

鐵 諧 振 穩 定 器

Д.И. 布 格 達 諾 夫 著
Г.К. 叶 夫 多 基 莫 夫



國防工業出版社

22

V

目 录

序	2
第一章 鉄諧振稳定器的材料	4
1 磁性材料	4
2 电容器	10
3 繞组的導綫和絕緣	12
4 变压器和电抗器計算的若干問題	13
第二章 鉄諧振稳定器的基本綫路和結構	16
5 作为稳定器工作的四端网络的参数	16
6 稳定器的运行特性	20
7 电流鉄諧振稳定器	21
8 电压鉄諧振稳压器	27
9 工业用稳定器的类型	29
第三章 稳定器的計算	32
10 經驗公式	32
11 等效正弦法	33
12 向量图解法	35
13 解析法	53
第四章 稳定器的特殊类型	67
14 具有正弦输出电压的鉄諧振稳定器	67
15 具有頻率补偿的鉄諧振稳压器	69
16 整流器中鉄諧振稳定器的工作情况	73

序

在生产过程自动化中，对电气仪表和仪器的供电，在很多情况下要求有恒定的电压或电流，它们不随工作条件的改变而变化。能满足上述要求的机构称为稳定器。稳定器是接于电网和负荷之间的四端网络（图1）。

这里所研究的铁谐振稳定器是一种改变参数形式的，它没有带负反馈的自动调节器的那种作用，但它的结构往往比后者简单得多。

在铁谐振稳定器中通常补偿了两个变化参数中最大的一个。

根据补偿的种类可将稳定器分为下列几种类型：

- A. $U_0 = \text{常数}$ ； $Z = \text{变数}$ 。要求 $U_{cm} = \text{常数}$ 。
- B. $U_0 = \text{变数}$ ； $Z = \text{常数}$ 。要求 $U_{cm} = \text{常数}$ 。
- B. $U_0 = \text{变数}$ ； $Z = \text{变数}$ 。要求 $I_{cm} = \text{常数}$ 。
- Γ. $U_0 = \text{变数}$ ； $Z = \text{变数}$ 。要求 $U_{cm} = \text{常数}$ 。

B类稳定器现已得到广泛的应用，下面将着重研究它。应当指出，这种类型的稳定器对于负荷是很不灵敏的，即与Γ类相近。

铁谐振稳定器除单独使用之外，还可装入自动调节机构和其他自动化机构中成为组成的一部分。

铁谐振稳定器有下列运行特性：

1. 结构简单，机械和电气强度好，工作可靠，惯性小（过渡过程的持续时间——二到三个周期），使用年限长。

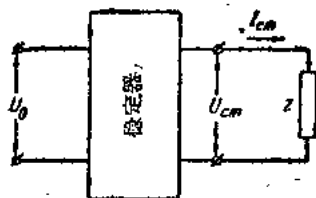


图1 电网中稳定器的联接。

2. 材料的耗費量較大。
3. 穩定度較小。
4. 輸出電壓顯著地與負荷的大小和特性有關（內電阻大）。
5. 供電電網頻率對輸出電壓的影響很大。
6. 周圍溫度對輸出電壓有影響。
7. 輸出電壓波形畸變。

在設計和選擇穩定器類型時應考慮上述特點。

B類穩定器能夠補償電網電壓在其額定值 $\pm 20\%$ 範圍內的變化。在頻率穩定並且負荷功率由幾瓦到幾百瓦的情況下，電壓能保持具有 $\pm 0.2\%$ 的精確度。當頻率有微小的變化並且負荷由零變到額定時，如功率在 10 仟瓦以下，輸出電壓能保持具有 $\pm 5\%$ 的精確度。當電網頻率在 $\pm 3\%$ 的範圍內變化並且負荷恆定時，可製造小功率的（幾十瓦）穩壓器，它可用之做為具有 $\pm 1\%$ 精度的標準電壓或者比較電壓的電源。

鐵諧振穩定器對於不定期檢查和在惡劣的氣候下工作的裝置是非常適合的。

第一章 鉄諧振穩定器的材料

电工鋼和磁性合金，工作在交变电压下的电容器、繞組用鋼綫和絕緣材料都是鉄諧振穩定器的材料。

1 磁性材料

導磁率高，磁滯和渦流損耗小，飽和磁感應數值大和具有顯著飽和現象的材料是穩定器最理想的磁性材料。每種磁性材料不可能滿足上述所有的要求，因此，材料的選擇應以穩定器的已知條件而定。

