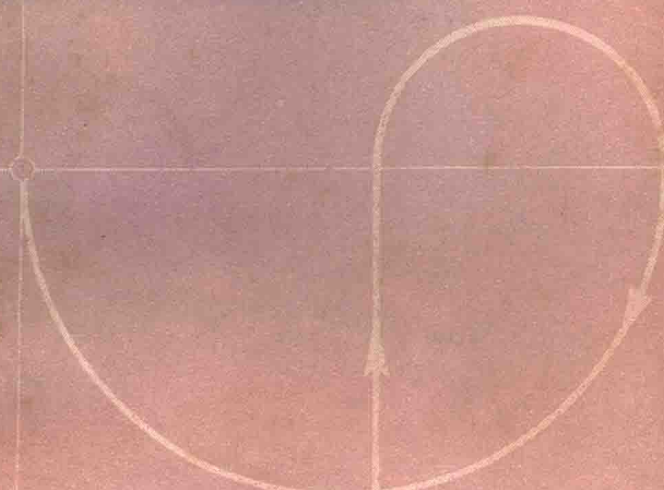


自动化丛书



提高穩定性的磁放大器

〔苏联〕H. M. 季申科著 李鼎年译

上海  技术出版社

提高稳定性的磁放大器

〔苏联〕H. M. 季申科 著

李鼎年 译 赵安泰 校



上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书是“自动化丛书”之一。丛书内容包括自动学及远动学的理論,自动装置、元件和仪器的結構及应用等。丛书选题主要取自苏联及其他国家的有关資料,也包括国内編写的专题論著。本丛书由“自动化丛书編輯委员会”主編。

本书阐述磁放大器工作不稳定的原因和提高其稳定性的方法。介紹确定磁放大器稳定性的工程計算法,以及稳定回路和稳定元件的計算法。并提供了計算与实验的对比数据,証明計算誤差在工程实用的容許范圍內。

本书可供自动化专业工程技术人員及大专学生参考。

МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ ПОВЫШЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

Н. М. Тищенко

Госэнергоиздат • 1963

自动化丛书(40)

提高稳定性的磁放大器

李鼎年 譯 赵安泰 校

自动化丛书編輯委员会主編

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可證出 093 号

上海市印刷六厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印張 4 6/32 排版字数 91,000

1964 年 11 月第 1 版 1964 年 11 月第 1 次印刷 印数 1—12,000

統一书号 15119·360 定价(科六) 0.50 元

前 言

磁放大器广泛应用在各种不同的技术领域内。在许多场合下,磁放大器往往是在温度、电源电压和频率及其他因素变化很大的条件下运行,致引起工作的不稳定。由于上述因素的变化范围往往很大,因此使磁放大器参数产生了显著误差,有时竟超出容许范围。上述情况往往使人们在设计磁放大器时更多地注意于提高其参数稳定性的问题。

磁放大器的不稳定性可理解为由于外界工作条件(周围温度、电源电压和频率等)的变化,以及磁放大器各组成元件特性的时间演变而引起磁放大器静特性(输入-输出特性)的变化。

实际磁放大器的静特性是饱和扼流圈、半导体二极管、负载电阻等参数的一个复杂函数关系,而这些参数本身又受温度、电源电压和频率、空气湿度、时间和其他引起磁放大器工作不稳定的一些因素的影响。

电源电压通常是在额定值的 $\pm 10\%$ 甚至更大的范围内变化,电源频率也在大致相同的范围内变化。工作温度范围在航空中为 $-60 \sim +50^{\circ}\text{C}$ 。应用于铁道运输、船舶、石油工业和其他工业部门的磁放大器也是在近似于上述的条件下工作。在这些条件中温度不稳定性通常是引起磁放大器工作不稳定的主要原因。

稳定性的一些问题在有关磁放大器的早期著作中,特别是在 J. A. 别沙诺夫、M. A. 罗津勃拉特、A. M. 雷夫金、B. 盖盖尔等人的著作中已有所研究。在较晚的著作中,包括一些巨著,象 M. A. 罗津勃拉特的“磁放大器”等,也阐明了一

