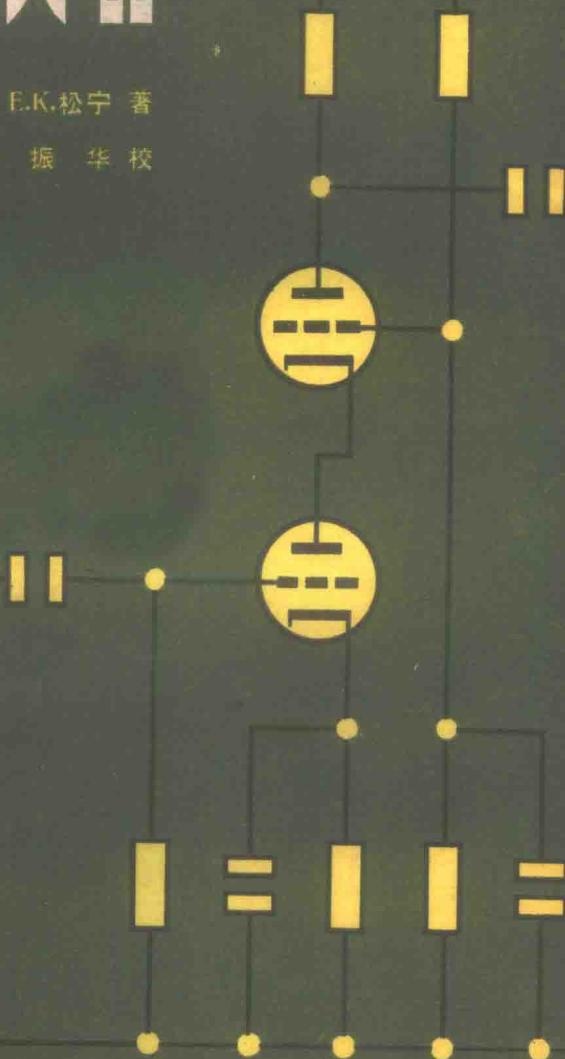


串联放大器

苏联A.П.洛日尼柯夫 E.K.松宁 著

王岳安译 计振华校



人 民 邮 电 出 版 社

串 接 放 大 器

苏联 A.П. 洛日尼柯夫 E.K. 松 宁 著

王 岳 安 译 計 振 华 校

人 民 邮 电 出 版 社

А. П. ЛОЖНИКОВ Е. К. СОНИН
КАСКОДНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ, 1961

内 容 提 要

本书讲述串接放大器的基本原理和特性,并且和普通三极管放大器、五极管放大器作了比较,从而可以看到串接放大器具有增益高、稳定性好和固有噪声低等优点。书中扼要介绍串接放大器在各个频段中的广泛应用,举了一些实际电路的例子。

本书可供无线电技术人员和有一定基础的无线电爱好者阅读。

串 接 放 大 器

著 者: 苏联 А. П. 洛日尼柯夫 Е. К. 松宁
译 者: 王 岳 安
校 者: 计 振 华
出版者: 人 民 邮 电 出 版 社

北京东四6条13号

(北京市书刊出版业营业许可证出字第〇四八号)

印刷者: 南 京 东 海 印 刷 厂
发行者: 新 华 书 店

开本 787×1092 1/32

1964 年 9 月南京第一版

印张 2 20/32 页数 42

1964 年 9 月南京第一次印刷

印刷字数 59,000 字

印数 1—15,150 册

统一书号: 15045·总1415—无399

定价: (科4) 0.30 元

序 言

近年来，在无线电技术书刊中，越来越常看到“串接放大器”这一术语。串接放大器和由电子管以及一些无源电路元件组成的普通放大级不同，它是把两个电子管直接串接起来，使得流过这两个电子管的板流的交流分量相同。在这一电路中，一个用作放大器的电子管同时又是另外一个电子管的动态负载阻抗，这就使放大器取得了很多崭新的性质：高的输入阻抗，在固有噪声很低的情况下具有很高的稳定增益，等等。