各種电工鋼的品質均按蘇聯國家標準ГОСТ 802-54的規定。應當注意，國家標準保證了材料質量的最低要求。實際材料還可能有較高的質量。此外，由於磁性材料生產工藝的不斷改進，出現了一些新的具有良好磁化特性的材料。

在表1中給出了按ГОСТ 802-54所規定的电工鋼的種類及其基本特性。實際上表中所包括的各種电工鋼均可為穩定器所採用。熱軋鋼特別是變壓器鋼Э41是應用較廣而且比較便宜的鋼。在穩定器中廣泛地採用了這種电工鋼，它可做成條形的和各種沖片的形狀。在高頻（400 赫芝以下）工作下的穩定器可採用鋼Э340和Э44。

特別應當指出，具有方向性的冷軋硅鋼片Э310，Э320和Э330具有大的飽和磁感應，大的導磁率和小損耗。不過這些優點僅在磁通方向順着軋制方向時才存在，如果磁通方向垂直于軋制方向則磁化特性顯著惡化，甚至比熱軋鋼還差。在設計穩定器的磁路系統時必須考慮到這一點；盡量減少橫向磁通的長度。用冷

表 1 根据ГОСТ 802-54电工钢的特性

[illegible]

軋鋼做成的螺旋型環狀鐵芯效果尤佳。

上述所列举的各种电工鋼在工业上軋制成片狀，其尺寸根据ГОСТ 802-54之規定。冷軋鋼同样也可制成具有各种寬度和厚度的帶形鋼片。

除电工鋼外，根据各生产单位的技术条件还制造了大量的軟磁材料。鉄鎳合金組中的坡莫合金就是其中的一种。合金經過适当的机械加工和热处理之后，在飽和时磁化曲綫急剧地弯曲，根据这种特性我們称之为具有矩形磁滯迴綫的合金。

磁滯迴綫的形狀以矩形系数表示，它是剩磁感應和飽和磁感應的比值 (B_r/B_s) 或与任一磁場强度下 (通常是 10 奧斯特) 磁感應的比值 B_r/B_{10} 。例如合金 П50П, П65П 和坡明伐合金 (Пермивар) 矩形系数可达 0.9 甚至更高。

鉄鎳合金的缺点是价格高昂，飽和磁感應小 (与冷軋鋼相比較)，磁化特性受机械作用的影响 (振动，冲击和其他因素) 大，退火工艺也較复杂。

在表 2 中介绍了几种磁性合金及其基本特性。

表 2 几种磁性合金的特性

材 料	矯 磁 力 安/厘米	飽和磁感應 高斯	矩形系数 欧毫米 ² /米	比 重 克/厘米 ³
坡莫合金 П50П	0.25~0.4	15000	0.45	8.2
坡莫合金 П65П	0.12~0.16	13000	0.25	8.35
坡明伐合金 П	0.06	15600	0.20	8.3
含鋁的坡明伐合金 П	0.08	15200	0.52	8.45
冷軋硅鋼片	0.08~0.32	19700	0.5	7.65

图 2 所示为几种鋼和合金在直流时的基本磁化曲綫。

众所周知，对于每一給定的电网頻率，磁性材料有一最合理

的厚度，它可由下列經驗公式求得：

$$\delta = \frac{2 \sim 3}{\sqrt{f}} [\text{毫米}],$$

其中 f —— 电网频率，赫芝。

对于有較大电阻系数的磁性材料系数取 3，較小电阻系数的材料取 2（例如 1165Π）。

如果在频率不变的条件下已知磁感应为 B_1 和 B_2 时的损耗，则磁感应为 B_x 时的损耗将等于：

$$P_x = P_1 \left(\frac{B_x}{B_1} \right)^{1.5 \frac{P_2}{P_1} / \lg \frac{B_2}{B_1}}, \quad (1)$$

其中 P_1 和 P_2 —— 相应于磁感应为 B_1 和 B_2 时的损耗。

如果磁感应不变，仅改变频率时，则

$$P_{f2} = P_{f1} \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^{1.3}$$

其中 P_{f1} 和 P_{f2} —— 相应于频率为 f_1 和 f_2 时的损耗。

稳定器的磁路是由片状和带状的磁性材料所构成。

大功率稳定器的磁路，采用条形材料，为了制造一台稳定器而制作一套冲模是不可能也是不合算的。

在很多情况下，可利用小功率变压器的冲片。这些冲片经过简单的加工即可应用，有时也可直接应用。具有可动铁轭以调节空气隙的 U 型和 H 型冲片对稳定器是再适合不过了。

