показан един подобен случай. С оглед да се улесни преминаването от отношения в децибели е дадена табл. 1.

Таблица 1

Отношение на напреженията (токовете)	1	1,26	1,58	2	2,5	3,2	4,0	5,6	10	20	32	100	1000
Децибели	0	2	4	6	8	10	12	15	20	26	30	40	60

б) *Нелинейни изкривявания.* Определят се стойностите на коефициента на нелинейните изкривявания за отделните области на пропускания честотен обхват. Обикновено последният се разделя на три такива области — от долната гранична честота до около 200 хц, от 200 хц до около 5000 хц и от 5000 хц нагоре. Това се прави поради факта, че както възможностите, така и необходимостта от намаляване на нелинейните изкривявания за различните честоти са различни. Обикновено за долната област се допускат най-големи нелинейни изкривявания (понякога два до три пъти по-високи от тези за средни честоти). По-големи нелинейни изкривявания се допускат и за височестотната област.

в) *Брум.* Брумът се измерва в миливолтове. Често брумът се дефинира като отношение на напрежението на брума към изходното напрежение на усилвателя. За най-висококачествените усилватели това отношение следва да бъде по-малко от 1:1000; за усилвателите в радиоприемниците, телевизорите, магнитофоните и други апарати от средна класа то не трябва да превишава 1:300. За най-евтините и малки



усилватели обикновено трудно се постига това отпосошение да бъде по-малко от 1:100.

г) *Изходно съпротивление.* Както бе посочено, при различните случаи стремежът за намаляване на изходното съпротивление е обусловен от различни причини. В зависимост от това и стойността на изходното съпротивление се определя по различни начини. В повечето случаи намаляването на изходното съпротивление се налага от стремежа да се получи по-добро потискане на преходните процеси. Тук обикновено не се поставя норма, а се взема само пред вид фактът, че ползата от това намаляване е малка, когато изходното съпротивление стане по-малко от съпротивлението на високоговорителите, с които е натоварен усилвателят.

Когато усилвателят е предназначен за жична радиофикация, необходимо е изходното му съпротивление да има такава стойност, че при пълно разтоварване изходното напрежение да не превиши напрежението при нормален товар с повече от 3 дБ (1,4 пъти). При вземане под внимание на това изискване може да се изведе следната зависимост за дълбочината на отрицателната обратна връзка:

$$1 + \beta K \geq \frac{3,5}{1 + \frac{R_{2н}}{R_i}} \quad (29)$$

Тук  $R_{2н}$  е номиналното товарно съпротивление на усилвателя.

д) *Входно съпротивление.* Във втора глава бе посочено, че в повечето случаи е желателно входното съпротивление на усилвателя да бъде по-голямо от вътрешното съпротивление на захранващия генератор. От тази гледна точка прилагането на серийната

обратна връзка е подходящо, а прилагането на паралелната обратна връзка е нежелателно. Когато обаче се налага да се използва паралелна обратна връзка с оглед да се подобрят някои други параметри, следва да се направи проверка на влиянието ѝ върху входното съпротивление на усилвателя.

В някои случаи обаче се изисква за определени честотни области входното съпротивление да е равно и дори по-малко от вътрешното съпротивление на източника. По този начин се постига определена промяна на честотната характеристика на усилвателя. Това понякога се прави във входната верига на възпроизвеждащия канал на магнитофоните с цел да се потисне до известна степен резонансното явление във възпроизвеждащата глава. „Моделиране“ на честотната характеристика чрез честотно зависимо входно съпротивление се прави понякога и в усилвателите за други цели. Във всички тези случаи се използва паралелна обратна връзка по напрежение, изискванията спрямо които се формулират в зависимост от желаната честотна характеристика.

е) *Устойчивост.* Както вече бе посочено, устойчивостта на усилвателя, обхванат от обратна връзка, зависи от твърде много фактори. Преди всичко тя се влошава при увеличаване на броя на стъпалата на усилвателя. Като съвсем ориентировъчни (но със значителен запас) могат да се имат пред вид някои дълбочини на обратни връзки, при които е гарантирана устойчивата работа на усилвателя. Практически при едностъпалния RC-усилвател няма ограничение на дълбочината на обратната връзка. Две стъпала (особено ако едното от тях е трансформаторно) не трябва да бъдат обхванати от обратна връзка, по-



дълбока от 20 дБ (10 пъти). Допустимата дълбочина на обратната връзка, обхващаща три усилвателни стъпала с различни честотно-фазови характеристики, е 10 дБ (3 пъти). В редица практически случаи посочените дълбочини на обратните връзки могат да бъдат превишени. Това налага обаче да се проведат някои изследвания.

Значително повишаване на устойчивостта на многостъпалвите усилватели се получава, когато освен общата обратна връзка съществува и местна (локална) обратна връзка, която обхваща само някои от стъпалата на усилвателя.

Освен това следва да се вземат всички мерки, щото усилвателят без обратна връзка да бъде колкото е възможно по-далече от състоянието на самовъзбуждане. Това се постига, когато отделните стъпала имат различни честотни характеристики и минимални честотно-фазови изкривявания. Освен това необходимо е още захранванията на отделните стъпала да бъдат разделени посредством подходящо изчислени развързващи филтри. Необходимо е също да се вземат и всички споменати в други глави конструктивни мерки против самовъзбуждането.

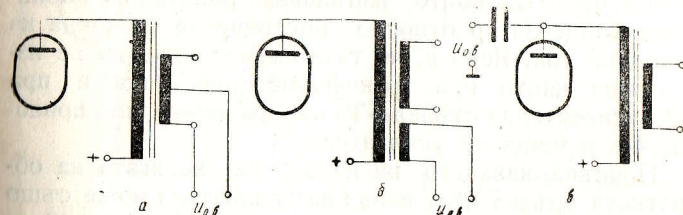
## 2. Избор на обратната връзка

След формулирането на изискванията към обратната връзка трябва да се пристъпи към нейния избор.

*а) Тип обратна връзка.* Типът на обратната връзка е тясно свързан с поставените изисквания. За определянето му е необходимо само да се имат пред вид влиянието на различните типове обратни връзки

върху параметрите на усилвателя и допълнителните съображения, разгледани в предишната точка.

*б) Място на свързване на обратната връзка.* На фиг. 42 са посочени три начина на вземане на напрежението  $U_{o-в}$  на обратната връзка.



Фиг. 42

Случаят, представен на фиг. 42а, се среща най-често. Чрез преместване на точката *a* върху вторичната намотка на изходния трансформатор може да се подбере подходяща стойност на  $U_{o-в}$ .

Схемата на фиг. 42б се използва, когато съществува стремеж да се намали до известна степен влиянието на честотно-фазовите изкривявания, внасяни от трансформатора. Този начин има и друго преимущество: обикновено вторичното напрежение на трансформатора е ниско; малко е и общото усиление на усилвателя. Затова за получаване на дълбока обратна връзка се налага да се работи с голям фактор  $\beta$ . При схемата на фиг. 42б отделната намотка може да има значително напрежение. Така този недостатък се избягва.

Схемата на фиг. 42в се използва, когато съществува стремеж да се избягнат в най-голяма степен честотно-фазовите изкривявания, внасяни от изход-



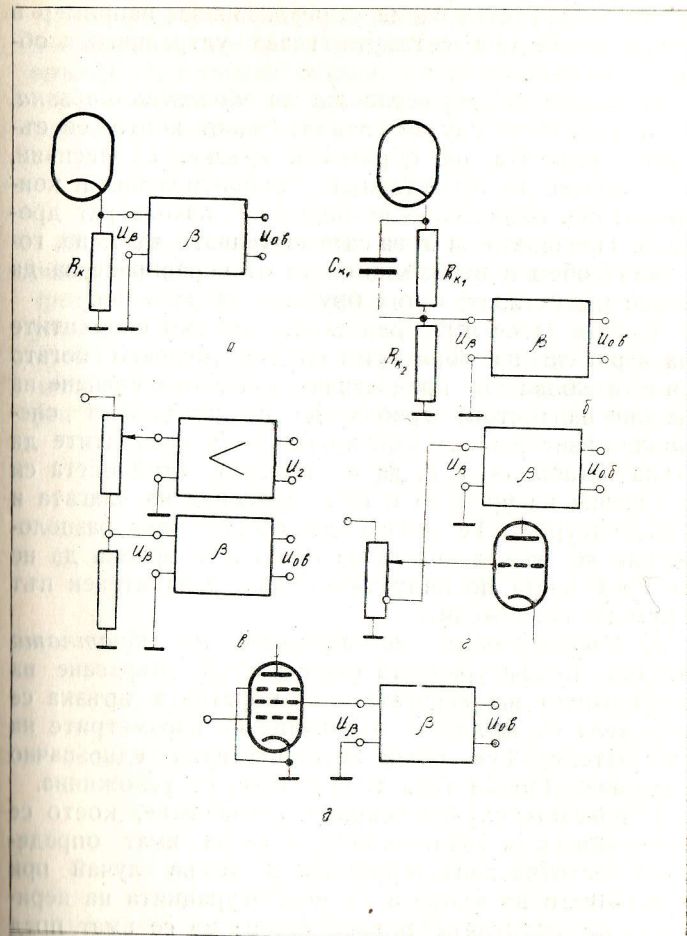
ния трансформатор. Тази схема има преимуществата на схемата, показана на фиг. 42б. Неин недостатък е, че внасяните от трансформатора нелинейни и честотно-фазови изкривявания се намаляват само частично. Освен това налага се да се използва кондензаторът  $C_a$ , който изпълнява ролята на блокиращ кондензатор относно постоянната съставна на анодния ток. Ясно е, че тази схема може да се използва както при трансформаторни, така и при  $RC$ -усилвателни стъпала. Тя намира най-голямо приложение в мощните усилватели.

Присъединяването на изхода на веригата на обратната връзка към входа на усилвателя може също да се извърши по различни начини. На фиг. 43 са посочени няколко такива. Най-често се среща начинът, представен на фиг. 43а. То е най-просто, но има недостатъка, че води до създаване на допълнителна обратна връзка по ток чрез катодното съпротивление, към което е свързана веригата на обратната връзка. Този недостатък може да бъде избягнат по начина, представен на фиг. 43б. Съпротивлението  $R_{k2}$  се подбира малко с цел да може да бъде пренебрегната обратната връзка по ток.

На фиг. 43в е показан един малко по-особен начин на свързване, прилаган често в усилвателите на радиоприемниците и телевизорите. Тук дълбочината на обратната връзка е различна и зависи от положението на плъзгача на регулатора на силата.

При паралелната обратна връзка такъв ефект се постига обикновено чрез присъединяване на веригата на обратната връзка към някои от допълнителните изводи на регулатора на силата (фиг. 43г).