串接放大器有很多不同类型，最常用的是由两个三极管组成的串接放大器，其中一个三极管按阴极接地电路工作，而另一个按栅极接地电路工作。我们把这种电路看作是基本电路，它具有接近于五极管电路的高增益，同时还具有象普通三极管放大器那样低的固有噪声电平。第二个三极管的栅极接地使放大器输出端和输入端的耦合很小，这就决定了增益的高度稳定性。这些放大器广泛用于高频、中频和低频放大器的输入级以及其他许多电路里。

在串接放大器里，很容易引入随频率而变化的反馈，这样就可以制造用于低频的串接选频放大器。在电子稳压器里，应用了有高增益的串接窄带控制放大器。

和普通阴极输出器相比，按串接电路做成的阴极输出器有很多突出的优点，除了在大的动态范围内有高的输入阻抗和接近于1的传输系数以外，串接阴极输出器还具有阴极输出器所没有的崭新性质——无论是正阶跃电压还是负阶跃电压，都能

同样良好地传输，因此它们在脉冲设备中得到了广泛应用。

在这本小册子中，研究了各种串接放大器的性能和特点，并叙述了它们的计算方法和一些实际电路。编写本书时，广泛利用了国内外发表的文献资料。

作者

目 录

序言

第一章 串接放大器的分析和计算	1
1. 串接放大器的基本电路	1
2. 串接放大器等效参量的确定	1
3. 串接放大器的增益	6
4. 串接放大器的稳定性	7
5. 串接放大器电子管的选择	23
6. 串接放大器计算举例	26
7. 根据特性曲线计算串接放大器	31
8. 串接放大器的噪声特性	42
第二章 串接放大器的应用	48
9. 电视接收机的高频放大器	48
10. 电子管在直流方面并联的高频宽带放大器	49
11. 作为天线附加器的放大器	50
12. 低频串接放大器的基本特性	51
13. 微音器放大器	53
14. 高增益直流放大器	54
15. 电子电压积分器	60
16. 自平衡串接倒相器	63
17. 选频串接放大器	64
18. 串接放大器的变形电路	66
19. 串接阴极输出器	70
20. 脉冲阴极输出器	73
21. 具有输入电容补偿的阴极输出器	74
22. 电压传输系数等于1的阴极输出器	77

第一章 串接放大器的分析和計算

1. 串接放大器的基本电路

图 1 所示的串接放大器电路的最根本特征是，用作阴极接地式放大器的第一个三极管 J_1 的板极和第二个三极管 J_2 的阴极直接连接， J_2 管的栅极经电容器 C_1 旁通接地。输入信号电压 U_{c1} 加在 J_1 管的栅极上。 J_2 管从阴极看进去的输入阻抗作为 J_1 管的板极负载。放大的信号电压从 J_2 管的板极电路负载电阻 R_n 上取得。和普通放大器一样，板极负载可以是电阻，也可以是谐振回路或变压器。