为了饱和铁芯易于磁化采用了铁轭不分开带切口的 H 型冲片（图 3）。

各个生产企业制造的冲片尺寸往往是各种各样的。应当指出，因为磁化系统是在较饱和的范围内工作，所以要求磁路的窗口有足够大的尺寸。因此不是所有现成的冲模都能用来作稳定器的。

在叠制铁心时，特别是高频稳定器，应注意到冲片间的

絕緣。

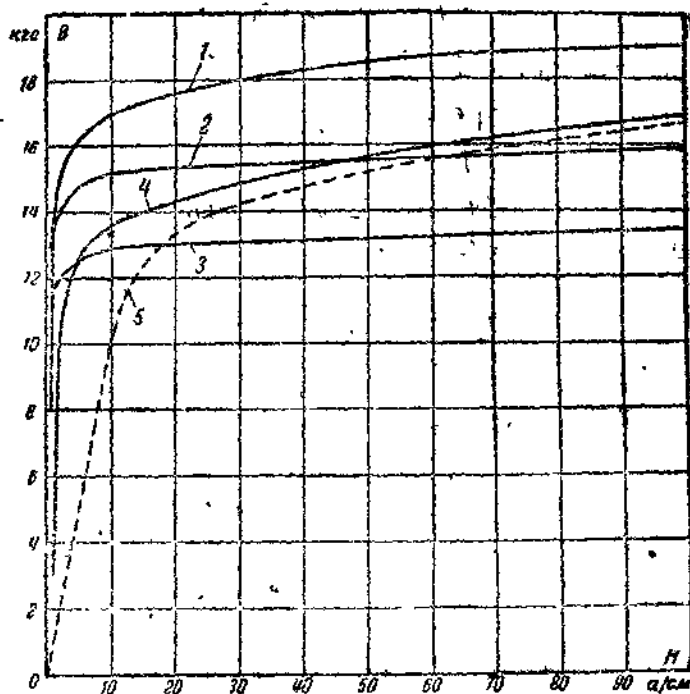


图 2 直流基本磁化曲线。

1— $\Phi 320$, $\delta = 0.35$ 毫米, 环型; 2—H50II, $\delta = 0.08$ 毫米, 环型; 3—H65II, $\delta = 0.02$ 毫米, 环型; 4— $\Phi 41$, $\delta = 0.35$ 毫米, 环型; 5— $\Phi 41$, $\delta = 0.35$ 毫米, III型冲片。

近几年来趋向于制造螺旋型的环状連續鉄芯。这种鉄芯由带形磁性材料所制成并在热处理之后再繞上繞組。合理鉄芯形状的优良磁化性能抵偿了制造繞組的工艺困难。各种順向和橫向压延的材料, 例如冷軋鋼 $\Phi 310$, $\Phi 320$ 和 $\Phi 330$ 以及某些磁性合金, 仅

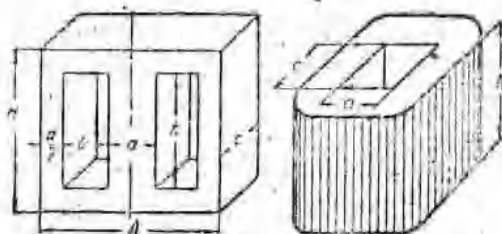


图3 U型冲片的磁路和带绕组的线图。

在铁芯为螺旋型时才有较好的磁化性能。当稳定器必须有高稳定性能，减低损耗和频率影响时才采用螺旋型环状铁芯（图4）。

冷轧钢的环型铁芯可由带形或若干小条焊接起来用手工方法制成。同时可将两三条重叠起来顺着卷绕，为了使叶片牢固，卷绕必须在有键边的圆柱形心轴上进行。

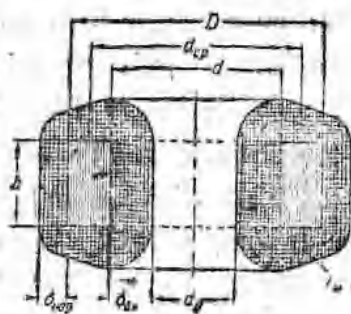


图4 带绕组的环形磁路。

在材料的机械加工过程中（剪切，冲压等等），会使磁化性能恶化，因此在铁芯卷绕之

后必须退火。对于厚度为0.5~0.35毫米的材料，在退火时放到温度为850~900℃的炉内，加热20~25分钟，然后在空气中自然冷却便会得到满意的结果。在50赫芝频率下氧化薄膜已能很好的绝缘。