些穩定性問題。但上述這些著作所研究的穩定性問題僅局限於試驗研究和憑經驗選擇穩定方法和穩定措施的範疇。這些著作中所提出的建議，在穩定措施方面還未达到實用工程計算的水平。此外，近十年來，在提高磁放大器工作穩定性方面又進行了不少工作，這些經驗也有必要加以總結。

本書目的是介紹磁放大器及無觸點磁繼電器穩定性和穩定方法的一些研究成果。同時將重點放在數量關係的確定和有意識地選擇穩定方法和措施方面，因為數量關係的確定使在設計時能近似地確定磁放大器不穩定性的方向和數值。這種做法的實際意義很明顯，因為通過試驗確定磁放大器的不穩定性非常困難，且需有專門的設備。

本書限於篇幅，在選材及細節的敘述方面均感不足。為使讀者能獲得在本書中未述及的有關知識，在書末列有參考文獻的書目。

在完成本書主要章節和討論編著大綱時，蒙蘇聯科學院通訊院士B. C. 索特斯考夫教授提出了極寶貴的建議和指正，作者對此表示衷心的感謝。

本書是專題系統性闡述的初次嘗試，故所有批評和指正意見對作者來說都是極寶貴的，並將感激地加以接受。

目 录

前 言

第1章 扼流磁放大器	1
1. 作用原理	1
2. 最简单的扼流磁放大器	3
3. 磁放大器的实用线路	6
4. 理想磁放大器的基本方程式	7
5. 反馈磁放大器	11
6. 反馈磁放大器的静特性	12
7. 继电状态的磁放大器	15
8. 无触点磁继电器的静特性常数	16
9. 双拍磁放大器	17
10. 双拍磁放大器的放大系数	21
11. 偏移	22
第2章 磁放大器工作不稳定的原因	24
12. 实际磁放大器的基本关系式	24
13. 直流输出的实际磁放大器	29
14. 有反馈的实际磁放大器	35
15. 决定磁放大器工作不稳定的因素	36
16. 温度不稳定性	37
17. 铁心磁特性与温度的关系	38
18. 半导体二极管的温度系数	45
19. 元件温度不稳定性引起的磁放大器特性变化	56
20. 电源电压变化引起的不稳定性	62
21. 电源频率变化引起的不稳定性	64
22. 磁放大器元件特性老化引起的不稳定性	67
23. 其他原因引起的不稳定性	69

第3章 磁放大器不穩定性的計算確定	72
24. 磁放大器的溫度係數	72
25. 最簡單的交流輸出磁放大器的溫度係數	73
26. 計算實例和試驗驗證結果	75
27. 直流輸出磁放大器的溫度係數	82
28. 反饋磁放大器的溫度係數	83
29. 電源電壓不穩定性係數	85
30. 電源頻率不穩定性係數	87
31. 雙拍磁放大器穩定性的評價	89
第4章 提高穩定性的磁放大器的設計	92
32. 導出公式的分析	92
33. 基本的計算關係式	94
34. 如何選擇飽和扼流圈的材料和結構	97
35. 用負反饋來穩定磁放大器	102
36. 偏移的穩定	105
37. 綜合穩定法	110
38. 磁放大器時延的評價	114
39. 提高穩定性磁放大器的計算方法	117
參考文獻	125

第 1 章

扼流磁放大器

1. 作用原理

扼流磁放大器应用最广。图 1a 为一最简单的扼流磁放大器 (MY), 它是一个与负载电阻串联于交流电源的可变电感 (饱和扼流圈)。其电感随输入信号的大小而变, 因此负载电流也跟着变化。从图 1a 可以看出, 负载电流为

$$I_{\text{H}} = \frac{U_{\text{H}}}{\sqrt{(\omega L_{\text{AP}})^2 + R_{\text{H}}^2}} \quad (1)$$

式中 L_{AP} ——扼流圈的电感;

R_{H} ——负载电阻;

U_{H} ——电源电压;

ω ——角频率。

由于扼流圈的电感是输入 (控制) 信号的函数, 即 $L_{\text{AP}} = f(I_{\text{BX}})$, 所以负载电流也决定于 I_{BX} 值。

为了使扼流圈的感抗 $X_{\text{AP}} = \omega L_{\text{AP}}$ 改变时, 负载电流跟着起必要的变化, 这个感抗就必须比负载电阻大得多。事实上, 只有在这个条件下, 负载电流才基本上决定于扼流圈的感抗。