J_2 管所需的栅偏压由分压器 R_1 和 R_2 供给。由于 J_2 管的栅极电位恒定，限制了它的阴极电位的改变。因此， J_1 管工作时板极电位几乎不变。

这种情况使串接放大器的三极管获得了高的增益，数值上和五极管放大器的增益接近。

应用两个三极管可以避免五极管放大器固有噪声电平高这一根本缺点。

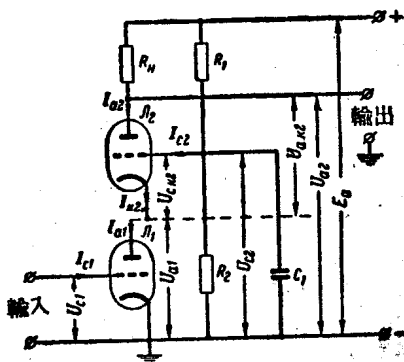


图 1 串接放大器的基本电路

2. 串接放大器等效参量的确定

为了确定串接放大器的等效参量，我們利用三极管在綫性

状态下的板流交流分量的方程式：

$$I_{a\sim} = S U_{c.k\sim} + \frac{1}{R_i} U_{a.k\sim}, \quad (1)$$

式中： $I_{a\sim}$ ——板流的交流分量；

$U_{c.k\sim}$ ——三极管的栅阴极间电压的交流分量；

$U_{a.k\sim}$ ——三极管的板阴极间电压的交流分量；

S ——三极管的跨导；

R_i ——三极管的内阻。

根据这一方程式，串接放大器里 $\mathcal{N}_1$ 管板流的交流分量由下式确定：

$$I_{a1\sim} = S_1 U_{c1\sim} + \frac{1}{R_{i1}} U_{a1\sim}, \quad (2)$$

而 $\mathcal{N}_2$ 管的板流交流分量

$$I_{a2\sim} = S_2 (-U_{a1\sim}) - \frac{1}{R_{i2}} (I_{a2\sim} R_H + U_{a1\sim}). \quad (3)$$

方程式 (3) 的第一项中的负号表示信号加在 $\mathcal{N}_2$ 管的阴极上，而第二项中的负号是由于 $\mathcal{N}_2$ 管的电压 $U_{a.k2\sim}$ 可以写成

$$U_{a.k2\sim} = E_a - I_{a2\sim} R_H - U_{a1\sim}.$$

板极电源电压 E_a 没有交流分量，因此不会影响三极管板流的交流分量，这项就可以不计。于是代到方程式 (3) 第二项中的 $U_{a.k2\sim}$ 可以写成：

$$U_{a.k2\sim} = -(I_{a2\sim} R_H + U_{a1\sim}).$$

由方程式 (2) 可以求出 $U_{a1\sim}$ 。在以后的计算中，假设在输入电压有各种变化的情况下，两个电子管都不出现栅流。因此 $I_{a1\sim} = I_{a2\sim} = I_{a\sim}$ ，这样就可以写出：

$$U_{a1\sim} = I_{a\sim} R_{i1} - S_1 U_{c1\sim} R_{i1}.$$

此式代入方程式 (3)，于是

$$I_{n\sim} = S_2(R_{i1}S_1U_{c1} - I_{a\sim}R_{i1}) - \frac{1}{R_{i2}}(I_{a\sim}R_{ii} + I_{a\sim}R_{i1} - R_{i1}S_1U_{c1\sim}).$$

由此，可以得到由 $\mathcal{N}_1$ 管和 $\mathcal{N}_2$ 管組成的串接放大器的板极电流的交流分量：

$$I_{a\sim} = \frac{R_{i1}S_1(R_{i2}S_2+1)U_{c1\sim}}{R_{ii} + R_{i1}(R_{i2}S_2+1) + R_{i2}}.$$

利用三极管参量之間熟知的关系 $\mu = SR_{i2}$ ，改变此式，則，

$$I_{a\sim} = \frac{\mu_1(\mu_2+1)U_{c1\sim}}{R_{ii} + R_{i1}(\mu_2+1) + R_{i2}}. \quad (4)$$

所得表示式在結構上和普通三极管放大器的板流交流分量与輸入信号电压的关系式相似，普通三极管放大器的原理图和等效电路示于图 2，对于这种电路

$$I_{a\sim} = \frac{\mu U_{c\sim}}{R_{ii} + R_i}$$

把此式和所研究的方程式 (4) 进行比较，可以得出一个

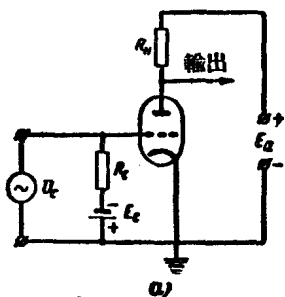


图 2 电阻负载的三极管放大器电路

α——原理图；
б——等效电路。

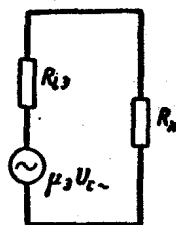
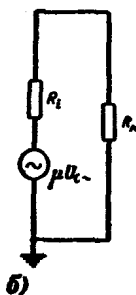