对于制造在高频下工作的，材料很薄的环状铁芯，以及断面是螺旋型的铁芯，其绝缘薄膜和铁芯的卷绕，退火以及剪切和研磨都需要很复杂的加工设备，这些磁路的退火在真空中，氮气中，

磁場中以及其他不影响材料性能的条件中进行。

由坡莫合金制造的环状鉄芯应尽量减少机械应力的影响，因此将其放入坚固的外壳中。如果外壳是由耐热材料(瓷器和陶器)做成的，鉄芯与外壳一块退火。

在环型鉄芯上繞綫是在特殊的繞綫机上进行的，用机械来卷繞环状鉄芯和繞綫仅在設備較好的工厂里才能做到。

2 电 容 器

鉄諧振穩定器中电容器工作在交变电压下，在选择电容器类型时首先必須注意到这一点。

对在 50 赫芝頻率下工作的鉄諧振穩定器專門制造了一种 CM-0.65-5 型油紙电容器，工作电压为 650 伏，电容为 5 微法。其尺寸为 $92.5 \times 77.5 \times 120$ 毫米，重量为 1.35 公斤。这样一个电容器足够 200~250 瓦功率的穩定器用。对較大功率的穩定器可以用几个这种电容器并联，和用为 50 赫芝頻率設計的 KM 型电容器。对小功率和中等功率的穩定器，采用适于交流下工作的 MBГЧ 型紙质电容器。这些电容器的参数如表 3 所示。它們的額定电压是对頻率为 50 赫芝而言的，当頻率增高时也能工作(400 赫芝以下)，但工作电压按下列規定下降：

頻率为 50 赫芝， $U_c = 100\%$ ；

頻率为 100 赫芝， $U_c = 80\%$ ；

頻率为 200 赫芝， $U_c = 65\%$ ；

頻率为 400 赫芝， $\bar{U}_c = 50\%$ 。

人們为无綫电技术裝置制造了多种类型的电容器。所有这些电容器都适于直流电压下工作。为了保証持久的工作，在 50 赫芝頻率的交变电压下工作时，外加电压应减少 2~2.5 倍。例如工

作电压为 1000 伏的 КБГ-МН 型电容器，在 50 赫芝情况仅能在 400~500 伏的范围内工作。

应当指出，纸和油纸电容器受温度的影响很大，从而引起稳定器的附加误差。云母电容器在工作温度范围内本身的电容实际是不变的，除此而外还能用于高频（可达 100 仟赫芝）。但是由于它的电容很小，仅用在小功率的稳定器里。如果要选择电容器的最小体积或重量，应给出它的功率系数。

$$p_k = \frac{U_c^2 \omega C}{V_k} [\text{瓦/厘米}^3],$$

表 3 МЕТУ型电容器

电 容 微 法	在 50 赫芝频率下的额定电压，伏									
	150		250		500		750		1000	
	外壳 序号	重量 (克)	外壳 序号	重量 (克)	外壳 序号	重量 (克)	外壳 序号	重量 (克)	外壳 序号	重量 (克)
0.25	—	—	—	—	3	50	2	115	3a	140
0.5	—	—	1	30	1a	85	3a	140	6	230
1	—	—	3	50	3a	140	6	230	5	500
2	1	30	1a	85	6	230	5	500	—	—
4	3	50	3a	140	4	400	—	—	—	—
10	2	115	7	280	—	—	—	—	—	—

外壳序号	尺 寸 ， 毫 米		
	A	B	C
1	31	16	25
1a	46	16	50
2	46	21	50
3	31	31	25
3a	46	31	50
4	69	34	50
5	69	39	115
6	46	56	50
7	46	66	50