Веригата на обратната връзка може да се присъедини и към екранната решетка на лампата



Фиг. 43



(фиг. 43д). Такава схема е реализирана например в разглежданата в четвърта глава ултралинейна обратна връзка.

в) *Елементи на веригата на обратната връзка.* В разглежданите случаи елементите, от които се съставя веригата на обратната връзка, са пасивни. Обикновено те представляват съпротивления и кондензатори. Значително по-рядко се използват дросели. Причината за това са значителната им цена, големият обем и необходимостта от екраниране, за да не се индуцират в тях брумове напрежения.

Трябва да се има пред вид, че към елементите на веригата на обратната връзка (особено когато тя е дълбока и предназначена за осигуряване на важни параметри) трябва да се предявяват специални изисквания. Особено важно е елементите да бъдат стабилни, т. е. да не изменят стойността си с течение на времето и при изменение на влагата и температурата. Те трябва да бъдат така разположени, че във веригата на обратната връзка да не се прехвърлят по индуктивен или капацитивен път брумове напрежения.

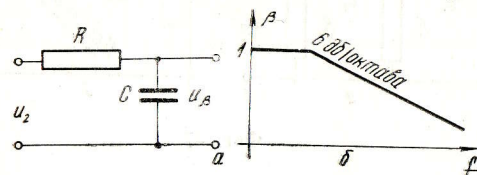
г) *Конфигурация на веригата на обратната връзка.* Конфигурацията (начинът на свързване на елементите) на веригата на обратната връзка се определя от желаното изменение на параметрите на усилвателя. Тук обаче не съществува еднозначно решение. Поради това този въпрос се усложнява.

В повечето случаи основното изискване, което се предявява към усилвателите, е те да имат определена честотна характеристика. В такъв случай при решаването на въпроса за конфигурацията на веригата на обратната връзка трябва да се имат пред вид някои положения.

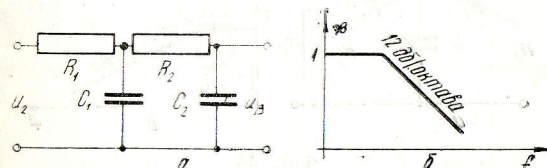
За моделиране на честотната характеристика е необходима доста дълбока отрицателна обратна връзка. При такава връзка коефициентът на усиление може да се напише с достатъчна за практиката точност в следния вид:

$$K_{\beta} = \frac{1}{\beta}$$

Оттук следва, че всяка определена честотна характеристика на усилвателя може да се постигне чрез обратна (реципрочна) по форма честотна характеристика на веригата на обратната връзка. Въпросът се свежда до намиране на верига на обратната връзка с такава именно характеристика. На фиг. 44 до 51 са посочени редица конфигурации



Фиг. 44

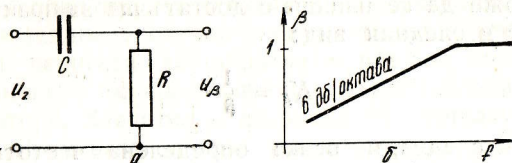


Фиг. 45

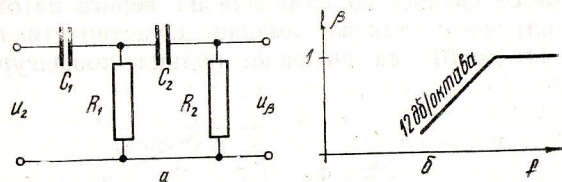
на вериги на обратна връзка и видът на съответните им честотни характеристики. И тук е из-



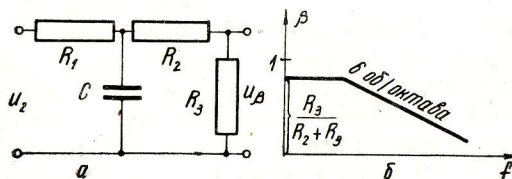
вършено опростяване (както това беше направено за честотните характеристики на усилвателя), като зависимостта  $\beta(f)$  е представена чрез редица отсечки.



Фиг. 46



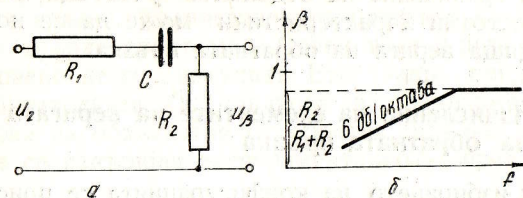
Фиг. 47



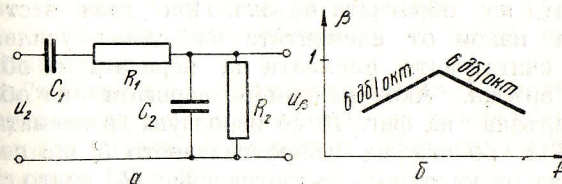
Фиг. 48

За всяка от схемите е посочена стръмността на отделните отсечки на характеристиката. От фигурите се вижда, че за еднозвенните вериги тя е малка —

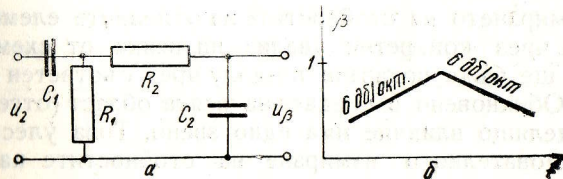
6 дБ (2 пъти) на октава, докато за многозвенните вериги тя е 12 дБ (4 пъти) на октава.



Фиг. 49



Фиг. 50



Фиг. 51

Октава е честотен обхват, който е два пъти по-голям или по-малък от един приет за основен. За нашите цели за основен обхват може да се използва кой да е удобен такъв. Ако например за основен се приеме обхватът от нула до 200 хц, една окта-



ва представлява обхват от 200 до 400 хц или обхват от 0 до 100 хц.

Чрез сравняване на отделните участъци и на целите честотни характеристики може да се подбере подходяща верига на обратната връзка.

### 3. Изчисление на елементите на веригата на обратната връзка

След избирането на конфигурацията се пристъпва към определяне на стойностите на елементите на веригата на обратната връзка. При това често се налага някои от елементите на самия усилвател да се считат като елементи на веригата на обратната връзка. Ако например веригата на обратната връзка на фиг. 46 се използва в схемата на фиг. 43а, ролята на съпротивлението  $R$  ще се изпълнява от катодното съпротивление  $R_k$ , чиято стойност е предварително определена от режима на съответната лампа.

Намирането на стойностите на отделните елементи става чрез конкретен анализ на всяка от схемите. Това ще бъде показано по-долу чрез съответен пример. Обикновено в средата на всяка област (отсечка) определящо влияние има едно звено. Това улеснява последователното намиране на стойностите на отделните елементи.

### 4. Проверка на влиянието на избраната обратна връзка

Тази проверка се извършва след ориентиращото определяне на елементите на веригата на обратната връзка и по-точно — след окончателното им установяване.

Тя във всички случаи е приблизителна, тъй като при нея не се вземат под внимание фазовите изкривявания, внасяни от усилвателя и от веригата на обратната връзка. Количественото отчитане на последните е твърде трудоемко. Освен това и резултатите обикновено не го изкупват. Ето защо предпочитана се окончателната (а понякога и предварителната) проверка на обхванатия от обратна връзка усилвател да се извършва експериментално — чрез измерване.

Тъй като всички параметри на обхванатия от обратна връзка усилвател се определят от дълбочината на същата, целесъобразно е тя да се изчисли предварително.

а) *Дълбочина на обратната връзка.* Изчислението се предхожда от определянето на коефициента на обратната връзка  $\beta$  за редица честоти. След това се съставя табл. 2.

Таблица 2

$f$ (хц)	$\beta$	$K$	$\beta K$	$1 + \beta K$

В графата за честотата се нанасят онези честоти, за които ще се определят стойностите на дълбочината на обратната връзка. Тук трябва да се има пред вид, че честотите следва да се избират „нагъсто“ там, където се получават големи промени на честотните характеристики на самия усилвател и на веригата на обратната връзка. Това е излишно за



участъците, където липсват промени или са налице малки такива.

б) *Честотна характеристика.* Тя се определя много лесно, като от табл. 2 се използват стойностите на  $K$  и на  $1 + \beta K$ . Съставя се табл. 3, въз

Таблица 3

$f$ (хц)	$K$	$1 + \beta K$	$K\beta = \frac{K}{1 + \beta K}$

основа на която може да се построи честотната характеристика на усилвателя, обхванат от обратна връзка.

в) *Нелинейни изкривявания.* Данните, с които се разполага, обикновено не дават възможност да се извърши изчисление на нелинейните изкривявания при наличност на обратна връзка.

Ето защо тук ще бъде показано само, как качествено се изменят нелинейните изкривявания.

В обикновените случаи може да се счита, че нелинейните изкривявания се определят главно от втората и третата хармонична на основния сигнал. Амплитудите на хармоничните с по-високи честоти обикновено са твърде малки в сравнение с тях. Поради това при оценка на влиянието на обратната връзка върху нелинейните изкривявания за определена честота следва да се изхожда от дълбочината на връзката за 2 до 3 пъти по-висока честота. Ясно е, че нелинейните изкривявания за сигнали с честоти, при които е налице дълбока обратна връзка, могат да бъдат намалени слабо, понеже хармоничните на

същите честоти попадат в област с плитка обратна връзка. Възможен е, разбира се, и обратният случай.

Определянето на намалението на комбинационните изкривявания по посочения начин е невъзможно.

г) *Вътрешни шумове.* Трудностите при изчислението на влиянието на обратната връзка върху шумовете са от същия характер както тези, изтъкнати при определянето на нелинейните изкривявания.

В усилвателите преобладават обикновено шумовете, произхождащи от мрежовото захранване. Техните честоти са известни и доста близки, а сумарната им амплитуда може лесно да се измери. Поради това (макар и с някаква грешка) влиянието на обратната връзка върху вътрешните шумове може да се изчисли.

д) *Изходни и входни съпротивления.* Тези параметри лесно се проверяват, като се изхожда от дадените във втора глава зависимости и се вземат пред вид дадените в табл. 2 стойности на дълбочината на обратната връзка.

е) *Устойчивост.* Съгласно направеното в т. 1 на настоящата глава разглеждане проверката за устойчивост се свежда до проверка по табл. 2, дали дълбочината на обратната връзка не превишава за някои от честотите допустимата стойност.

