

学术会议报告

冲击波测量暂行导则

(1965年中国电机工程学会高压测量及试验技术年会)

王凡耀 馬秀荃

水利电力部电力科学研究院

1965年10月

內 容 提 要

本导則草案拟訂了在冲击波測量中为减小測量誤差提高測量准确度所应注意遵守的条件和規則。

內容包括对冲击波波形定义的解釋；对測量准确度的要求；对試驗室中測量冲击波的主要方法的說明；对冲击分压器、冲击分流器、高速示波器及測量球隙的使用，对从測量裝置的选型，回路布置到誤差校驗和最終得出測量結果的整个測量过程中应注意遵守的条件作了具体的規定。除了一部分是我們从工作中得到的經驗以外，其余主要是国内外文献資料和标准規程中公認的結論，对于在目前看来还不够成熟的部分內容則列在附录中或注解中加以說明。

目 录

前言

第一章 总则

第一节 适用范围

第二节 有关定义

第三节 测量方法

第二章 冲击分压器

第一节 分压器的选型

第二节 各种分压回路的分压比

第三节 测量系统中元件的选择和布置

第四节 测量系统的校验

第三章 冲击分流器

第一节 分流器的选型

第二节 测量回路中元件的选择和布置

第三节 测量回路的校验

第四章 阴极射线示波器

第一节 示波器的使用

第二节 示波图的计量

第五章 测量球隙

第一节 球体及球架

第二节 球间隙的连接

第三节 球间隙的使用

附录一 高压大功率的电容分压回路

- 附录二 高频电缆的电气特性
- 附录三 由方波响应特性计算误差
- 附录四 由频率响应特性计算误差
- 附录五 电阻材料的特性
- 附录六 由温升所限制的分流器截面
- 附录七 用波头相位法校验分流器
- 附录八 球间隙放电电压
- 附录九 有关的参考资料

前 言

冲击波測量是一項基础測量。在我国生产建設事业和科学研究工作的发展中，如何統一技术要求提高測量的准确度减小測量誤差，已成為一項迫切的任务。过去我們在冲击試驗方面作过一些工作，但对基本測量方法未进行系統的研究，有时也走过一些弯路。因此，我們想把一些我們引为依据的內容編写出来，暫供工作中使用，同时也提給兄弟单位供作參攷和征求意见。

編写时所依据的資料，除了国际电工委员会及国外的有关标准規程外，还有我国1964年頒布的国家标准〔GB 311—64〕、一机部頒标准〔JB 487—64〕及有关單位提出的标准草案。此外，还引用了国内外文献資料中公認比較成熟的結論和我們在工作中的体会和經驗（比較不成熟的結論或經驗則列在注釋或附录中，供作參攷）。国内的文献資料主要是科学院电工研究所、北京电力学院、清华大学、西安交通大学等單位的研究报告。由于我們对冲击波測量的研究工作还很缺乏經驗，只能就我們所能理解的程度編写，除有待今后在实践中檢驗更正外，錯誤之处还請大家指正。

暫行导則的初稿曾經在北京市电机工程学会上討論过一次，各兄弟单位提出了不少宝贵的意見，特別是清华大学在会后又进行了詳細的研究，补充提了許多具体意見。我們根据这些意見进行了一次修改。对于兄弟单位的帮助，我們謹此表示感謝。

第一章 总則

第一节 适用范围

第一条 本导則适用于冲击試驗中的冲击波測量。

第二节 有关定义

第2条 冲击电压波和冲击电流波統称冲击波，以下列参数表征其特性：

(1)极性，(2)峰值，(3)波首，(4)波长，(5)截断時間
(6)截断电压降落時間。

第3条 全波冲击电压是一种非周期性的瞬时电压，其特点是电压由零值迅速上升到最大值，然后較慢地下降到零值，见图1。最大值 U 称为峰值。試驗中允許波幅上有不超过基波波幅5%的振盪，此时全波冲击电压取平均曲綫求得峰值，见图2。