或

$$p_k = \frac{U_c^2 \omega C}{G_k} \text{ [瓦/克]},$$

其中 U_c ——电容上的电压，伏；

$\omega = 2\pi f$ ——角频率，秒⁻¹；

C ——电容，法拉；

V_k ——电容器的体积，厘米³；

G_k ——电容器的重量，克。

3 绕组的导线和绝缘

铁谐振稳定器里应用了各种截面和牌号的受稳定器功率及工作条件影响的绕组铜线。对于矩形和圆形骨架上的线圈除了用棉纸绝缘的导线（ПБД）之外，还广泛应用了圆漆包线（ПЭЛ）以及耐高温导线（ПЭТ）和（ПЭВ）。环型绕组推荐采用带棉纱和丝网的漆包线（ПЭЛВО，ПЭЛШО，ПЭЛШКО 等等），这是为了防止卷绕时损坏铜线的绝缘。

铁谐振稳定器线圈内的电流密度，对小功率的稳定器（150瓦以下）常取 3 安/毫米²，而对功率较大的稳定器取 2.5~2 安/毫米²。我们必须考虑到饱和铁芯是工作在发热状态，并且它会使绕组受热。为了持久可靠地工作，稳定器的绕组应当浸渍绝缘漆。浸过的线圈可增加它的机械和电气强度，提高导热性和防潮性。

A 级绝缘（有机合成绝缘）的耐热性允许在 105°C 的温度下长期工作。绝缘是可以允许更高温度的，但这时它的寿命减低。例如，在 105°C 情况下工作期限为十年，那么在 105°C 以上每增加 8°C 寿命减半。

为了在高温情况下持久地工作，应采用耐高温等级的绝缘（玻璃漆布，石棉麻布，有机硅绝缘）。在必要的时候可用人工冷却（空气鼓风，把稳定器放到油箱里等等）。

4 变压器和电抗器計算的若干問題

在鉄諧振穩定器里，以飽和和綫性电抗器做为基本元件，在很多情況下它們有附加的繞組和出頭，可將其視為自耦变压器或变压器。下面我們將研究与其結構和电气参数有关的几个問題。

对具有山型磁路的变压器或电抗器，如果它們的尺寸如图 3 所示，基本参数則可以下式表明：

磁路平均磁力綫的长度

$$l_{cr} = 2(b + h) + 2a \text{ [厘米]。}$$

磁路截面的几何面积

$$Q_{cr} = ac \text{ [厘米}^2\text{]。}$$

窗口面积

$$Q_0 = bh \text{ [厘米}^2\text{]。}$$

变压器电磁功率的参数

$$Q_0 Q_{cr} = acbh \text{ [厘米}^3\text{]。}$$

磁路的体积

$$V_{cr} = (AH - 2bh) c \text{ [厘米}^3\text{]。}$$

鉄芯的重量

$$G_{cr} = V_{cr} \gamma_{cr} k_{cr} \text{ [克]，}$$

其中 k_{cr} ——有效截面和几何面积之比，即鉄芯截面的填充系数。它和材料的厚度及制造工艺有关

$$k_{cr} = 0.8 \sim 0.95。$$

綫圈的体积

$$V_{km} = [2(a + c)b + 3b^2]h \text{ [厘米}^3\text{]。}$$

銅重 $G_m = V_{km} \gamma_m k_m \text{ [克]，}$

其中 γ_m ——銅的比重，8.9克/厘米³；

k_m ——窗口銅綫的填充系数；电压小于 500 伏时 $k_m = 0.3 \sim 0.35$ 。

变压器的散热面

$$S_{\text{散热}} = 2[c(H+A) + a(A+h) + h(a+3b) + 2b(b+1.5b)] \text{ [厘米}^2\text{]}。$$

在磁路中下列关系可保证变压器或电抗器的重量为最小[文献 1]：

$$b = a; \quad h = 2.5a; \quad A = 4a; \quad H = 3.5a; \quad c = 1.5a。$$

这时可把上面所有的关系写成：

$$\left. \begin{aligned} l_{\text{cr}} &= 9a; \\ Q_{\text{cr}} &= 1.5a^3; \\ Q_o &= 2.5a^2; \\ Q_{\text{cr}}Q_o &= 3.75a^4; \\ V_{\text{cr}} &= 13.5a^3; \\ V_{\text{kam}} &= 20a^3; \\ S_{\text{oxA}} &= 65.5a^2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对具有环型铁心的电抗器(图 4)推荐下列尺寸

$$\left. \begin{aligned} D &= 1.5d; \\ h &= 0.5d; \\ l_{\text{cr}} &= 3.92d^{1.4}; \\ Q_{\text{cr}} &= 0.125d^2; \\ V_{\text{cr}} &= 0.49d^3. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