### 5. Примери за проектиране на усилватели с обратна връзка

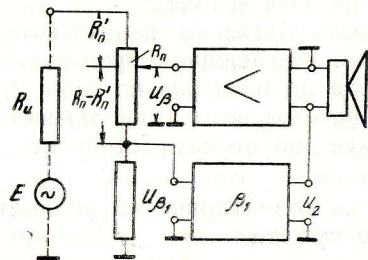
Както беше посочено в т. 1 на настоящата глава, качествата на обратните връзки зависят от вида и предназначението на усилвателя, към който ще бъдат приложени. Тук ще бъде разгледано проектирането



на обратните връзки при прилагането им върху някои типични усилватели.

а) *Маломощни усилватели.* Типичен представител на тази група усилватели е нискочестотният усилвател на радиоприемник от класа „Среден супер“.

В случая като основен параметър се приема честотната характеристика. С оглед да бъде задоволено изискването за качествено слушане същата трябва да бъде променлива и по форма да се приближава до кривите за еднакво чуване. Това изискване, комбинирано с условието за малко намаляване на чувствителността вследствие прилагането на обратната връзка, налага веригата на същата да бъде приложена по подходящ начин към регулатора на силата. Това може да бъде само една отрицателна обратна връзка, понеже прилагането ѝ има за цел намаляване на нелинейните изкривявания. За предпочитане е проектираната обратна връзка да бъде по напрежение, тъй като обратната връзка по ток



Фиг. 52

води до увеличаване на изходното съпротивление, което е нежелателно. Големите промени, които следва да се реализират в честотните характеристики, на-

лагат обратната връзка да бъде честотно зависима. На фиг. 52 е посочена блоковата схема на усилвател, обхванат от обратна връзка, отговаряща на всички така набелязани изисквания. Тук е налице честотно зависима отрицателна обратна връзка по напрежение, обхващаща целия усилвател.

От схемата не може непосредствено да се разбере, че дълбочината на обратната връзка се мени при регулиране на силата. Затова най-напред ще бъде разгледан именно този въпрос с цел да бъдат получени някои полезни съотношения.

Като се използват въведените на фигурата означения, за коефициента на обратната връзка може да се напише

$$\beta = \beta_1 \frac{U_\beta}{U_{\beta_1}}, \text{ но } \frac{U_\beta}{U_{\beta_1}} = \frac{R_u + R'_n}{R_u + R_n} \text{ или } \beta = \beta_1 \frac{R_u + R'_n}{R_u + R_n}.$$

От друга страна, обикновено  $R_u \ll R_n$ . Следователно

$$\beta \approx \beta_1 \left( \frac{R_u}{R_n} + \frac{R'_n}{R_n} \right).$$

Когато регулаторът на силата е отворен,  $R'_n = 0$ . Тогава  $\beta \approx \beta_1 \frac{R_u}{R_n}$  има твърде малка стойност.

Обратно, когато регулаторът на силата е затворен,  $R'_n = R_n$ . Тогава  $\beta \approx \beta_1$ , т. е. условието за променлива дълбочина на обратната връзка е спазено.

Интерес представлява и въпросът, при какви условия ще бъде спазено изискването чувствителността на усилвателя да намалява малко вследствие приложената обратна връзка.



Коефициентът на усилване на усилватели от разглеждания тип е от порядъка на 100. Тъй като те са обикновено двустъпални и  $(1 + \beta K) \leq 10$  (с оглед да се получи устойчива работа), следва, че  $\beta \leq 0,1$ .

Както бе посочено, при затворен регулатор общата дълбочина на обратната връзка добива максимума си, т. е.  $\beta_1 \leq 0,1$ . Тогава при отворен регулатор

$$\beta \cong 0,1 \frac{R_n}{R_n}$$

Ако бъде прието за допустимо чувствителността (т. е. максималният коефициент на усилване) да се намали два пъти вследствие прилагането на обратната връзка, тогава се оказва, че  $\frac{R_n}{R_n} \leq 10$ . Тъй като  $R_n$  е от порядъка на 1 мегаом, налага се  $R_n$  да не бъде по-голямо от 100 кома. За почти всички усилватели, класифицирани като „маломощни“, източникът отговаря на това условие. Там, където то не е спазено, се оказва, че не е и необходимо — например при кристална грамофонна мембрана.

Сега вече може да бъде определена и самата верига на обратната връзка. Тъй като е налице условието  $1 + \beta K = 10 \gg 1$ , то следва, че може да се приложи описаният в т. 2 на настоящата глава начин. Най-подходяща схема на верига за обратна връзка е тази, показана на фиг. 50. Наистина, при сравнението ѝ с честотната характеристика, която е необходима за слушане при еднакво ниво (фиг. 40), се оказва, че стръмността на последната е по-голяма. В случая обаче се налага да се направи компромис от икономически съображения. Постигането на необходимата стръмност на характеристиката на фактора на обратната връзка ще наложи, от една страна

усложняване на веригата на същата, а от друга — намаляване на максималната му стойност. За да се запази необходимата дълбочина на обратната връзка, се налага да се прибави още едно стъпало. Това, разбира се, ще оскъпи усилвателя.

Най-напред ще бъдат определени стойностите на елементите  $R_1$  и  $R_2$ . При по-внимателно разглеждане на схемата и съответната ѝ честотна характеристика на фиг. 50 се вижда, че за средни честоти влиянието на кондензаторите  $C_1$  и  $C_2$  е минимално. За тези честоти се получава и максимумът на  $\beta$  ( $\beta_m$ ), който е свързан с  $R_1$  и  $R_2$  чрез простата зависимост

$$\beta_m = \frac{R_2}{R_1 + R_2} R_2.$$

В стойността на съпротивлението  $R_2$  съществува ограничение. Последната трябва да бъде доста малка, тъй като в обратния случай се оказва, че регулаторът на силата не може да намали достатъчно подавания на усилвателя сигнал. Това изискване е особено съществено за усилвателите, предназначени за радиоприемници, тъй като тук на входа на усилвателя с чувствителност  $30 \div 40$  мв се подават напрежения до  $3 \div 4$  волта. По тези съображения  $R_2$  се избира от порядъка на няколко стотин ома. За случая е прието  $R_2 = 300$  ом. Тогава

$$R_1 = \frac{R_2}{\beta_m} - R_2 = 300 \left( \frac{1}{0,1} - 1 \right) \cong 3000 \text{ ом.}$$

Следващият етап е определянето на капацитета на кондензатора  $C_2$ . При високи честоти реактансът на кондензатора  $C_1$  може да бъде пренебрегнат. От друга страна, при същите честоти дълбочината на



обратната връзка е значително по-малка, отколкото при средни честоти. Следователно реактансът на  $C_2$  ще бъде много по-малък от съпротивлението  $R_2$  и последното може да се пренебрегне. Тогава веригата на обратната връзка добива вида, показан на фиг. 53а. В такъв случай за коефициента на обратната връзка за високи честоти може да се напише

$$\beta_e = \frac{1}{\omega_e C_2 \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{\omega_e C_2}\right)^2}}$$

Тъй като  $R_1 \gg \frac{1}{\omega_e C_2}$  (обратната връзка за високите честоти е доста слаба), то

$$\beta_e \approx \frac{1}{\omega_e C_2 R_1}$$

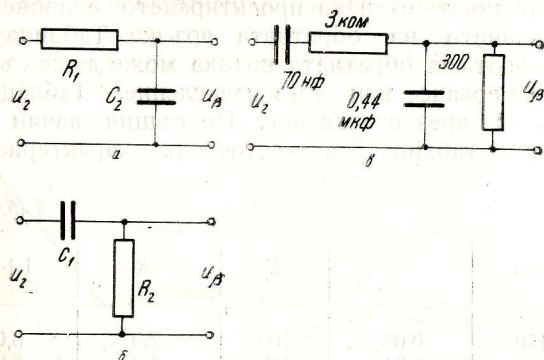
Ако за средната честота  $f_{cp}$  се приеме около 1200 хц, не е трудно да се намери, че за  $f_e = 10\,000$  хц,  $\beta_e$  е около 8 пъти по-малко от  $\beta_m$  при положение, че стръмността на  $\beta(f)$  е 6 дб/октава. Тогава действителната стойност на фактора на обратната връзка за високи честоти е

$$\beta_e = \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{8} = \frac{1}{80}$$

Но

$$C_2 = \frac{1}{\beta_e \omega_e R_1} = \frac{10^6}{\frac{1}{80} \cdot 6,3 \cdot 10000 \cdot 3000} \approx 0,44 \text{ мкф.}$$

По подобен начин става определянето и на капацитета на кондензатора  $C_1$ . За ниските честоти се оказва, че е възможно да се пренебрегнат елемен-



Фиг. 53

тите  $R_1$  и  $C_2$ . Съгласно заместителната схема на фиг. 53б за коефициента на обратната връзка може да се напише следният израз:

$$\beta_n = \omega_n C_1 R_2$$

При  $f_n = 150$  хц и при същите условия, както за високите честоти, се получава, че  $\beta_n$  е около 8 пъти по-малък от  $\beta_m$ . Тогава действителната стойност на коефициента на обратната връзка за ниски честоти е

$$\beta_n = \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{10} = \frac{1}{80}$$

Но

$$C_1 = \frac{\beta_n}{\omega_n R_2} = \frac{\frac{1}{80} \cdot 10^6}{6,3 \cdot 150 \cdot 3000} \approx 70 \text{ нф.}$$



На фиг. 53в е показана схемата на веригата на обратната връзка с изчислените стойности на елементите.

Следващият етап на проектирането е проверката на влиянието на обратната връзка. Таблицата за дълбочината на обратната връзка може да се състави чрез измерване или чрез изчисление. Таблица 4 е съставена чрез изчисление. По същия начин е съставена и таблица 5 за честотната характеристика.

Таблица 4

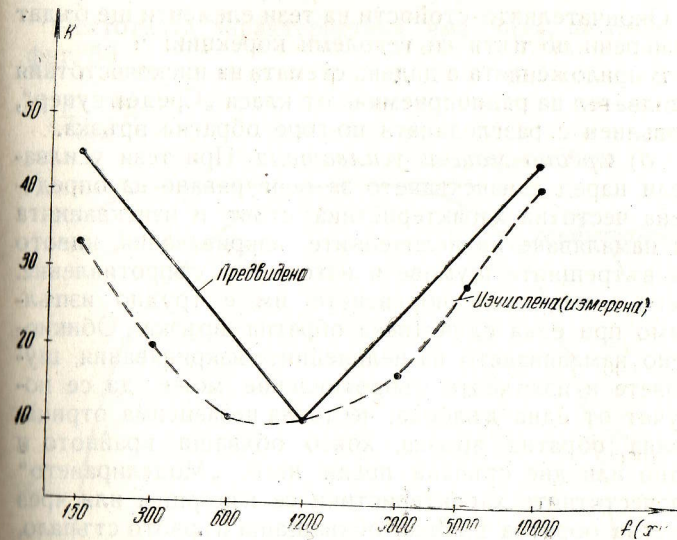
$f$ (хц)	$\beta$	$K$	$\beta K$	$1 + \beta K$
150	0,020	100	2,0	3,0
300	0,040	100	4,0	5,0
600	0,080	100	8,0	9,0
1200	0,080	100	8,0	9,0
3000	0,050	100	5,0	6,0
5000	0,026	100	2,6	3,6
10000	0,014	100	1,4	2,4

Таблица 5

$f$ (хц)	$K$	$1 + \beta K$	$K\beta = \frac{K}{1 + \beta K}$
150	100	3,0	33
300	100	5,0	20
600	100	9,0	11
1200	100	9,0	11
3000	100	6,0	17
5000	100	3,6	28
10000	100	2,4	42

На фиг. 54 са начертани изчислената и предвидената честотна характеристика.