图 3 串接放大器的等效电路

結論：如果在普通三极管放大器的等效电路中，用串接放大器的等效静态参量代换三极管的静态参量，那么，这个等效电路对于串接放大器也是正确的。在图 3 所示的电路里，串接放大器的等效放大系数等于：

$$\mu_0 = \mu_1(\mu_2 + 1), \quad (5)$$

而它的等效内阻为：

$$R_{i_0} = R_{i_1}(\mu_2 + 1) + R_{i_2}. \quad (6)$$

根据静态参量之间的关系式，可以求得串接放大器的等效跨导：

$$S_0 = \frac{\mu_0}{R_{i_0}} = \frac{\mu_1(\mu_2 + 1)}{R_{i_1}(\mu_2 + 1) + R_{i_2}}.$$

分子、分母同除以 R_{i_1} ，则等效跨导的表示式变成如下形式：

$$S_0 = S_1 \frac{\mu_2 + 1}{\mu_2 + 1 + \frac{R_{i_2}}{R_{i_1}}}. \quad (7)$$

通常在串接放大器里所采用的电子管，或者是双三极管，或者是两个具有相同参量的三极管。在这种情况下，串接放大器的等效参量公式 (5)、(6)、(7) 分别为：

$$\mu_0 = \mu(\mu + 1),$$

$$R_{i_0} = R_i(\mu + 2),$$

$$S_0 = S \frac{\mu + 1}{\mu + 2}.$$

或者，近似地

$$\mu_0 \approx \mu^2,$$

$$R_{i_0} \approx R_i \mu,$$

$$S_0 \approx S.$$

后一组表示式最明显地指出了串接放大器的等效静态参量和单是一个三极管时的静态参量的区别。

在所得到的串接放大器等效静态参量表示式的基础上，可以对三极管串接放大器和五极管放大器进行定量的比较。串接放大器的等效静态放大系数和所用的两个三极管的静态放大系数的乘积近似相等。在两个三极管相同的情况下，它等于一个三极管静态放大系数的平方。放大三极管的 μ 值通常在 20 到 100 之间。因此， μ_0 的可能值在 400 到 10000 的范围内。而五极管的静态放大系数的数值也大约在这个范围内。

串接放大器的等效内阻约为第一个三极管内阻的 μ_2 倍。因为大多数放大三极管的内阻在 4 到 120 千欧的范围内，所以串接放大器就可以有 80 千欧到 12 兆欧的等效内阻；而五极管的内阻 R_i 为 10 千欧到 2.5 兆欧。由此可见，就这一参量来说，串接放大器也和五极管放大器相当，而且串接放大器的 R_i 的上限甚至比五极管还要高。后一情况使得串接放大器可能用在窄带系统里以得到很高的增益。

串接放大器的等效跨导约等于第一个电子管的跨导。由方程 (7) 可以看出，即使在串接放大器里采用内阻相差好几倍的两个不同的三极管，当 μ_2 值足够大的时候，它的等效跨导不会和 S_1 相差很大。近代放大三极管的跨导是各不相同的，某些类型的三极管可达到 45 毫安/伏。五极管的跨导达 30 毫安/伏。应该指出，在串接放大器中，常将五极管接成三极管用，这时的跨导比五极管接法时的跨导高出 20—30%。当五极管接成三极管的时候，跨导的增大是由于这时电子管的帘栅电流也流经板极电路的负载。因此，当串接放大器采用两个五极管接成三极管使用的时候，等效跨导可以比五极管高出 20—30%。