为了得到大的电感, 饱和扼流圈都用铁磁铁心制成; 并采用高磁导率的材料。这是由于当其他条件相同时, 扼流圈的

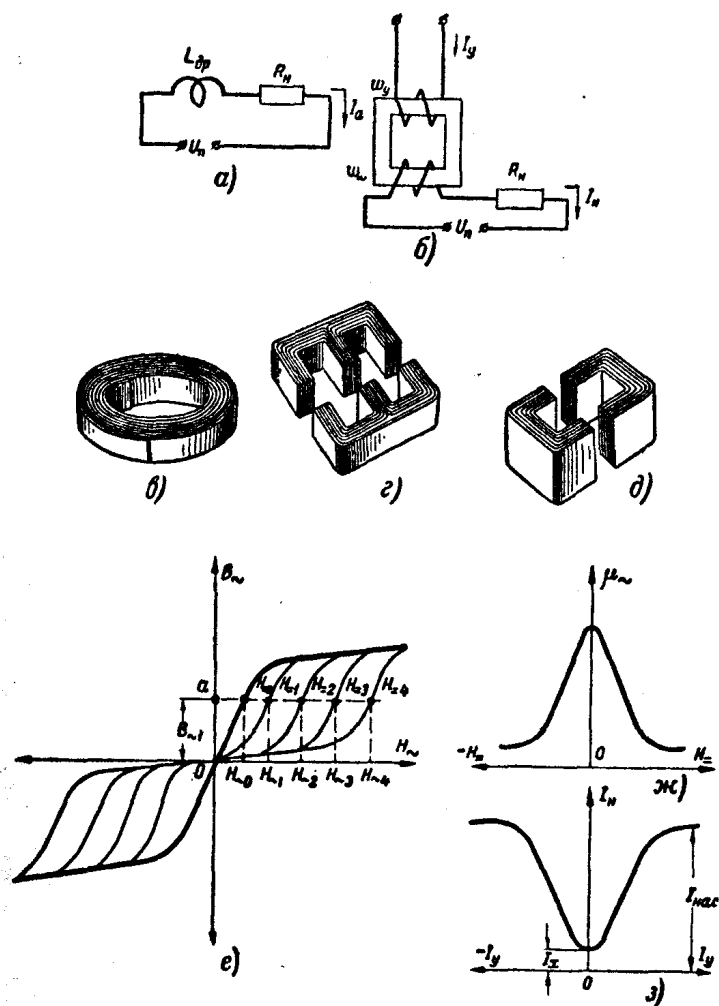


图 1 磁放大器的线路、铁心和特性

a—负载回路原理图；b—单铁心的最简单磁放大器；c—环形铁心；
 d—壳式（Ⅲ形）铁心；e—交直流磁场同时磁化曲线族；f—磁导率与控制（迭加磁化）磁场间的关系曲线；g—
 磁放大器的静特性

电感与磁导率 μ 成比例,并用下式来确定

$$L_{\text{ap}} = \frac{w^2 Q}{l} \mu_0 \mu = \frac{0.4 \pi w^2 Q}{10^8 l} \mu \text{ 亨} \quad (2)$$

式中 w 、 Q 和 l ——分别为扼流圈的匝数、铁心截面积和磁路的平均长度;

μ ——相对磁导率;

μ_0 ——表征真空磁性的常数。

在目前采用的 (ГОСТ 8033-56) МКСА (米·千克·秒·安) 实用单位制中, $\mu_0 = \frac{0.4\pi}{10^9} = 1.256 \times 10^{-6}$ 亨/米。在实用中则采用 $\mu_0 = 1.256 \times 10^{-8}$ 亨/厘米。图 1e~d 是各种不同用途的磁放大器的扼流圈铁心。

用带料卷绕而没有气隙的环形铁心 (图 1e) 的磁特性最好。但它仅限用于功率较小的磁放大器,因为在大功率的情况下,由于导线截面较大,在这种铁心的扼流圈上绕制线圈工艺上很困难。因此功率较大的磁放大器,特别是低频用的磁放大器,照例是采用壳式 (图 1b) 或心式 (图 1d) 的扼流圈。