Въз основа на съображенията от т. 4 може да се установи, че най-голямо намаляване на нелинейните



Фиг. 54

изкривявания ще получат сигналите с честоти от около 200 до 800 хц. Обаче вътрешните шумове ще бъдат слабо намалени от проектираната обратна връзка.

Както се вижда от табл. 4, устойчивостта е добра. Данните от табл. 4 и 5 показват, че са налице известни отклонения от предвидените дълбочина на обратната връзка и честотната характеристика. Тези



отклонения са най-големи за ниските честоти. Причината за това се крие в допуснатите приближения при определянето на елементите на веригата на обратната връзка.

Окончателните стойности на тези елементи ще бъдат намерени по пътя на неголеми корекции.

В приложенията е дадена схемата на нискочестотния усилвател на радиоприемник от класа „Среден супер“, изпълнен с разгледаната по-горе обратна връзка.

б) *Средно мощни усилватели.* При тези усилватели наред с изискването за осигуряване на определена честотна характеристика стоят и изискванията за намаляване на нелинейните изкривявания, нивото на вътрешните шумове и изходното съпротивление. Ясно е, че удовлетворяването им е трудно изпълнимо при една единствена обратна връзка. Обикновено намаляването на нелинейните изкривявания, шумовете и изходното съпротивление може да се получат от една дълбока, честотна независима отрицателна обратна връзка, която обхваща крайното и едно или две стъпала преди него. „Моделирането“ на честотните характеристики се извършва или чрез местна обратна връзка, обхващаща първото стъпало, или с една обща обратна връзка, обхващаща целия усилвател.

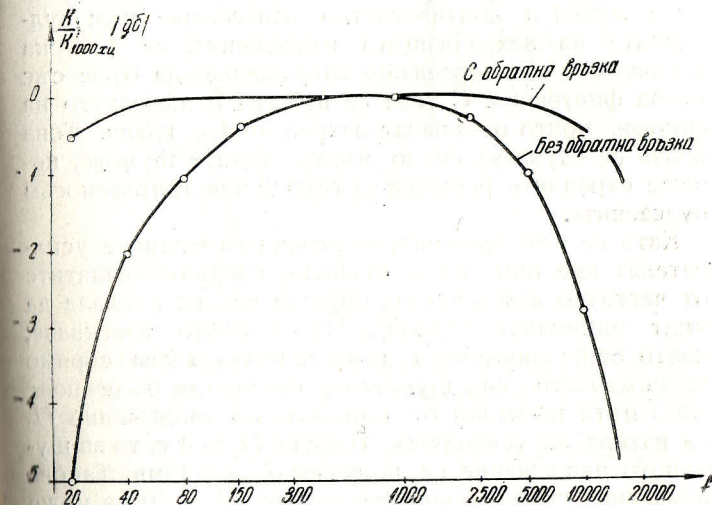
Напрежението на честотно независимата обратна връзка се взема обикновено от вторичната намотка на изходния трансформатор с цел да бъдат намалени и нелинейните изкривявания на последния. При повечето случаи то се подава на катода на съответната лампа-усилвателка на напрежение.

Усилвателните стъпала, изпълнени с два триода ЕСС83 и два пентода EL84, в случай на отсъствие

на честотно независима обратна връзка имат следните изходни данни:

$$K_{1000} = 60; K_{1000} = 2\%; U_{ш} = 30 \text{ мВ}; P_{изх} = 5 \text{ Вт.}$$

Честотната характеристика има вида, показан на фиг. 55.



Фиг. 55

Всички посочени данни се отнасят за случая, когато е приложена специалната ултралинейна обратна връзка, качествата и начинът на изчисление на която бяха разгледани в четвърта глава.

В случая основното изискване, което се предявява към проектираната честотно независима обратна връзка,



е тя да намали брума и нелинейните изкривявания. Тук напрежението на шумовете (брумът) е твърде голямо. Причината за това е, че за реализирането на ултралинейната обратна връзка захранването на екранните решетки с постоянно напрежение става от същия източник, от който се захранват и анодите. Като се вземе под внимание малката чувствителност на крайните лампи в противотактно изпълнение към пулсациите на захранващото напрежение, се допуска източникът на захранващо напрежение да бъде със слаба филтрация. С това се избягва включването на филтри, които оскъпяват захранващата група. Това обаче се отразява силно върху общите шумове, понеже екранните решетки са твърде чувствителни към пулсациите.

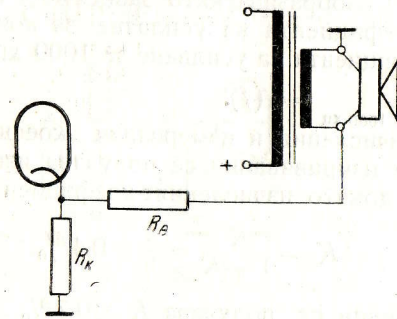
Като се има пред вид, че освен разгледаните усилвателят има още едно стъпало, следва обхваанатите от честотно независимата обратна връзка стъпала да имат минимални шумове. Най-високото изискване, което беше поставено в настоящата глава спрямо напрежението на шумовете, бе то да бъде поне 1000 пъти по-малко от номиналното напрежение  $U_2$  на изхода на усилвателя. Понеже  $U_2 \approx 4$  в, то за шумовото напрежение се получава  $U_{ш\beta} = 4$  мв. Такова намаление спрямо съществуващото  $U_{ш} = 30$  мв може да се постигне с дълбочина на обратната връзка,

$$1 + \beta K = \frac{30}{4} = 7,5, \text{ т. е. около } 17-18 \text{ дБ.}$$

Както беше посочено в т. 1 на настоящата глава, усилвателят ще има устойчива работа, ако дълбочината на обратната връзка не е повече от 10 дБ (3 пъти). Но тъй като в усилвателя е въведена предварително ултралинейна обратна връзка, която повишава значително стабилността му, може да се

приеме дълбочината на обратната връзка да бъде до 16 дБ (6,5 пъти).

При така приетата дълбочина на обратната връзка коефициентът на нелинейните изкривявания ще стане по-малък от изисквания.



Фиг. 56

Честотно независимата обратна връзка се реализира най-лесно чрез прост съпротивителен делител, който е показан на фиг. 56.

Тъй като  $1 + \beta K = 7,5$  и  $K = 60$ , то  $\beta \approx 0,09$ . От друга страна,

$$\beta = \frac{R_k}{R_k + R_\beta}.$$

Оттук

$$R_\beta = R_k \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right).$$

Но  $R_k$  е определено с оглед режима на работа на триода на ECC83. Тогава

$$R_\beta = R_k \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right) = 1000 \left( \frac{1}{0,09} - 1 \right) = 10\,000 \text{ ома.}$$



Тъй като обратната връзка е честотно независима, то след нейното прилагане честотната характеристика може лесно да се изчисли. Резултатите от изчисленията са показани на фиг. 55. За нагледност в практиката е прието честотната характеристика на усилвателя да се изобразява като зависимост на отношението от коефициента на усилване за коя да е честота и коефициента на усилване за 1000 хц от честотата, т. е.  $\frac{K}{K_{1000 \text{ хц}}} = \varphi(f)$ .

Между изчисления и измервания коефициент на нелинейните изкривявания се получава известна разлика. Така, докато изчисленият коефициент е

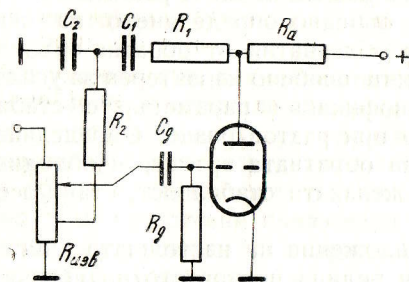
$$K_{\beta} = \frac{K}{1 + \beta K} = \frac{2}{5} = 0,4 \%,$$

то за измерения се получава  $K \cong 0,7 \%$ .

Освен разгледаните във втора глава причини за получаване на такива разлики тук оказва влияние и грешката, която се допуска при самото измерване.

В случая определените честотни характеристики се постигат с помощта на честотно зависима обратна връзка, обхващаща първото стъпало. За да бъде тя отрицателна, налага се напрежението на обратната връзка да се подаде на решетката на лампата. По такъв начин се реализира паралелна обратна връзка. В усилвателя на радиоприемника „Симфония“ действието на тази обратна връзка е комбинирано с действието на честотно зависими елементи, включени във веригата на усилването, т. е. обратната връзка не е в „чист“ вид. С подобна обратна връзка, но без допълнителни елементи е обхваната първата лампа на нискочестотния усилвател на радиоприемника „Концерт“. Чрез нея се постига честотна характеристика,

подобна на тази при маломощните усилватели. Схемата на първото стъпало е показана на фиг. 57. При внимателното ѝ разглеждане се вижда, че веригата на обратната връзка има същия вид, както тази на



Фиг. 57

честотно зависимата обратна връзка при маломощни усилватели. Поради това изчислението ѝ се извършва по същия начин. Разликите, които съществуват, се отнасят до предварителните условия.

При определянето на стойностите на елементите трябва да се изхожда на първо място от условието  $R_1 \gg R_a$  с цел да не се шунтира товарното съпротивление и да не се намали усилването на стъпалото.

Изводното съпротивление  $R_{изв}$  е обикновено от порядъка на 100 кома. По-малки стойности се реализират трудно.

Освен честотната характеристика интерес представлява и входното съпротивление. Изчислението му може да се извърши въз основа на разглежданията и изводите, направени във втора глава. Предвари-



телно обаче може да се каже, че то ще бъде най-малко там, където обратната връзка е най-дълбока, т. е. за средните честоти. За ниските и високите честоти намалението му ще бъде по-малко.