以峰值的0.3到0.9两点間时间的1.67倍〔图1中的1.67 $a b$ 〕定为波首 T_1 ，在直綫扫描的示波器中即为 O_1 点到P点的時間， O_1 点即为过A B两点的直綫与時間軸的交点，称为規定零点，在非直綫扫描时， O_1 点在 a 前0.5 $a b$ 处。P点为A B直綫与波峰延伸綫的交点。由規定零点到半峰值的时间定为波长 T_2 。峰值与波首之比称为波首陡度。

冲击电压波的表示方法为 T_1 / T_2 。我国的标准冲击全波电压波形为1.5/40微秒〔GB 311—64〕。根据不同的試驗工作的需要，还可以选用其他波形。

第4条 冲击全波电压或近似綫性上升的电压被突然截断时，电压迅速下降到零，形成截波，见图3与图4。

截断时电压值 θ 的0.7和0.1两点間时间的1.67倍〔图3与图4中的1.67 $c d$ 〕称为截断电压降落時間，在直綫扫描的

示波器中即为Q点到F点的时间 T'_c ，F点为CD直线与时间轴的交点。Q点为CD直线与波幅延伸线的交点。对于波尾截断波，在取CD两点的位置时，先对截断时电压值作估计，求出交点Q后再用e值作复核校正。