磁放大器接输入讯号的绕组,通常称为控制绕组 w_y 或输入绕组 (图 1b)。接到负载回路的绕组通常称为交流绕组 $w_{\sim}$, 也称为工作绕组或输出绕组。

2. 最简单的扼流磁放大器

图 1b 所示最简单的磁放大器就是一个变压器,它的初级绕组上接控制讯号 I_y , 而次级绕组接到负载回路。实质上这时次级绕组的电感由控制讯号的大小来决定。

为了要弄清楚输入讯号怎样来改变交流绕组的电感,我们来研究一下图 1e 所示的特性曲线族。

这个曲线族表示磁放大器扼流圈铁心中磁感应强度交流

分量与磁場强度間的关系,这个磁場是由繞組 $w_{\sim}$ 中的交流电流和繞組 w_y 中的直流电流共同建立的,故称为交直流磁場同时磁化曲綫族。

图 1e 上曲綫族的粗綫相当于沒有控制訊号 ($I_y=0$) 时的特性曲綫。由于 $H_{\sim} = \frac{I_y w_y}{l}$, 所以这时 $H_{\sim}$ 也等于零。

再研究一下,随着控制訊号 (也就是 $H_{\sim}$) 的增大,磁感应强度交流分量的磁导率将起怎样的变化。

选择 a 点相当于鉄心起始磁感应强度 $B_{\sim 1}$, 通过 a 点作一直綫平行于 $H_{\sim}$ 軸。計算出这条直綫与曲綫族各特性曲綫交点处鉄心磁通交流分量的磁导率 $\mu_{\sim}$ 。按照定义

$$\mu_{\sim} = \frac{B_{\sim}}{H_{\sim}} \quad (3)$$

随着控制訊号 ($H_{\sim}$) 的增大, $H_{\sim}$ 值也跟着增大,如 $B_{\sim}$ 仍保持不变,就相当于 $\mu_{\sim}$ 在减小。图 1ж 是 $\mu_{\sim}$ 与 $H_{\sim}$ 間的关系曲綫。应该注意,这条曲綫 $\mu_{\sim} = f(H_{\sim})$ 是对称的,它表明磁导率的减小与控制訊号的极性无关。因此上述磁放大器的 $I_{\sim}$ 与 I_y 間的关系曲綫 (磁放大器的靜特性曲綫) 也将是对称的,并具有图 1з 所示的形状。