в) *Мощни усилватели.* В разгледаните дотук примери беше описано определянето на основните параметри на обхванатия от обратна връзка усилвател. Единственият особено характерен за усилвателите за жична радиофикация параметър е стабилността на усилването при разтоварване. Определянето на дълбочината на обратната връзка, необходима за получаване на желаната стабилност, става лесно по формула 29.

Като приложение на настоящата книга са дадени схемите на редица нискочестотни усилватели. В тях веригите и елементите на обратните връзки са начертани с удебелени (плътни) линии. На някои места с удебелени линии са посочени само отделни елементи, но не и вериги. Това са тъй наречените развързващи елементи, служещи за подобряване на устойчивостта.

## 1. Общи сведения

При конструирането на радиоприемните устройства и нискочестотните усилватели (в промишлени или любителски условия) се постигат определени качествени показатели, които определят напълно техническия им облик и гарантират тяхната изправност. Обикновено тези качествени показатели се посочват в описанието или паспорта на апарата. В процеса на експлоатацията е възможно някои от качествените показатели да се отклонят от номиналните си стойности поради най-различни причини. В резултат от това се нарушава качеството на възпроизвеждането, а в някои случаи се стига и до пълно прекратяване на възпроизвеждането.

Изменението на кой и да е от качествените показатели от номиналната му стойност се окачествява като повреда. Тогава следва да се вземат мерки за отстраняването на тази повреда.

При поправката и разработката на един радиоприемник, телевизор и какъвто и да е усилвател, в схемата на който има обратни връзки, много често се среща явлението самовъзбуждане. То може да се дължи на най-различни причини и да се поражда в най-различни места на схемата. Самовъзбуждането изважда устройството от работа и затова следва да се отстрани.

Самовъзбуждането се смята за една от най-трудните повреди при ремонта. За отстраняването му от



монтъора се изискват по-добра квалификация, последователност и аналитичност в работата. При некомпетентна поправка е възможно да се отстранят самовъзбуждането, но същевременно да се нарушат номиналните стойности на качествените показатели, които обуславят доброто възпроизвеждане. Един пример: при една „поправка“ подреждането на свързващите монтажни проводници или *RC* елементи е така грубо нарушено, че в резултат от това са създадени допълнително паразитни обратни връзки. От своя страна те ще увеличат дълбочината на отнапред съществуващата отрицателна обратна връзка или ще създадат нова положителна такава. Както вече бе споменато, много дълбоката отрицателна връзка, а също и положителната такава могат да причинят самовъзбуждане на усилвателя. Всеки неопитен монтъор, който не познава свойствата и влиянието на обратните връзки, може по пътя на сляпото отпояване и запояване на елементите на отделни вериги да попадне на веригата на обратната връзка и прекъсвайки я, да направи „чудото“ — да спре самовъзбуждането. За такъв „монтъор“ спирането на самовъзбуждането е достатъчно указание, че поправката е завършена, защото радиопаратът „свири“. Даже при малко по-голяма „находчивост“ могат да се икономисат няколкото елемента на веригата на обратната връзка, с което ще настъпи и ефект на увеличаване на усилването. Всичко би било, разбира се, в ред, ако се искаше какво и да е „свирене“, а не висококачествено възпроизвеждане. Очевидно е, че след такова елиминиране на действието на отрицателната обратна връзка не може въобще да се мисли за висококачествено възпроизвеждане, тъй като са нарушени някои или всички негови съществени показатели, като по-

добрена честотна характеристика, малки нелинейни изкривявания, ниско ниво на шумовете, подобрена товарна характеристика и др.

Всичко това налага известна задължителна последователност при работа със схеми, в които има обратни връзки. Тази последователност се състои в следното:

- а) Проучване действието на схемата.
- б) Ограничаване мястото и причините за самовъзбуждането.
- в) Отстраняване на самовъзбуждането и контролна проверка.

## 2. Проучване действието на схемата. Измервателна апаратура

Проучването на действието на схемата на устройството, подлежащо на поправка, има за цел да предпази монтъора от излишни операции, които поради незнание водят несъзнателно до нарушаване и на други параметри, които не са обект на поправката.

Проучването обхваща основното запознаване с принципите, залегнали в схемата, изясняване (качествено и количествено) на влиянието на всеки възел и всеки елемент, намерил място в схемата. Това влияние трябва да се свързва винаги с качествените показатели на устройството, дадени в описанието или паспорта на същото.

След установяване на общите принципи и предназначението на отделните елементи трябва да се обърне особено внимание на всички съществуващи вериги на обратни връзки. Те трябва да се очертават с цветен молив върху схемата. Трябва да се определят видът, предназначението и влиянието на всяка



една поотделно. Тъй като често веригите на обратните връзки са по-сложни (съставени от повече елементи), то това затруднява определянето на вида на обратната връзка. При такива случаи може да се постъпи по следния начин. Мислено се прекъсва и дава накъсо веригата на товара и се разсъждава така: ако при прекъсване на веригата на товара напрежението на обратната връзка не изчезне, а при даването му накъсо напрежението на обратната връзка изчезне, обратната връзка е по напрежение. Обратно, ако напрежението на обратната връзка изчезне при прекъсване на веригата на товара, а не изчезне при даването му накъсо, обратната връзка е по ток. Ако напрежението на обратната връзка се запазва както при прекъсване, така и при даване накъсо на веригата на товара, обратната връзка е смесена.

За определяне начина на подаването на напрежението на обратните връзки се прибегва до мисленото прекъсване или даване накъсо на източника на сигнала.

Ако напрежението на обратната връзка не се подава на входа на стъпалото при мисленото прекъсване на веригата на източника, а се подава при даването му накъсо, обратната връзка е последователна. Ако напрежението на обратната връзка се подава на входа при прекъсване веригата на източника на сигнала, но не се подава при неговото късо съединение, обратната връзка е паралелна. В случай, че напрежението на обратната връзка се подава на входа както при прекъсване, така и при даване накъсо на веригата на източника, обратната връзка е смесена по отношение на входа.

Освен определянето на вида на обратната връзка и нейното влияние върху отделните параметри на усилвателя необходимо е да се знае още и нейната дълбочина  $(1 + \beta K)$ . Ориентировъчно това може да стане предварително чрез прости изчисления, като се използват стойностите на елементите, включени във веригата на обратната връзка за всяка конкретна схема. След това трябва експериментално да се определи точната дълбочина на обратната връзка. Това се постига по следния начин. Разединява се веригата на обратната връзка и при подаден определен сигнал на входа на усилвателя се измерва неговото изходно напрежение  $U_2'$ . След това се възстановява веригата на обратната връзка и при същото ниво на входния сигнал отново се измерва изходното напрежение  $U_2''$ . Дълбочината на обратната връзка (в случай, че тя е отрицателна) се определя от израза

$$1 + \beta K = 20 \lg \frac{U_2'}{U_2''} [\text{дб}].$$

Ако

$$U_2' = 3 \text{ в} \text{ и } U_2'' = 1 \text{ в}, \text{ то } 1 + \beta K = 20 \lg \frac{3}{1} \approx 10 \text{ дб}.$$

При измерването нивото на входния сигнал трябва да бъде такова, че изходното напрежение да има не-изкривена (без отрязани върхове) форма.

За отстраняване на самовъзбуждането и възстановяване на действието на обратните връзки (в случай, че то е нарушено през време на експлоатацията) е необходимо минимална измервателна апаратура (ако, разбира се, повредата не представлява ясно видими механически дефекти). Наличието на такава апаратура



тура пести много време и помага за бързото и точно откриване вида и мястото на самовъзбудането. С нея може да се провери и устойчивостта на усилвателя след прилагане на мерките против самовъзбудането. Най-необходимата измервателна апаратура за една любителска лаборатория на ДОСО или лаборатория за ремонт се състои от универсален измервателен апарат (наричан още авометър), тонгенератор, сигналгенератор, лампов волтметър, осцилограф и глимлампа със затворена накъсо навивка.

Посредством комбинирания измервателен уред за постоянен и променлив ток се установяват режимите на работа на отделните стъпала, а в някои случаи и наличността на собствените колебания при самовъзбудане. Този уред трябва да има вътрешно съпротивление около 20 000 ом/в. В противен случай той би шунтирал веригите, подлежащи на измервания, и резултатите ще бъдат неточни. Като подходящи се считат известните у нас Görz Universal 3 и др.

Тонгенераторът, сигналгенераторът и ламповият волтметър са необходими за настройка и проверка на някои от параметрите на усилвателя (честотни характеристики, ниво на шумовете и др.).

Осцилографът и глимлампата с навивка накъсо са необходими за установяване на мястото и характера на самовъзбудането и преди всичко на неговата честота. Освен това осцилографът е много удобен уред за проследяване на зависимостта на нелинейните изкривявания от дълбочината на обратната връзка при липса на клирфакторизмерител.

Подходящи за работа тонгенератори, сигналгенератори, лампови волтметри и осцилографи са и тези, произведени у нас от развойното предприятие „Електроника“. Глимлампата с навивка накъсо може да

се направи с подръчни средства при положение, че се разполага с каква и да е глимлампа.

### 3. Ограничаване и премахване на самовъзбудането

Въпросът с ограничаването и премахването на самовъзбудането ще се разгледа по-обширно, за да може да ползува еднакво както младия радиоинструктор-любител в неговата проектантска работа, така и любителя или монтьора, които имат за задача да отстранят самовъзбудането и да използват всички предимства на обратните връзки. Като най-подходящ обект може да послужи радиоприемното устройство, тъй като в него съществуват както нискочестотни, така и височестотни усилватели. Начинът на локализирането на самовъзбудането и мерките за неговото премахване могат аналогично да бъдат пренесени в различните видове нискочестотни усилватели за жична радиофикация, кинелефикация, магнитофонни устройства и др.

При едно радиоприемно устройство, намиращо се в състояние на самовъзбудане, първото нещо, което трябва да се направи, е да се определи в коя част на схемата му възниква самовъзбудането и на каква честота. Грубо това може да се определи от характера на звуковия ефект. Самовъзбудането на високи честоти се схваща звуково като пицене или свистене. Понякога то се придружава и с едно зачервяване на решетките и особено на анодите на крайните лампи. Самовъзбудането на ниска честота се характеризира звуково най-често като бумтене или бумгене с прекъсване (моторботинг). Мястото на самовъзбудането се определя по следния начин.



Изваждаме междинночестотната лампа пред детекторното стъпало. С това изключваме високочестотната част на радиоприемника. Ако шумът или звуковият ефект не престане, това е указание, че самовъзбуждането е в нискочестотната част (предусилвател и крайно стъпало). След това трябва да се установи от какво произлиза самовъзбуждането в нискочестотния усилвател. Възможни са главно две причини: самовъзбуждане от веригата на отрицателната обратна връзка или поради наличност на паразитна обратна връзка с индуктивен или капацитивен характер.