由所作的分析可见，串接放大器的静态参量或者和五极管的静态参量一样，或者超过五极管。在这种情况下，串接放大

器較之五极管有噪声很小这样一个重要的优点。下面将会証明，串接放大器的固有噪声，大約与一个三极管的固有噪声相等，而三极管的固有噪声，則只有同样跨导的五极管的三分之一到五分之一。

3. 串接放大器的增益

串接放大器的增益定义为： $\mathcal{N}_2$ 管板极負載 R_n 上电压的交流分量与加到 $\mathcal{N}_1$ 管栅极上輸入信号的交流分量 $U_{c1\sim}$ 之比：

$$k = \frac{U_{a2\sim}}{U_{c1\sim}}$$

用串接放大器板流交流分量的表示式 [方程 (4)] 代換 $U_{a2\sim}$ ，我們得到由两个三极管参量和等效参量表示的增益公式：

$$U_{a2\sim} = I_{a\sim} R_n$$

$$k = \frac{\mu_1(\mu_2 + 1)R_n}{R_n + R_{i1}(\mu_2 + 1) + R_{i2}} \quad (8)$$

$$k = \frac{\mu_2 R_n}{R_n + R_{i2}} \quad (9)$$

方程式 (9) 右端的分子、分母各除以 R_n ，則得到如下的增益表示式：

$$k = \frac{\mu_2}{1 + \frac{R_{i2}}{R_n}} \quad (10)$$

由此式可見，当滿足条件 $R_n \gg R_{i2}$ 时，串接放大器电路的增益便接近串接放大器的等效静态放大系数。在实际情况里，达到这一最大增益是很困难的。在窄带諧振放大器里，諧振回路电阻 R_n 的数值将受到回路可能达到的品质因数的限制。

在低頻放大器里，增大負載电阻，通常就将增大所需的板

极电源电压 E_a 。只有这样才能使所选择的工作点的位置不变，也就是使放大器的所有静态参量不变。但是这种情况对五极管放大器也同样是正确的。

由上述可以看出，在窄带系统里，串接放大器可以实际得到很大的放大。

在宽带串接放大器里，通常满足条件 $R_H \ll R_{i_0}$ 。对于这种情况，较方便的是采用把式 (9) 的右端分子、分母各除以 R_{i_0} 后所得到的增益公式：

$$k = \frac{S_0 R_H}{1 + \frac{R_H}{R_{i_0}}} \quad (11)$$

由于 R_H 远比 R_{i_0} 小，式 (11) 的 R_H/R_{i_0} 项可以忽略，这时增益就等于：

$$k \approx S_0 R_H \quad (12)$$

大家已经从五极管放大器的理论中熟知这一表示式，因为五极管放大器通常满足条件 $R_H \ll R_{i_0}$ 。由式 (7) 可知，串接放大器的跨导主要取决于第一个三极管。这就是说，为了在宽带串接放大器里得到最大的增益，应该选用跨导尽可能大的三极管作为 J_1 管。顺便指出，三极管的跨导越大，它的固有噪声就越小；在宽带放大器里，固有噪声往往是决定性的数值。