图 2a 是被广泛用来制造磁放大器鉄心的坡莫合金 (鉄鎳合金) 的靜磁化曲綫 [曲綫 $B = f_1(H)$], 和关系曲綫

$$\mu = \frac{B}{H} = f_2(H)$$

还应注意,图上所示各量均以实用单位制 (MKCA) 表示。因此,磁感应强度 B 用韦伯/厘米² 表示,而磁場强度 H 用安匝/厘米 或 安/厘米 表示。

① 事实上在实用单位制中,磁感应强度 B 的单位为韦伯/米²,而磁場强度 H 的单位为安匝/米或安/米。——譯注

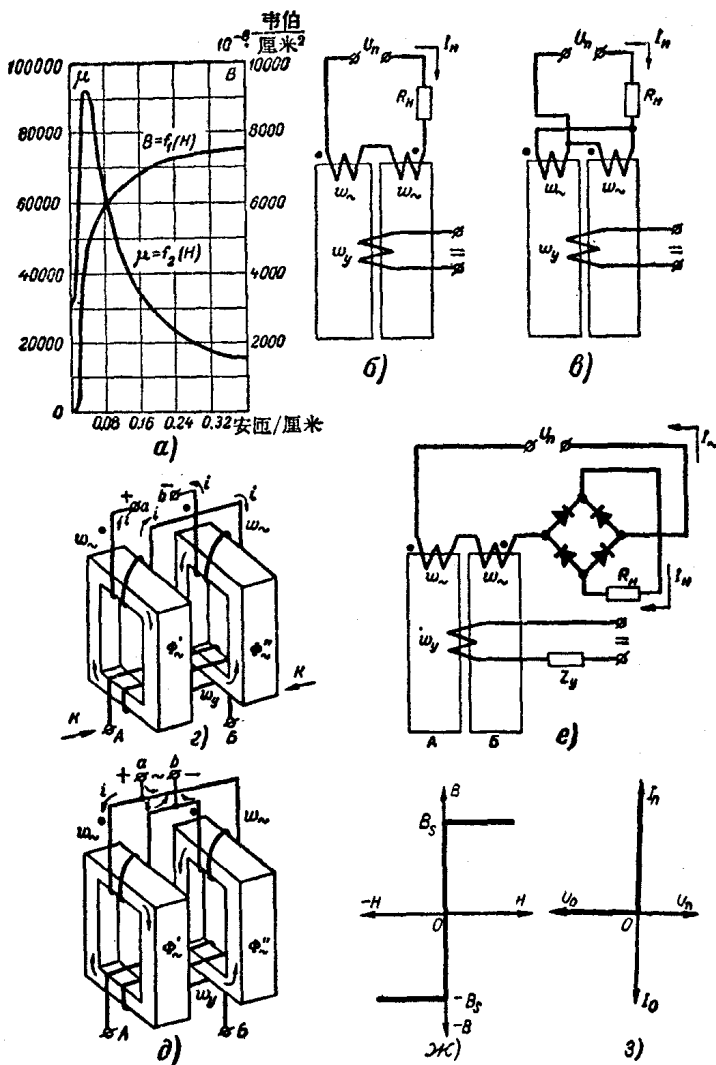


图2 无反馈的磁放大器

a—磁感应强度 B 和磁导率 μ 与磁场强度 H 的关系曲线；b—交流绕组 w_n 串联的最简单磁放大器的实用线路；c—同 b，但 w_n 并联；d— w_n 串联时，电流和磁通的方向；e—同 d，但 w_n 并联时；f—直流输出的磁放大器；g—理想饱和扼流圈的磁化曲线；h—理想二极管的伏-安特性

在过去所用的 CGS (厘米·克·秒) 单位制中, 磁感应强度用高斯表示, 而磁场强度用奥表示。

CGS 单位制和 MKSA 单位制间的关系为

$$\begin{aligned} 1 \text{ 高斯} &= 10^{-4} \text{ 韦伯/米}^2 = 10^{-4} \text{ 特斯拉} \text{ ①} \\ &= 10^{-8} \text{ 韦伯/厘米}^2 \end{aligned}$$

$$1 \text{ 奥} = \frac{1}{0.4\pi} \times 10^3 \text{ 安匝/米} = 0.8 \text{ 安匝/厘米}$$

在 CGS 单位制中, 磁导率用高斯/奥表示。

3. 磁放大器的实用线路

图 16 所示单铁心的最简单磁放大器实际上是不用的, 因为绕组 w_x 的交流电流反映到绕组 w_y 中将产生感应电势, 这一电势迭加在控制讯号上, 并使它发生畸变。为了消除这一影响, 最简单的磁放大器是用两个扼流圈组成, 其交流绕组的接法必须使控制绕组中由这些交流绕组感应产生的交变电势的方向相反而大小相等(相互抵偿)。更确切些说, 如图 26 和 θ 线路分析所示, 只有在没有迭加磁化的情况下, 这些电势才能获得全部补偿, 当有迭加磁化时, 只有感应电势中的基波和所有奇次谐波被消除, 而偶次谐波仍然留下, 并在控制回路中产生电流。但这些偶次谐波的波幅通常要比基波的小好几倍, 因此绕组 w_y 中的电流值不大。

交流绕组可接成串联(图 26), 也可接成并联(图 28)。图 26 是绕组串联时绕组中电流和铁心中磁通的方向, 用来解释上述情况。

假定在所研究的电源电压的半周中, a 点的电位高于 b 点, 那末扼流圈 A 的交流绕组中的电流自绕组首端(用一点

① 原文为 mT , 其全名为 Тесла。——译注

号表示)流向末端,而扼流圈 B 的交流绕组中的电流则自末端流向首端。这时扼流圈 A 和 B 中磁通 $\Phi_{\sim}$ 和 $\Phi'_{\sim}$ 的方向将如图 2*z* 所示。