Влиянието на отрицателната обратна връзка върху самовъзбуждането се проверява чрез прекъсването ѝ. Ако след прекъсване на обратната връзка самовъзбуждането престане, трябва да насочим вниманието си към правилността на включването на обратната връзка и нейната дълбочина. В случай, че напрежението на отрицателната обратна връзка е неправилно подадено, тя се превръща в положителна и при подходяща дълбочина и фаза създава условия за генерация. Ако при промяна на краищата на веригата на обратната връзка самовъзбуждането престане и коефициентът на усилването се намали, обратната връзка е била включена обратно. С промяната на краищата на веригата е възстановено нормалното ѝ положение. Ако и след тая операция самовъзбуждането продължи, следва да се провери дълбочината на обратната връзка по известния метод. Преди това трябва да се огледа правилността на свързването на дроселите и трансформаторите (особено входните и драйверните). Сменяването на местата на техните краища в известни случаи намалява внасяните фазови измествания от самите трансформатори и дросели и устойчивостта се подобрява.

При правилно реализирана верига на отрицателната обратна връзка самовъзбуждането може да се получи в случай, че тя обхваща по-голям брой усилвателни стъпала. Тогава за горните гранични честоти на пропускания обхват може да се получи промяна във фазата на обратната връзка и тя да стане положителна. Включването на кондензатор с капацитет 100—200 пф в анодната верига на една от лампите (за препоръчване е в предусилвателя) намалява усилването за високите честоти и възстановява устойчивостта. Увеличаване на устойчивостта на нискочестотния усилвател и коригиране на фазовата му характеристика може да се постигне, като между двата края на първичната намотка на изходния трансформатор се включи кондензатор с капацитет 1000—5000 пф. Тези два кондензатора са намерили широко приложение в доста схеми на радиоприемници и усилватели. Прекъсването на единия от тях или и на двата заедно през времето на експлоатацията води в повечето случаи до самовъзбуждане на усилвателя. Затова проверката на тяхната изправност е винаги наложителна.

Ако във веригата на обратната връзка са включени входни и драйверни трансформатори, те също трябва да са шунтирани с активни съпротивления.

Втората главна причина за самовъзбуждането са паразитните обратни връзки. Когато самовъзбуждането има ефект на „моторботинг“, трябва да се проверят стойностите на капацитетите на развързващите и изглаждащите филтри. С течение на времето капацитетът на кондензаторите намалява. В резултат от това се повишава вътрешното съпротивление на нахранващия източник. Създава се условие за самовъзбуждане. Проверката на филтровите кондензатори става удобна, като паралелно на тях се включват други



такива. Всяко увеличение на капацитета на филтровите кондензатори е полезно.

Добро средство против „моторботинга“ е и намаляването на капацитета на свързващите кондензатори  $C_g$  между отделните стъпала.

Не като последна мярка против самовъзбуждането трябва да бъдат прегледът и удачното подреждане на самия монтаж. Както е известно, неправилният монтаж може да стане причина за създаване на нови паразитни обратни връзки, ефектът от които е или увеличаване на дълбочината на съществуващите отрицателни обратни връзки, или създаване на нови положителни такива. И в двата случая устойчивостта на усилвателя се влошава, а вероятността за самовъзбуждане нараства. Затова се налага да се вземат всички мерки за подходящо взаимно разположение на проводниците с ниско и високо ниво на напрежение или токове, както и екраниране на така наречените чувствителни вериги. Екраните на проводниците, прехвърлящите кондензатори и трансформаторите трябва да бъдат стабилно закрепени в най-подходящата точка на шасито, и то близо до решетките на лампите.

Често в радиоприемниците и усилвателите решетъчното преднапрежение за някои лампи се взема от общ делител, включен между минуса на захранващия източник и шасито. При такава схема е възможна също появата на паразитна обратна връзка, чийто характер е еднакъв с този на описаната паразитна обратна връзка чрез захранващия аноден източник. Борбата със самовъзбуждането, възникнало от такава обратна връзка, се води също посредством развързващи филтри, чиято изправност се установява по аналогичен начин. Капацитетите на филтровите кондензатори са от

порядъка на 0,1 до 1 мкф, а съпротивленията — от порядъка на 100—200 ком.

Указаните дотук мерки са не винаги достатъчни за отстраняване на самовъзбуждането, особено що се касае до мощните широколентови нискочестотни усилватели.

Често пъти например за увеличаване на стабилността на усилването се налага отрицателната обратна връзка да обхване няколко стъпала. В такива случаи фазовите измествания във веригата на обратната връзка понякога надминават  $180^\circ$ . В резултат от това се създават условия за самовъзбуждане даже и при недълбока отрицателна обратна връзка. Ето защо понякога в многостъпалните усилватели с дълбока отрицателна обратна връзка се употребяват специални вериги (филтри) за честотна и фазова корекция. Чрез тях се увеличава устойчивостта против самовъзбуждането. Те влияят в ония места на честотно-фазовата характеристика, където фазовият ъгъл се стреми към  $180^\circ$ . Коригиращата верига може да се включи както във веригите на усилвателя, така и във веригата на обратната връзка. В практиката се употребяват и двата варианта, тъй като и при двата се получава еднаква устойчивост на усилвателя.

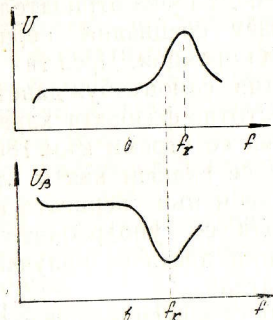
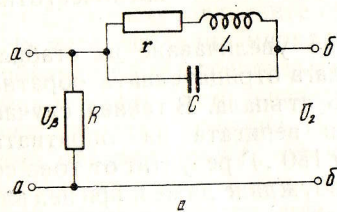
Схемата на коригиращата верига зависи най-вече от вида на честотната характеристика, за която е предназначена. Ето защо трябва за всеки отделен случай да се постъпва конкретно. Въпреки това известни са няколко прости случая на честотно-фазови корекции, при които в повечето практически случаи задачата се решава задоволително.

При честотна характеристика с ярко изразен връх (фиг. 58a) съществуват условия за неустойчивост на усилвателя, тъй като за честотите около върха фа-



зовите измествания са значителни и създават условия за самовъзбуждане.

Устойчивостта може да се възстанови, като във веригата на обратната връзка се включи резонансен кръг (фиг. 58а), настроен на честота, която е малко по-ниска от тази на максималното усилване (фиг. 58б и в).



Фиг. 58

Изобразеният на фиг. 58а кръг се нарича филтър-пробка. Той се състои от паралелния  $LC$  кръг и съпротивлението  $r$ . Включва се последователно на веригата на обратна връзка, като точка  $a$  е откъм страната на изхода на обратната връзка, а точка  $b$  — от страната на входа на същата.

Кръгът е настроен на честота, която е близка на тая, съответстваща на върха на честотната характеристика. Резонансното съпротивление  $R_e = \frac{L}{rC}$  на този кръг е значително. То образува делител на напрежение заедно със съпротивлението  $R$ . Ако за честотата на върха съпротивлението  $R_e > R$ , дълбочината на обратната връзка се намалява за тази честота и устойчивостта на усилвателя се възста-

новява. Този филтър внася известно затихване, респ. намаление на дълбочината на обратната връзка и за средните честоти на пропускания обхват. Това затихване зависи от стойностите на съпротивленията  $R$  и  $r$  (тук  $r$  представлява активното съпротивление на бобината на кръга). За да бъде филтърът ефикасен, съпротивлението  $R$  трябва да бъде поне 10—20 пъти по-голямо от съпротивлението  $r$  и значително по-малко от резонансното съпротивление  $R_e$ .

За устойчивостта на усилвателните устройства, обхванати от обратна връзка, представлява интерес и видът на честотната характеристика далече зад границите на работния честотен обхват. Обикновено там фазовите измествания са най-големи и затова е налице възможност за самовъзбуждане. Като средство за борба против такова самовъзбуждане служат ограничителните филтри за ниска и висока честота.

На фиг. 59а е показана схемата на ограничителния филтър за ниска честота. Той подобрява устойчивостта на усилвателя за много ниските честоти поради голямото затихване, което внася за същите. По такъв начин факторът на обратната връзка  $\beta K$  се намалява.

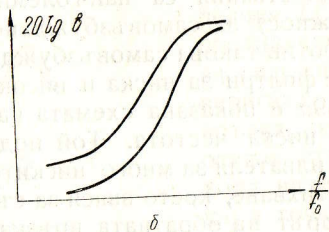
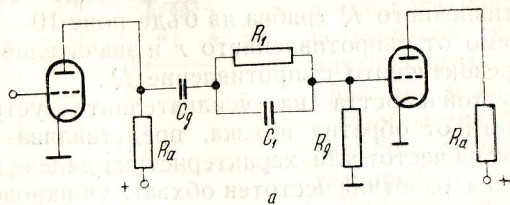
За средните честоти ограничителят практически не внася затихване. Поради това усилването за тях не се намалява.

На фиг. 59б са показани две честотни характеристики на внасяното от ограничителя затихване ( $20 \lg b$ ), изчислени за две стойности на  $b_{\text{макс}}$ .

За добрата ефикасност на ограничителя за ниската честота трябва да се има пред вид следното. Честотата  $f_0$ , за която той трябва да внесе максимално фазово изместване, респ. затихване, трябва да се избере няколко пъти по-висока от честотата на самовъз-



буждането  $f$ . Максималното затихване  $b_{\text{макс}}$  се движи в границите от 4 до 10 пъти, т. е. от 12 до 20 дБ. Обикновено ограничителят за ниската честота се включва между две от стъпалата на предусилвателя (вж. ТУУ 100). При това капацитетът на свързващия



Фиг. 59

междустъпален кондензатор  $C_g$  трябва да бъде значително по-голям от капацитета на ограничителния кондензатор  $C_1$ .

Елементите на ограничителя  $C_1$  и  $R_1$  се определят чрез следните формули:

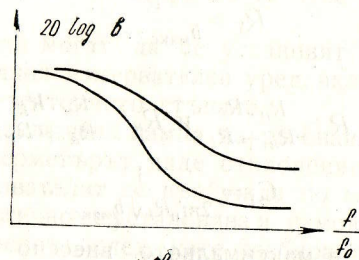
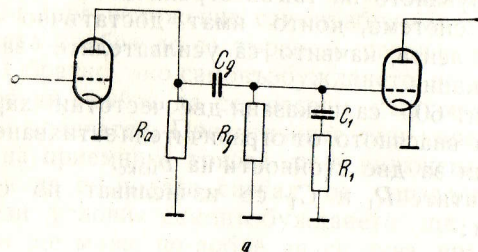
$$R_1 = R_g (b_{\text{макс}} - 1); \quad C_1 = \sqrt{\frac{b_{\text{макс}}}{2\pi f_0 R_1}}.$$

Тук  $R_g$  е утечното съпротивление;  
 $f_0$  — честотата на максималното затихване.