由规定零点 O_1 到截断时刻Q点的时间称为截断时间 T_c 。截断时电压值与电压降落时间之比称为截断陡度。

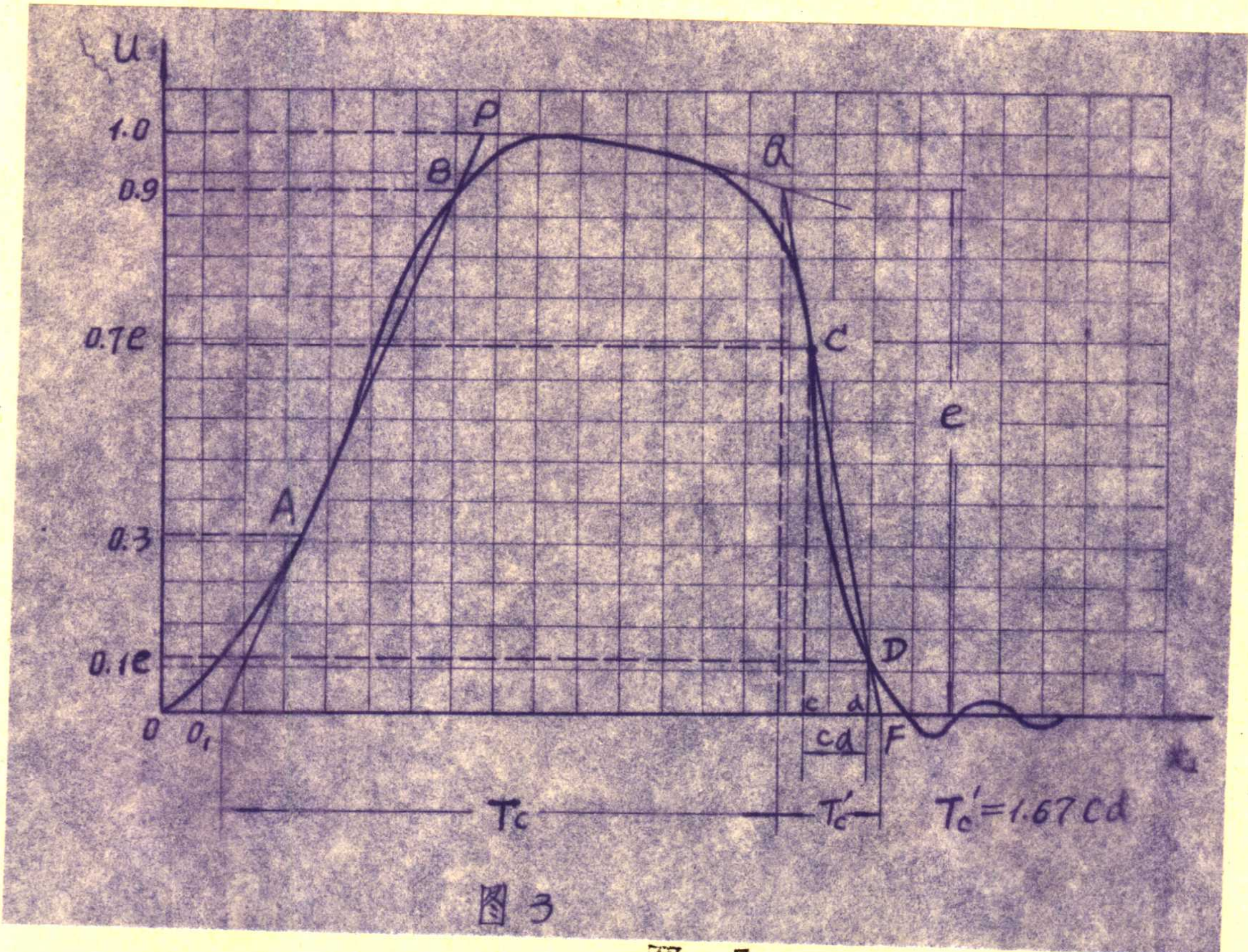


图 3

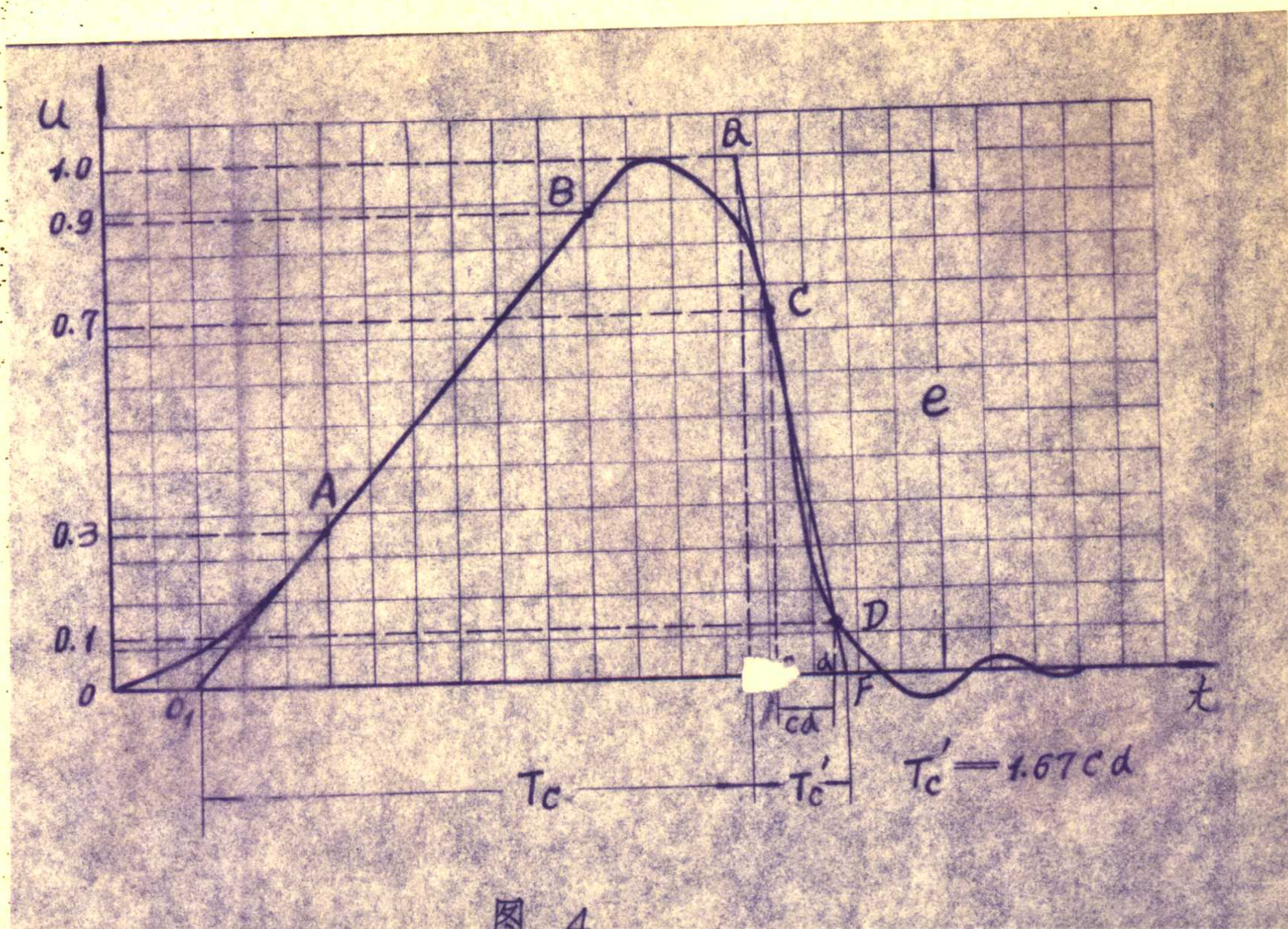


图 4

第 5 条 冲击电流波是一种非周期性的瞬时电流波，其特点是电流由零值迅速上升到最大值，而较慢地下降到零值，见图 5。电流的最大值定为峰值，若幅值上叠加有不超 5% 的振荡，则以平均曲线确定峰值。峰值的 0.1 和 0.9 两点时间的 1.25 倍称为冲击电流的波首 T_1 （图 5 中的 1.25 ab ）。在 a 前 $0.17 T_1$ 处的点 O_1 称为规定零点，在直线扫描的示波器中，此点即为 AB 直线与时间轴的交点。由规定零点 O_1 到电流半峰值的时间称为波长 T_2 。冲击电流波的表示方法为 T_1 / T_2 ，常用的波形为，10 / 20，20 / 40 微秒。根据不同的试验工作的需要，还可选用其他波形。