如果把扼流圈 A 和 B 沿箭头 K 的方向移动,则磁通 $\Phi_{\sim}$ 和 $\Phi'_{\sim}$ 将处于相反方向,结果就相互抵偿。非常明显,如将其中一个扼流圈转过半圈,则磁通 $\Phi_{\sim}$ 和 $\Phi'_{\sim}$ 将相加,而控制绕组内将产生感应电势。在制造磁放大器的扼流圈时,这种不正确的装配是突出的错误之一。图 2*o* 是绕组 $w_{\sim}$ 并联时,电流和磁通的方向。

图 2*o* 和 *o* 所示线路的特点是负载电阻中通过的都是电源频率的交流电流。这类磁放大器称为交流输出的磁放大器。

在负载电流必须是直流的情况下,磁放大器线路中要加进整流电桥(图 2*e*)。这类磁放大器称为直流输出的磁放大器。

4. 理想磁放大器的基本方程式

理想磁放大器是指用具有理想磁化特性曲线(图 2*u*)的铁心和有理想伏-安特性曲线(图 2*g*)的整流器所做成的磁放大器。对于这样的磁放大器,下式是正确的

$$I_{\sim} w_{\sim} = I_y w_y \quad (4)$$

上述关系式是磁放大器的基本方程式。它常常被称为“变压器”定律,因为该式的样子与普通变压器的相应关系式类似。

我们来研究一下按图 2*e* 线路构成的在强迫磁化状态下工作的最简单磁放大器。这种工作状态发生在绕组 w_y 中感应产生倍频电压而控制回路阻抗 z_y 很大时,因此倍频电流实

实际上不通过控制回路。譬如，利用在控制回路内接入电感或
对控制绕组选用較少的匝数等方法就可获得这种工作状态。
强迫磁化状态往往被称为偶次諧波抑制的工作状态^[45]。

对上述交流绕组串联的最简单磁放大器，控制回路中具有大的阻抗是强迫磁化工作状态所必需的也是足够的一个条件。在交流绕组并联的情况下，这也是一个必要条件，但还嫌不够，因为交流绕组并联时控制回路的阻抗很低，对电流的偶次諧波而言，与控制回路的阻抗值无关，也就是说造成了自然磁化工作状态的条件。在具有偏移和外反馈等比較复杂的磁放大器线路中，对产生自然磁化状态而言条件更为有利。

假定磁放大器的负载回路由正弦电压供电，该电压产生使铁心饱和的磁场交流分量，即出现 $B_m = B_s$ 的关系，这里， B_m 为铁心磁感应强度的幅值，而 B_s 为铁心材料的饱和磁感应强度。

在电源电压的一个半周期間，由控制绕组中电流 I_y 建立起来的磁场强度直流分量 $H_{\sim}$ ，在一个铁心 A 中其符号与磁场强度交流分量 $H_{\sim}$ 的相同，而在另一个铁心 B 中則相反。在直流分量符号与交流分量相同的那个铁心中，磁感应强度沒有改变，因为此时铁心已饱和。因此铁心 A 的交流绕组 ($w_{\sim A}$) 的感抗极微，全部电源电压 U_{π} 将施加在绕组 $w_{\sim B}$ 上。

在铁心 B 中，由于磁通直流和交流分量的符号相反，在第一个半周期間，该铁心并未饱和，因此铁心中的磁感应强度将依正弦律变化 (图 3a)。在电源电压的第二个半周期間，图形变化恰巧相反：铁心 B 饱和，而铁心 A 沒有饱和 (图 3b)。

这样，当绕组 w_y 中有直流电流时，铁心磁感应强度将轮流地在两者之一中发生变化，也就是在交流磁场 (由绕组 $w_{\sim}$ 中的电流 i 产生) 方向和直流磁场 (由电流 I_y 产生) 方向相同

的那个铁心中发生变化。铁心 B 或 A 中的磁感应强度 (B_2 和 B_1) 随时间变化的特征分别如图 3a 和 6 所示。

在磁感应强度发生变化的那个铁心中, 由电流 i 和 I_y 产生的合成磁场强度为

$$H_{\text{pes}} = H_{\sim} - H_{\sim} = \frac{1}{l} (w_y I_y - w_{\sim} i) \quad (5)$$