Ако  $b_{\text{макс}} = 6$ ,  $f_0 = 6$  хц и  $R_g = 200$  ком, то  
 $R_1 = 200\,000 \cdot (6 - 1) = 10^6$  ома;

$$C_1 = \sqrt{\frac{6}{6,28 \cdot 6 \cdot 10^6}} \approx 0,4 \text{ мкф}.$$

Свързващият капацитет  $C_g$  ще бъде 1 мкф. Колкото честотата на самовъзбуждането е по-далече от граничната ниска честота, толкова ограничителят е по-ефикасен.



Фиг. 60

В борбата със самовъзбуждането на усилвателите на високи честоти, които са далеч от горната гранична честота, често се използва високочестотният ограничител или ограничителят на висока честота (фиг. 60a).



Той представлява последователна верига от съпротивлението  $R_1$  и кондензатора  $C_1$ , която се включва паралелно на товарното съпротивление  $R_a$ .

Ограничителят действа по следния начин. За много високите честоти товарното съпротивление  $R_a$  се оказва шунтирано от съпротивлението  $R_1$ . Поради това коефициентът на усилване на стъпалото силно намалява.

Използуването на такъв ограничител е целесъобразно за системи, които имат достатъчно широка честотна лента, каквито са усилвателите за жична радиофикация.

На фиг. 60б са показани две честотни характеристики на внасяното от ограничителя затихване ( $20 \lg b$ ), изчислени за две стойности на  $b_{\text{макс}}$ .

Елементите  $R_1$  и  $C_1$  се изчисляват по следните формули:

$$R_1 = \frac{R}{b_{\text{макс}} - 1},$$

където

$$R = \frac{R_n \cdot R_i}{R_n + R_i} \text{ и } R_n = \frac{R_a \cdot R_g}{R_a + R_g};$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_0 R_1 \sqrt{b_{\text{макс}}}}.$$

Тук  $b_{\text{макс}}$  е максималното внесено затихване за висока честота;

$f_0$  — честотата на максималното фазово изместване;

$R_i$  — вътрешното съпротивление на лампата пред ограничителя.

Обикновено  $C_1$  се движи от 300 до 2000 пкф, а съпротивлението  $R_1$  — от 1000 до 5000 ом.

След установяване на изправността на нискочестотния усилвател в едно радиоприемно устройство се поставя отново извадената преди лампа на междинночестотния усилвател. Ако самовъзбуждането продължава, това е указание, че то се поражда в резонансния или междинночестотния усилвател. Изваждането на лампата на резонансния усилвател дава възможност за още по-тясно ограничаване на мястото, в което се намира източникът на самовъзбуждането. Ако при това положение самовъзбуждането спре, то причината трябва да се търси в резонансния усилвател. Обратно, ако самовъзбуждането не спре, вниманието ни трябва да се насочи към междинночестотния усилвател. При всичките тези операции на входа на приемника трябва да е включена антената или пък да се подава сигнал от сигналгенератора. При тези условия самовъзбуждането ще бъде по-силно и ще може по-добре да се чува чрез високоговорителя.

Колеланията могат да се установят и с помощта на универсалния измервателен уред, включен във веригата на детекторното стъпало.

Ако при изключена лампа на резонансния усилвател милиамперметърът даде отклонение, това означава, че усилвателят се възбужда по междинна честота. Аналогично се установява и самовъзбуждането по висока честота, след като, разбира се, се включи в действие резонансният усилвател. При това от предварителна проверка трябва да е установено, че междинночестотният усилвател работи стабилно.

Причини за самовъзбуждането на резонансните и междинночестотните усилватели могат да бъдат паразитните обратни връзки от индуктивен и капацитивен характер, вътрешното съпротивление на захран-



ващите източници и др. Отстраняването на самовъзбуждането трябва да започне с внимателно оглеждане на разположението на монтажа, проверка на изправността на всички елементи, допринасящи за устойчивата работа на усилвателя, и едва след това да се приложат всички препоръчани мерки по отношение на нискочестотните усилватели. Добри резултати в борбата за премахване на самовъзбуждането могат да се получат, когато се намали силата на връзката на междинночестотните филтри. Като крайна и нежелателна мярка може да се приложи шунтиране на кръговете на междинночестотните филтри с активно съпротивление от порядъка на няколко стотици килоома. Такова шунтиране намалява еквивалентното съпротивление на кръга, а оттам и усиляването на стъпалото. Намалява се също и качественият фактор на междинночестотните кръгове. Това води до намаляване на избирателността по съседен канал. Много често причина за самовъзбуждане на междинночестотния усилвател е паразитната обратна връзка чрез вътрешното съпротивление на захранващия източник. В такъв случай проверката и възстановяването на нормалното действие на развързващите филтри е сигурна мярка за отстраняване на самовъзбуждането.

Не трябва да се забравя, че самовъзбуждане на междинночестотния и резонансният усилвател може да възникне и от паразитна обратна връзка, причинена от електронните лампи. Това може да се провери и след това самовъзбуждането да се отстрани чрез подмяна на лампите с други, взети от редовно работещо устройство.

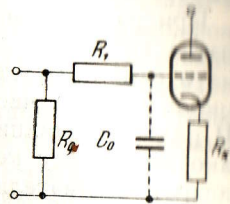
Паразитна обратна връзка може да възникне чрез захранващия източник и при по-малък брой усилвателни стъпала поради това, че е възможно междин-

ночестотните колебания да преминат през детектора в предусилвателното нискочестотно стъпало. Последното се обръща в усилвател на междинна честота и внася допълнителни фазови съотношения, създаващи условия за самовъзбуждане. Такова самовъзбуждане може да се премахне, като между решетката на лампата и утечното съпротивление се включи едно съпротивление  $R_1$  от порядъка на 1 до 20 ком (фиг. 61).

Това съпротивление образува заедно с паразитния входен капацитет  $C_0$  на предусилвателната лампа Г-образен филтър, чрез който се филтрира напрежението с междинна честота.

Друг често срещан вид самовъзбуждане при радиоприемниците и усилвателите е прекъсващата се генерация. Тя може да възникне освен по досега описаните начини още и по пътя на електроакустическата обратна връзка. Прекъсващата генерация се открива най-лесно по трепкането на индикатора на настройката (окото) или при отсъствие на такъв с помощта на универсален уред, включен във веригата на детектора. И в двата случая индикаторът на настройката или стрелката на уреда трептят в такт с появяването и изчезването на колебанията на самовъзбуждането. Мерките за отстраняване на прекъсващата се генерация са аналогични с разгледаните дотук мерки за отстраняване на другите видове самовъзбуждане и трябва да се използват в същия порядък.

В случай, че прекъсващото самовъзбуждане е предизвикано от електроакустическа паразитна обратна



Фиг. 61



връзка, то се придружава и от силен сигнал във високоговорителя. Обикновено такова самовъзбуждане възниква, когато на входа на устройството се подава някакъв сигнал. Самовъзбуждането изчезва, ако нивото на последния се намали.

При разглеждането на електроакустическата обратна връзка бе споменато, че тя създава непрекъснатото самовъзбуждане с честота около средните или около ниските честоти, наречено микрофонен ефект. В радиоприемниците последният се установява лесно, ако започнем с копчето за настройка да разстройваме апарата внимателно малко встрани (вляво и вдясно) от точката на точната настройка. При тази манипулация от високоговорителя се чува характерният нискофестотен сигнал, чието ниво намалява или въобще изчезва в момента на преминаване на точката на точна настройка.

Микрофонният ефект се проявява с най-голяма мощност в обхвата на късите вълни, и то откъм високите честоти на обхвата. Затова и борбата тук е много по-трудна, особено ако късовълновият обхват е много широк. Това се дължи на обстоятелството, че незначителни промени в стойността на капацитета на променливия кондензатор водят до значителни честотни промени.

За отстраняването на микрофонния ефект трябва да се провери дали са налице всички амортизиращи елементи, чиято цел е разкъсване на акустическата обратна връзка. Такива елементи са гумените подложки под въртящия кондензатор, между кутията и шасито, между високоговорителя и кутията и др. Всички тези подложки трябва да са еластични, за да може механическите трептения да затихват в тях. На щателна проверка трябва да бъде подложен и вър-

тящият кондензатор, който е също елемент във веригата на акустическата обратна връзка, превръщайки механическите колебания в електрически. В него е недопустимо да има нестабилно занитени роторни или статорни пластини, тъй като те се поддават лесно на вибрации и стават източник на микрофонен ефект. Добро практическо средство за укрепването на нестабилни кондензаторни пластини е намазването на местата на занитването на същите с бяла блажна боя. Тя прониква в празнините, останали от недостатъчното занитване, и укрепва връзката.

Много често източник на микрофонен ефект може да бъде счупено изолационно колче, което се намира между статора и шасито на кондензатора. Откриването му става чрез внимателно оглеждане и леко повдигане на статора по посока на ротора на кондензатора. Замяната на счупеното колче със здраво такова възстановява стабилността на въртящия кондензатор и микрофонният ефект изчезва.

На проверка подлежат и всички съединителни проводници и бобини около хетеродина. Съединителните проводници трябва да бъдат къси и укрепени в свързващи ланси. Бобините трябва да бъдат също добре прикрепени. Разбира се, най-добри резултати в това отношение се получават при печатния монтаж.

Към мерките за отстраняване на микрофонния ефект спада и добрата настройка на междинчестотните филтри. Тя трябва да осигурява симетрична резонансна крива. Всяка несиметрична резонансна крива създава условия за преминаване на амплитудната модулация в честотна и оттам — за поява на микрофонен ефект.

Често пъти във веригата на електроакустическата обратна връзка попада електронната лампа, в която



се създават също условия за микрофонен ефект, когато връзките между отделните ѝ електроди не са стабилни. На пръв поглед може да се смята, че смяната на една или друга лампа би преустановила самовъзбуждането. В някои случаи това наистина помага. Но тъй като във всяка електронна лампа съществуват малко или много нестабилни елементи, добра мярка в борбата срещу микрофонния ефект представлява амортизационното отделяне на цоклите на лампите от шасито. Това е особено важно за лампите на усилвателите на слаби сигнали. По този начин може да се разкъса акустическата обратна връзка и микрофонният ефект да изчезне. Тази мярка особено много се практикува при микрофонните предусилватели.