矩形电流波的特点是电流迅速上升到最大值，在一定的时间内保持不变，再迅速降到零值，见图 6。以波幅延续平滑部分的数值定为

峰值，波峰前后 90% 間的时间定为波长 T 。常用的矩形电流波的波长为 500, 1000, 2000 微秒。

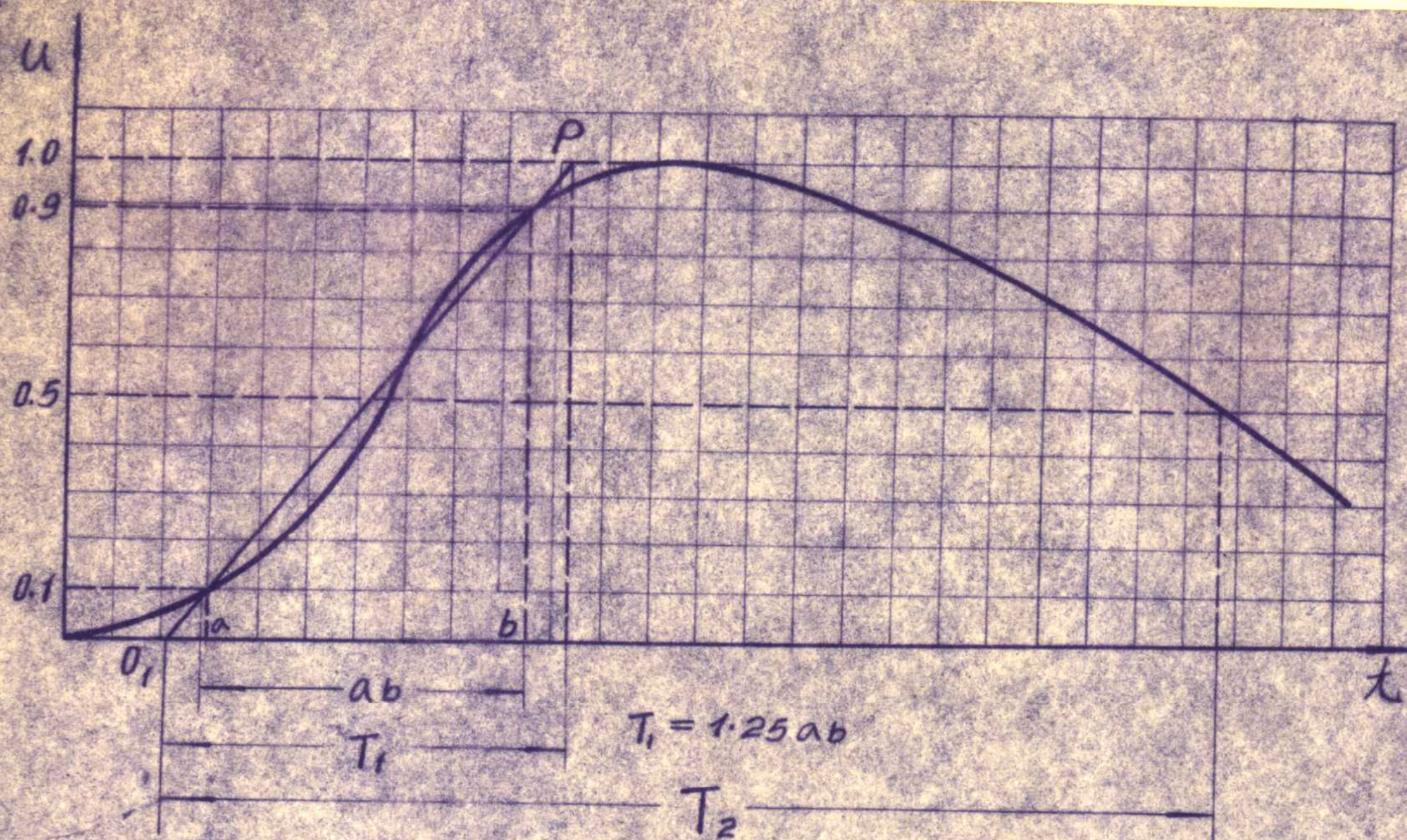
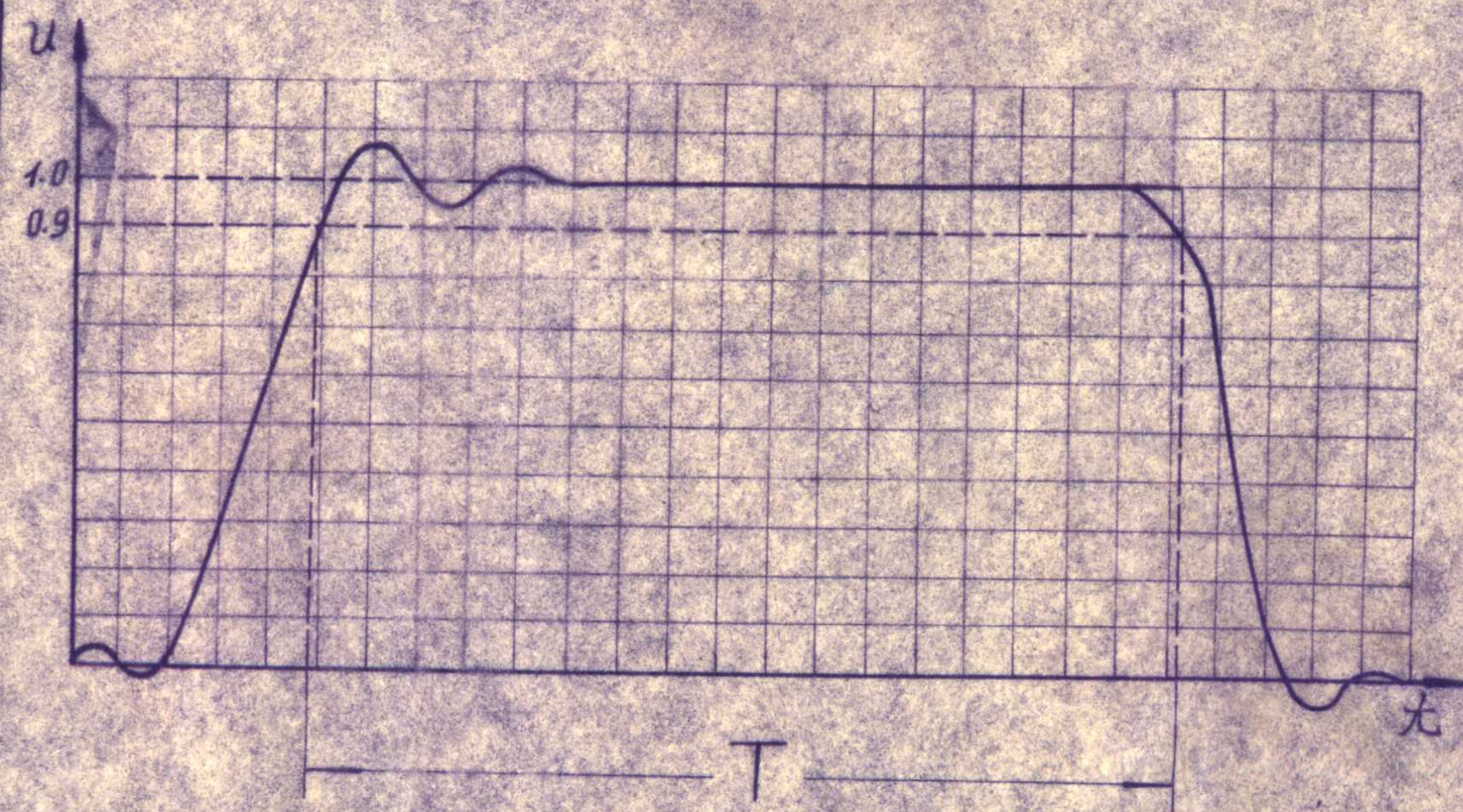