4. 串接放大器的稳定性

任何放大器，特别是作高频放大用的放大器，最重要的特性之一是它的稳定性。作为一个例子，让我们研究一下输入端和输出端都有谐振回路的谐振放大器。

在分析稳定性问题的时候，应该注意到输出端可能经过电子管的极间过渡电容和输入端发生耦合。当然还存在着很多其

他的寄生耦合，但在合理布線和安裝的情況下，它們都是可以消除的。

我們分別研究一下柵極接地式放大器和陰極接地式放大器的穩定性，討論中考慮了這兩種放大器在串接電路中的相互影響。

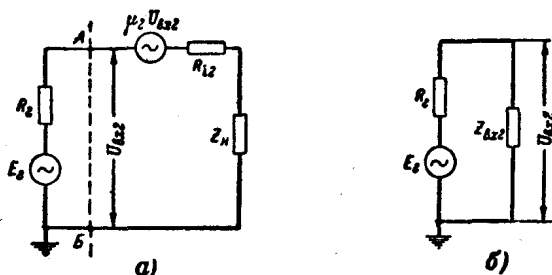


图 4 柵極接地式放大器的等效电路

a—总的等效电路，

b—沒有輸入电路的等效电路。

必須先談一下柵極接地式放大器的某些特点。图 4, a 是它的等效电路。等效电动势为 E_s 、等效內阻为 R_s 的信号源和放大电子管的阴极 (A 点) 連接。三极管用等效电动势 $\mu_2 U_{gk,2}$ 和內阻 R_{i2} 代替，而且前者和电压 $U_{gk,2}$ 的作用是同相的。图 4, b 是三极管輸入电路的等效电路，图中的 $Z_{gk,2}$ 是图 4, a 等效电路 AB 点右面的总輸入阻抗。显然，加到三极管阴极上的电压 $U_{gk,2}$ 与阻抗 R_s 和 $Z_{gk,2}$ 的比值有关。由等效电路可以看出，

$$\bar{U}_{gk,2} = \bar{I}_{a\sim} Z_{gk,2}. \quad (13)$$

另一方面，由图 4, a 可見，

$$\bar{I}_{a\sim} = \frac{\bar{U}_{gk,2} + \mu_2 \bar{U}_{gk,2}}{R_{i2} + Z_H}. \quad (14)$$

此式代入公式(13)，得到：

$$\bar{U}_{\text{BX.2}} = \frac{\bar{U}_{\text{BX.2}} + \mu_2 \bar{U}_{\text{BX.2}}}{R_{i2} + Z_{\text{H}}} Z_{\text{BX.2}}.$$

由此，

$$Z_{\text{BX.2}} = \frac{Z_{\text{H}} + R_{i2}}{1 + \mu_2}. \quad (15)$$

由最后一式可見，柵极接地式放大器的輸入阻抗和負載阻抗有关，也就是这种放大器有內部負反饋。

在公式 (15) 里，輸出回路的阻抗 Z_{H} 对回路的失諧量有如下关系：

$$Z_{\text{H}} = \frac{\rho_2}{d_{\text{e2}} + jy},$$

式中：

$\rho_2 = \frac{1}{\omega C_2}$ —— 回路的波阻抗；

C_2 —— 回路的总电容；

y —— 回路的相对失諧量。

$$y = \frac{f - f_0}{f_0},$$

式中：

f —— 信号频率；

f_0 —— 回路的諧振頻率。

在 Z_{H} 的公式里，分子、分母可以同乘以分母的共軛复数 $d_{\text{e2}} - jy$ ，于是分别得到电阻 R_{H} 和电抗 jX_{H} 的表示式：

$$Z_{\text{H}} = \frac{\rho_2 (d_{\text{e2}} - jy)}{d_{\text{e2}}^2 + y^2},$$

$$R_{\text{H}} = \frac{\rho_2 d_{\text{e2}}}{d_{\text{e2}}^2 + y^2}$$

和

$$jX_{\text{H}} = -j \frac{\rho_2 y}{d_{\text{g2}}^2 + y^2}.$$

这些阻抗和回路失谐量的关系曲线如图 5, a 所示。

当发生谐振($y=0$)的时候, 回路阻抗 Z_{H} 为 $R_{\text{e.H}} = \frac{\rho_2}{d_{\text{g2}}}$ 。

栅极接地式放大器的输入阻抗 $Z_{\text{BX.2}}$, 同样由实数分量和虚数分量组成, 把公式 (15) 表示成下式, 就可以求得这两个分量:

$$Z_{\text{BX.2}} = \frac{1}{S_2} + \frac{R_{\text{H}}}{1 + \mu_2} + j \frac{X_{\text{H}}}{1 + \mu_2}$$