在理想磁化曲线 (图 2ж) 的情况下, 只有当 $H_{\text{pes}} = 0$, 也就是当交流磁场强度 $H_{\sim}$ 与直流磁场强度 $H_{\sim}$ 相互抵消时, 磁感应强度才可能改变, 并小于饱和磁感应强度 B_s 。因此, 对磁感应强度发生变化的那个铁心而言, 在所述的半周时, 下式是成立的

$$i w_{\sim} = I_y w_y \quad (6)$$

因为这时另一个铁心已饱和, 所以它不影响电流 i 的数值。在上述假定 (理想的磁化曲线和绕组 w_y 中没有倍频电流) 下, 尽管电源电压是正弦形, 但电流 i 则为矩形 (图 3б)。经整流后则得直流的负载电流 I_H (图 3в)

$$I_H = i_H = I_y \frac{w_y}{w_{\sim}} \quad (7)$$

或

$$I_H w_{\sim} = I_y w_y \quad (8)$$

当控制回路的电阻很小时 (自然磁化状态), 该回路中将有偶次谐波电流通过。这时负载电流将不呈矩形。但即使在这种情况下, 式 (8) 仍继续成立^[2]。

由理想磁放大器的基本方程式 (4) 可得电流放大系数的关系式

$$K_T = \frac{\Delta I_H}{\Delta I_y} = \frac{I_H}{I_y} = \frac{w_y}{w_{\sim}} \quad (9)$$

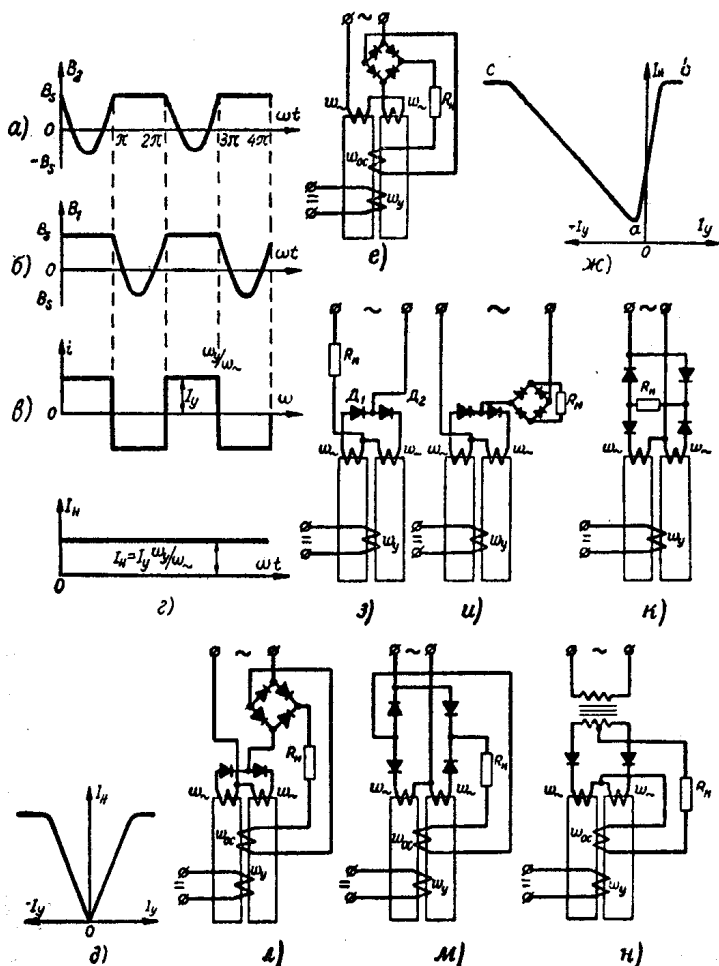


图3 反饋磁放大器

a、б、в、г—当控制繞組中有直流电流而无倍頻电流时，图2e线路中磁感应强度和电流的变化图；д—理想磁放大器的静特性；e—外反饋磁放大器；ж—反饋磁放大器的静特性；з—交流输出的內反饋磁放大器；и—直流输出的內反饋磁放大器；к—同и，但二极管的数量减少；л—混合反饋（內反饋和外反饋）的磁放大器；м—同л，但二极管的数量减少；н—同л，但帶有变压器