图 5



第6条 試驗中，对于标准波的波形参数允許的偏差如下：

(1)冲击电压波〔GB 311—64〕： $1.5/40$ 微秒。

波首〔 T_1 〕 ± 0.2 微秒；

波长〔 T_2 〕 ± 4 微秒

峰值附近的振盪 5%

(2)冲击电流波： $\pm 10/20$ 、 $\pm 20/40$ 微秒〔注〕

峰值 $\pm 10\%$

波首〔 T_1 〕 $\pm 10\%$

波长〔 T_2 〕 $+20\%$

峰值附近的振盪 5%

注：根据一机部部頒标准〔JB 487—64〕“閘式避雷器技术条件”

(3)矩形电流波：波长2000 微秒〔注〕

峰值 $+20\% \sim 0\%$

波长 $+20\% \sim 0\%$

总时间 小于1.5 波长

起始部分及峰值附近的振盪 10%

反极性波幅值 10%

注：根据国际电工委员会文件3〔秘〕21，1964 年建議

第三节 測量方法

第7条 在測量冲击波时，所用測量裝置的誤差，应不超过下列数值：

(1)峰值 $\pm 3\%$ 对于波首1 微秒內截断波可增到 $\pm 5\%$

(2)波首 $\pm 10\%$

(3)波长 $\pm 10\%$

第8条 测量冲击电压时，通常采用分压器与示波器、球间隙。测量冲击电流通常采用分流器与示波器。

第二章 冲击分压器

第一节 分压器的选型

第9条 测量高峰值的冲击电压波形，需采用分压器。分压器的作用是将被测波缩小比例传送给示波器。

第10条 常用的冲击分压器有下列几种类型：（注）

- (1)电阻分压器；
- (2)电容分压器；
- (3)阻容并联式分压器；
- (4)阻容串联式分压器。

注：有关各种分压器的特性，可参见附录九文献4，5。

第11条 电阻分压器的结构最简单，一般适用于测量幅值不大于2000千伏的冲击电压。因分压器高压臂对地电容的分流作用引起被测波形的畸变，畸变引起的相对误差为 $\frac{RC_e}{6\tau} \times 100\%$ （此处R为高压臂电阻， C_e 为对地电容），在高幅值的情况下，要减小R和 C_e 受到冲击发生器容量和分压器沿面放电距离的限制，而要补偿对地电容电流的影响，则必须装设尺寸很大的屏蔽环，在实际上遇到困难，故电阻分压器不宜用于比2000千伏更高幅值的电压测量。

第12条 电容分压器的分压比在较宽的频带上不随频率变化，可以测量较快的和较慢的变化过程。若接入电阻分压器会使冲击发生器调波发生困难，或在分压比不适当时，可采用电容分压器。电容分压器在与长的测量电缆联结时要求特殊的配合（见第18条），即使在最佳匹