输入阻抗的这两个分量示于图 5, b。这时

$$R_{\text{BX.2}} = \frac{1}{S_2} + \frac{R_{\text{H}}}{1 + \mu_2},$$

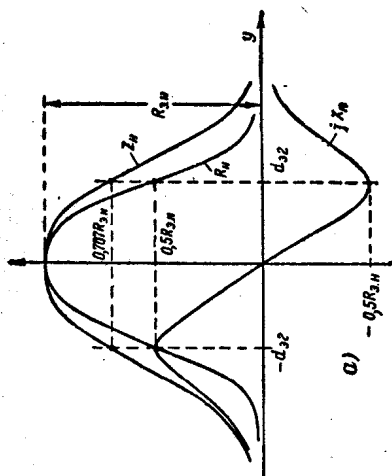
$$jX_{\text{BX.2}} = j \frac{X_{\text{H}}}{1 + \mu_2}.$$

此外, 可将实数分量写成:

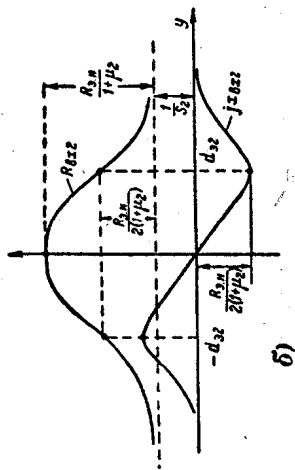
$$R_{\text{BX.2}} = \frac{1 + \frac{R_{\text{H}}}{R_{i2}}}{S_2}$$

当 $R_{\text{e.H}} \ll R_{i2}$ 的时候, 我们得到 $R_{\text{BX.2}} \approx \frac{1}{S_2}$, 但是通常 $R_{\text{e.H}}$ 在数量上可以和 R_{i2} 相比拟。所以应由图 5, b 来表明栅极接地式放大器输入阻抗的完整概念。

由于输入阻抗低, 所以放大器的功率增益很小。在希望固有噪声低的情况下, 栅极接地式放大器的应用受到了限制, 因为当功率增益小的时候, 后面几级的噪声便强烈地表现出来 (见 § 8)。输入阻抗低也限制了栅极接地式放大器应用在输入端必须有较窄通带谐振回路的场合。但是由于栅极接地式放大器的

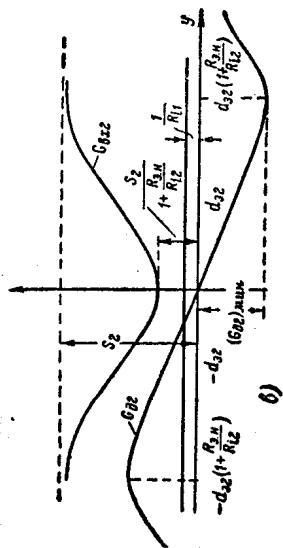


a—输出电路的电阻和电抗与失谐量的关系;



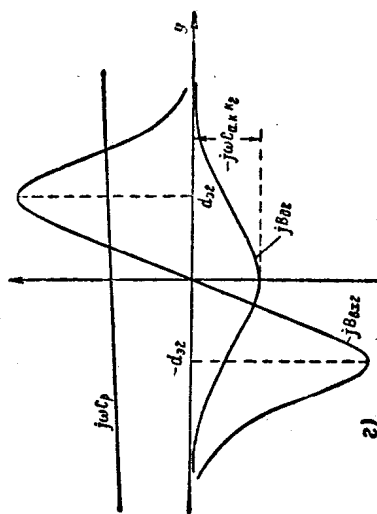
b)

6—不考虑电容 $C_{a, \pi}$ 反馈的影响, $J_{1,2}$ 管的输入电阻和输入电抗与失谐量的关系;



c)

6—考虑到电容 $C_{a, \pi}$ 反馈的影响, $J_{1,2}$ 管输入电路的电导与失谐量的关系;



2)

2—考虑到电容 $C_{a, c}$ 反馈的影响, $J_{1,2}$ 管输入电路的电纳与失谐量的关系;

图 5 串接放大器的各个电路的阻抗和导纳与输出电路的失谐量的关系