无气隙的变压器或饱和电抗器的电磁功率及其尺寸的关系为：

$$Q_{\text{cr}}Q_o = \frac{\sqrt{2} \cdot 10^5}{\omega B k_m k_m \Delta} \text{ [厘米}^4\text{]}, \quad (4)$$

其中 $P = \sum U_i I_i + \sum P$ ——变压器的电磁（计算）功率，等于全部绕组电压和电流乘积的总和加铜及铁内损耗的总和；

ω ——角频率，秒⁻¹；

B ——磁感应强度的振幅值，高斯；

Δ ——绕组内的电流密度，安/毫米²。

每匝电势

$$e = \frac{\omega}{\sqrt{2}} B Q_{cr} k_{cr} \cdot 10^{-8} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} B S \cdot 10^{-8} [\text{伏}],$$

其中 $S = Q_{cr} k_{cr}$ ——铁芯的有效截面。

绕组的匝数

$$w_i = \frac{U_i}{e},$$

其中 U_i ——绕组上的电压（有效值）。

具有空气隙的交流电抗器按下列公式计算：

$$Q_{cr} Q_o = \frac{\sqrt{2} I \cdot L \cdot 10^6}{B_{onm} k_{cr} \Delta} = \frac{\sqrt{2} P_A \cdot 10^6}{\omega B_{onm} k_{cr} \Delta} [\text{厘米}^4]; \quad (5)$$

$$l_s = \frac{2.5 f^2 I \cdot 10^8}{B_{onm}^2 Q_{cr}} = \frac{2.5 P_A \cdot 10^8}{\omega B_{onm}^2 Q_{cr}} [\text{厘米}]; \quad (6)$$

$$\omega = 9.10^3 \sqrt{\frac{I l_s}{Q_{cr}}}, \quad (7)$$

其中 I ——电流的有效值，安；

L ——电感，亨；

$P = I^2 \omega L$ ——电抗器的功率；

B_{onm} ——气隙中最佳磁感应的振幅值：若 $f = 50$ 赫芝，钢

Э41的 $B_{onm} = 10000 \sim 12000$ 高斯；钢Э310、Э320，

Э330的 $B_{onm} = 12000 \sim 14000$ 高斯；

l_s ——空气隙总长，厘米（外磁性衬垫物的厚度 $\delta_s = l_s/2$ ）。

繞組的電流密度在 $2.5 \sim 3.5$ 安/毫米² 的範圍內。

● 變壓器或電抗器的表面溫度

$$t_s = \frac{\Sigma P}{\alpha S_{\text{散熱}}} + t_0 [^{\circ}\text{C}], \quad (8)$$

其中 ΣP ——發熱損耗的總和；

α ——在空氣中表面散熱係數 ($\alpha = 1.3 \times 10^{-3}$ 瓦/厘米²·度)；

t_0 ——周圍空氣的溫度， $^{\circ}\text{C}$ 。

繞組內部的溫度通常比表面大 $7 \sim 15^{\circ}\text{C}$ 。

第二章 鉄諧振穩定器的 基本線路和結構

5 作為穩定器工作的四端網絡的參數

如上所述，穩定器是接在電源和負荷間的四端網絡。從線性無源四端網絡的理論可知：任一四端網絡能以三個元件組成的等值線路所代替。這種線路有二： Π 型和T型(圖5)。因為 Π 型線路里電導 Y_1 和輸入並聯，並且在電網功率足夠大時不影響輸出電壓和電流，所以 Y_1 可認為等於零，結果得到T型線路，其中負荷與電導 Y_2 並聯或是與它等效。

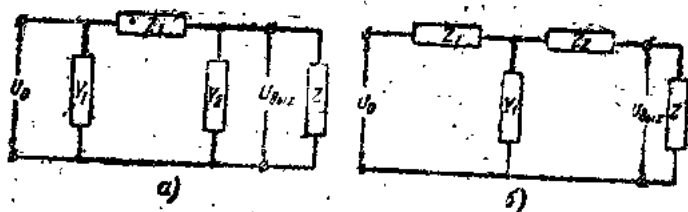


圖5 四端網絡的兩個等值線路：

a— Π 型線路；b—T型線路。