配的情况下，也会引起測量誤差。

两极式电容分压器結構簡單，不需采用測量電纜，对測量幅值高达数千伏以上的电压，是最为經濟的分压器型式。但因高压臂电容太小，易受電暈及外界電場等因素影响而起变化，且其值不易測定，不便于求得分压比，因此不能准确地測量峰值，需借其他方法进行校正。

第 1 3 条 阻容並联式分压器，由于本身串联电容的存在，削弱了对地电容的影响，且由于具有並联电阻，便于与长的測量電纜联結和进行終端匹配，在高低压臂的时间常数相等的条件下，分压器在高頻与低頻下的分压比是一致的，因此，可以測量緩慢的和快速的变化过程，是近代測量高幅高陡度冲击电压比較完善的分压器型式。但是，这种分压器的結構比較复杂，价格比較昂貴。在电压幅值甚高时，由于存在随分压器几何尺寸增大的对地电容，这时要保持高低压臂的时间常数相等是困难的，而时间常数的不一致会导致被测波形的畸变。

第 1 4 条 阻容串联式分压器，在高頻下其作用如同电阻分压器，在低頻下如同电容分压器，兼具有此两类分压器的缺点，只适用于冲击与工頻疊加的測量。

第 1 5 条 各种类型的分压器具有不同的优缺点，應該根据測量准确度的要求和經濟性来进行选择。各种分压器都会引起一定的誤差，誤差的主要来源是分压器的对地电容，为弄清誤差的范围，必須事先对分压器进行誤差計算或校驗，而选择合格的分压器进行測量。分压器的誤差計算和校驗見第 2 6 条 2 8 条和本章第四节。

第二节 各种分压回路的分压比

第 1 6 条 各型分压器适用的分压回路見表 1。回路的分压比應該与測量電纜一起考虑。

表1

分压器	图号	分压回路		
		結 綫 圖	需滿足的条件	分压比 $(\frac{u_2}{u_1})$
电阻分压器	1		$R_3 = Z_c$	$\frac{[R_2 \parallel R_3]}{R_1 + [R_2 \parallel R_3]}$
	2		1. $R_3 + [R_1 \parallel R_2] = Z_c$ $0 \leq R_3 < Z_c$ 2. $R_4 = Z_c$	$\frac{Z_1}{Z_1 + R_1} \cdot \frac{Z_c}{Z_c + R_3}$ $\approx \frac{R_2}{2R_1} \quad (\text{当 } R_2 \ll R_1)$ 式中 $Z_1 = [R_2 \parallel (R_3 + Z_c)]$
	3		$R_3 = Z_c$	$\frac{R_3}{R_1 + R_3}$
	4		1. $R_3 + [R_1 \parallel R_2] = Z_c$ $0 \leq R_3 < Z_c$ 或: 2. $R_3 = 0, R_2 > 0$ 短电缆(注1)	对于条件1: l 为图2的二倍 对于条件2: $l = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$
电容分压器	5		1. $R_1 = R_2 = Z_c$ 2. $C_1 + C_2 = C_3 + C_c$ 3. $\frac{C_c}{C_1 + C_2 + C_3} \leq 0.1$	$\frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_3 + C_c}$
	6		$R = Z_c$	$\frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_c}$
	7		短电缆(注2)	$\frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_c}$

续表 1

分压器	图号	分压回路		
		結线图	需满足的条件	分压比 $(\frac{u_2}{u_1})$
阻容并联式分压器	8		$1. R_3 = Z_c$ $2. R_1 \cdot C_1 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C_2$	$\frac{u_2}{u_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$ $= \frac{[R_2 R_3]}{R_1 + [R_2 R_3]}$
	9		$1. R_1 \cdot C_1 = R_2 (C_2 + C_c)$ $2. \text{短电缆 (注 3)}$	$\frac{u_2}{u_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ $= \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_c}$
	10		$1. R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2$ $2. R_3 + [R_1 R_2] = Z_c$	$\frac{u_2}{u_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ $= \frac{C_1}{C_1 + C_2}$
阻容串联式分压器	11		$1. R_4 = Z_c$ $2. R_3 + [R_1 R_2] = Z_c$ $3. C_1 + C_2 = C_3 + C_c$ $4. \frac{C_k}{C_1 + C_2 + C_3} \leq 0.1$	$\frac{u_2}{u_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_3 + C_c}$
	12		$1. R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2$ $2. R_2 = Z_c$	$\frac{u_2}{u_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_c}$