Понякога в усилвателните устройства се забелязва самовъзбуждане на висока или свръхвисока честота. То се открива най-лесно с неоновата лампичка с навивка на късо, поставена близо до изхода на усилвателя. При наличност на такова самовъзбуждане лампичката светва.

Колеланията на самовъзбуждането могат лесно и удобно да се наблюдават и на екрана на електроннолъчевия осцилограф. При такива случаи синусоидата на полезния нискочестотен сигнал се размазва (както при разфокусировка на лъча) или по нея се виждат петна от назъбени участъци. В някои случаи осцилограмата показва двете непрекъснати напрежения — на полезния сигнал и на самовъзбуждането.

Причината за такова самовъзбуждане трябва да се търси в дефектни стабилизиращи елементи, увеличено разсейване на трансформаторите (ако някой от тях е пренавиван), нарушена екранировка на някои

от елементите или свързващите вериги. Внимателното оглеждане може бързо да покаже причините и оттам мерките за отстраняването на самовъзбуждането.

Добро средство за отстраняване на самовъзбуждането са и антипаразитните или тампонни съпротивления, които се включват в серия близо до изходите на решетките и анодите на лампите. Те имат стойност от 30 до 50 ома. Ако в решетъчната верига няма ток, стойността на тези съпротивления може да бъде увеличена.

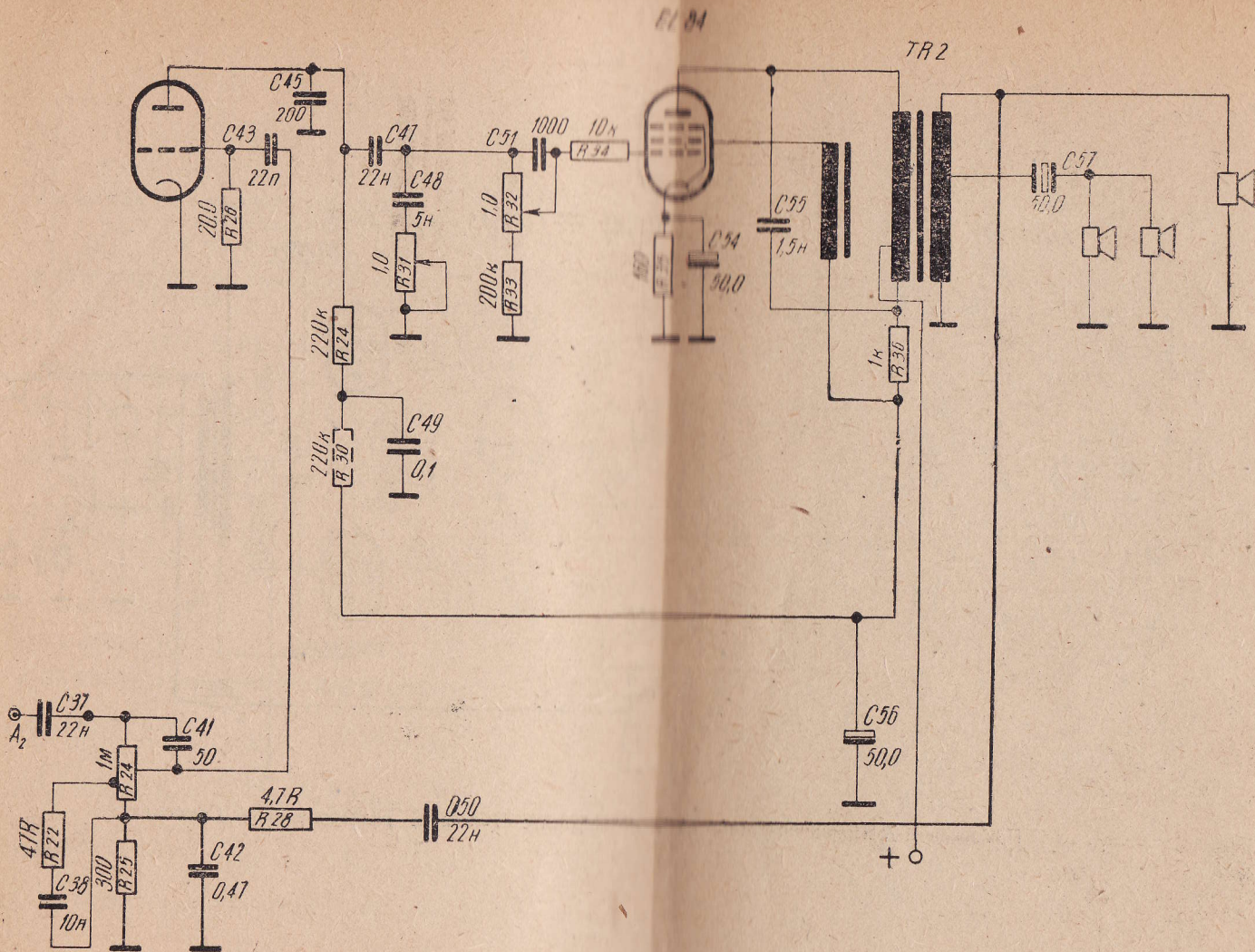
Последният етап от ремонта на устройствата с обратна връзка е проверката на параметрите, обуславящи висококачественото възпроизвеждане. Те трябва да се измерят по познатите методи с помощта на разполагаемата измервателна апаратура. След това получените данни трябва да се сравнят с тези от паспорта. Само съвпадането на двата вида данни е гаранция, че ремонтът е извършен добре и висококачественото възпроизвеждане е възстановено.



Редактор Сп. Пецулев  
 доп. редактор Л. Басарева Художник на корицата Т. Стоева  
 и редактор Дим. Боев Коректор Л. Цонкова

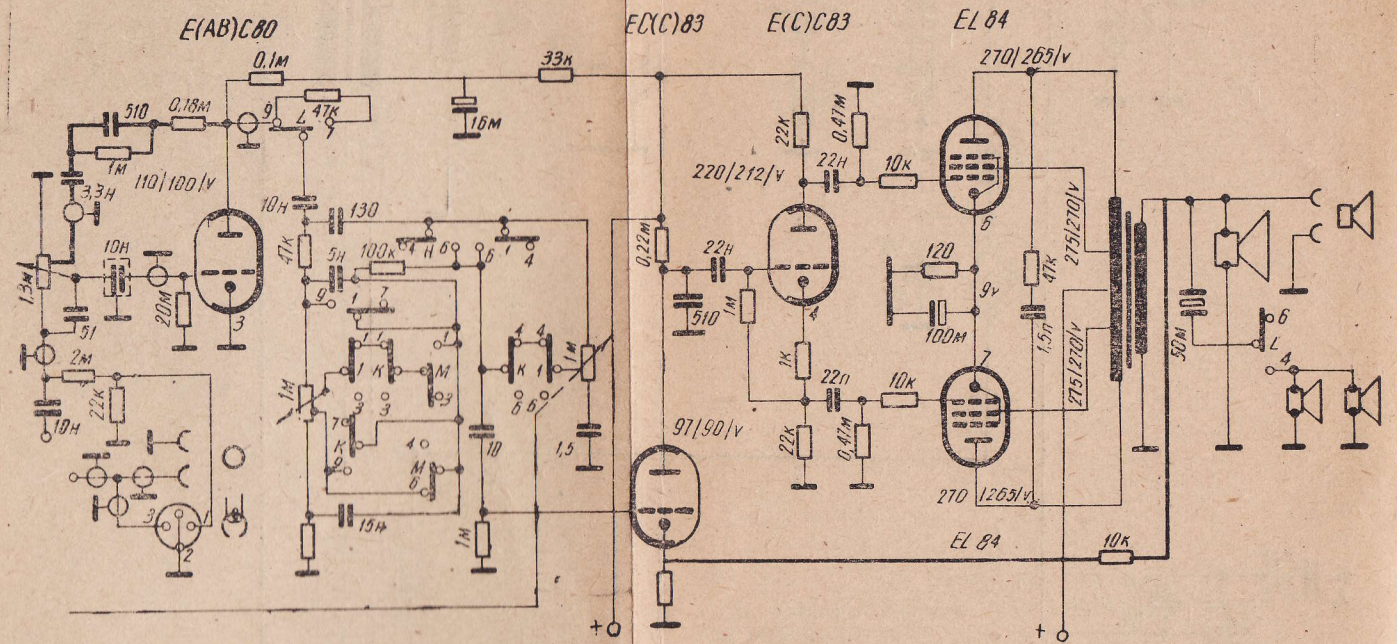
Дата за набор на 12. VI. 1962 г. Подписана за печат на 31. VIII. 1962 г.  
 Издатни коли 10,10 Тираж 5,082 Издателски коли 6,00  
 Формат 71 × 100/32 Темат. № 1688 Издателски № 2432/III-2  
 Цена 0,30 лв.

Държавно издателство „Техника“, бул. „Руски“ 6, София  
 Издателска печатница „Тодор Димитров“, кл. № 1 — София, пор. № 14547



Приложение 1. Принцилна схема на нискочестотните стъпала на приемник „Среден супер“





Приложение 2. Принципна схема на нискочестотните стъпала на радиоприемника „Симфония“



Обратни връзки в усилвателите

Стр.	Ред	Напечатано	Да се чете	По вина на
4	2, 3 отгоре	в нискочестотните и високочестотните усилватели . . .	в нискочестотните усилватели	автора
12	12 отдолу	Товарна характеристика	г) Товарна характеристика	"
17	—	фиг. 5, фиг. 6	фиг. 6, фиг. 5	техн. ред.
40	16 отдолу	(фиг. 17а и 17в)	(фиг. 17а и 17б)	автора
40	7 "	(фиг. 17б)	(фиг. 17в)	"
42	1 "	$K_{\beta} = \frac{K}{1+\beta K}$	$k_{\beta} = \frac{k}{1+\beta K}$	редактора
43	3 отгоре	$K$	$k$	автора
43	10 "	$K_{\beta} = \frac{K}{1+\beta K}$	$k_{\beta} = \frac{k}{1-\beta K}$	"
72	2 отдолу	$\Delta U_1$	$\Delta U$	"
73	1 отгоре	$\Delta U_1$	$\Delta U$	"
91	11 отдолу	и решетъчни токове	с решетъчни токове	коректора
118	табл. 3	$K_{\beta} = \frac{K}{1+\beta K}$	$K_{\beta} = \frac{K}{1+\beta K}$	печатн.
123	13 отгоре	$\beta_m = \frac{R_2}{R_1+R_2} R_2$	$\beta_m = \frac{R_2}{R_1+R_2}$	коректора
126	табл. 5	$K_{\beta} = \frac{K}{1+\beta K}$	$K_{\beta} = \frac{K}{1+\beta K}$	автора
154	1 отгоре	то се придружава	тя се придружава	"