表 1 中所用符号的意义如下：

l_c — 电缆长度， Z_c — 电缆波阻， $\frac{u_2}{u_1}$ — 分压比。

注 1, 2, 3: — 一般在电缆长度 $l_c \leq \frac{v}{20} T_1$ 时， v 为波在电缆中传播的速度， $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ， L, C 是电缆单位长度的电感和电容，电缆中的反射波周期 2τ 为被测波首 T_1 的 $\frac{1}{10}$ ，在示波图上已显示不出电缆中波过程的影响，故可以不采用终端匹配。对于测量标准冲击全波而言，满足条件的电缆长度约为 10 米及以下。

第17条 电阻分压器可采用表1中图1至图4的分压回路。图1及图2适宜在要求分出的电压较低时采用。图1图2及图4的回路都可以利用改变低压臂电阻 R_2 的办法来调节分压比，特别在测量电缆的波阻大的条件下，分压比的调节范围亦增大（注）。图3实际上是图1（当 $R_2 = \infty$ 时）的特殊情况。

注：保持 R_1 ，改变 R_2 和 R_3 来调节分压比可以参见附录九文献7，12。

第18条 电容分压器在与测量电缆联结时，由于电缆参与分压，使分压比随频率变化，故一般不能采用普通的终端匹配方式，比较适当的分压回路如表1中图5。

实际上，在图5与图6中分压比均随频率变化，对于测量宽频带的被测波，会引起一定的误差，在最严重的情况下，即当输入直角波时，由于分压比改变而引起的最大误差，在图5约为1.6%，在图6则为 $\frac{C_c}{C_1 + C_2}$ 。（注）

两极式电容分压器，属于 $C_c = 0$ 的极限情况，此时电缆电容 $C_c = 0$ ，其分压比为 $\frac{C_c}{C_1 + C_2}$ 。

注：一 有关这方面问题的详细分析，参见附录九文献6，7。

此外对于高压大功率的电容分压器，为削弱分压器低压臂电感在波形上引起的振荡，还可采用附录一中的分压回路。

第19条 阻容并联式分压器可采用表1图8至10的回路。由于低频时回路按电阻分压，电缆电容不会引起分压比随频率的变化，因此，分压回路可以正确地传输被测波形。

第20条 阻容串联式分压器可采用表1图11及12的回路，

由于实际分压比随频率变化而引起的误差，图 1 1 与图 5 相同，而图 1 2 与图 6 相同。

第 2 1 条 各种分压器可用的分压回路很多，应该根据对分压比的要求和测量电缆长度来进行选择。分压回路产生误差的主要原因是由电缆电容而引起的分压比随频率变化，不应把这个误差和分压器本身的误差（第 1 5 条）混淆起来。

第三节 测量系统中元件的选择和布置

第 2 2 条 冲击电压测量系统的典型接线如图 1 8 其中引起测量误差的因素是：

- (1)分压器与被试物连线的电感；
- (2)分压器的对地电容和残余电感；
- (3)分压回路的分压比随频率变化；
- (4)测量电缆中的衰减，相移和反射；
- (5)示波器现象极的输入接线；
- (6)测量系统的接地方式。

测量系统中元件的选择和布置应力求减小上述因素的影响。

第 2 3 条 分压器与试品之间的距离，应满足试品和分压器各自对周围物体距离的要求。为了避免试品附近的电场受到畸变，各种试品离周围物体的距离应遵循各有关试验方法的规定。分压器距周围物体的水平距离应大于分压器本身高度的 1.5 倍。若分压器高度超过 3 米时，这一距离可只在 4.5 米。

第 2 4 条 由试品到分压器之间的高压引线存在电感和对地电容，在满足图 8 所要求的条件下，对地电容可以忽略不计，对于被测波只呈现电感的作用（约为 1 微亨/米）。此电感可能与分压器电容构成寄生振荡，此时应在分压器前串入阻尼电阻（如图 7 中的 R_d ），其

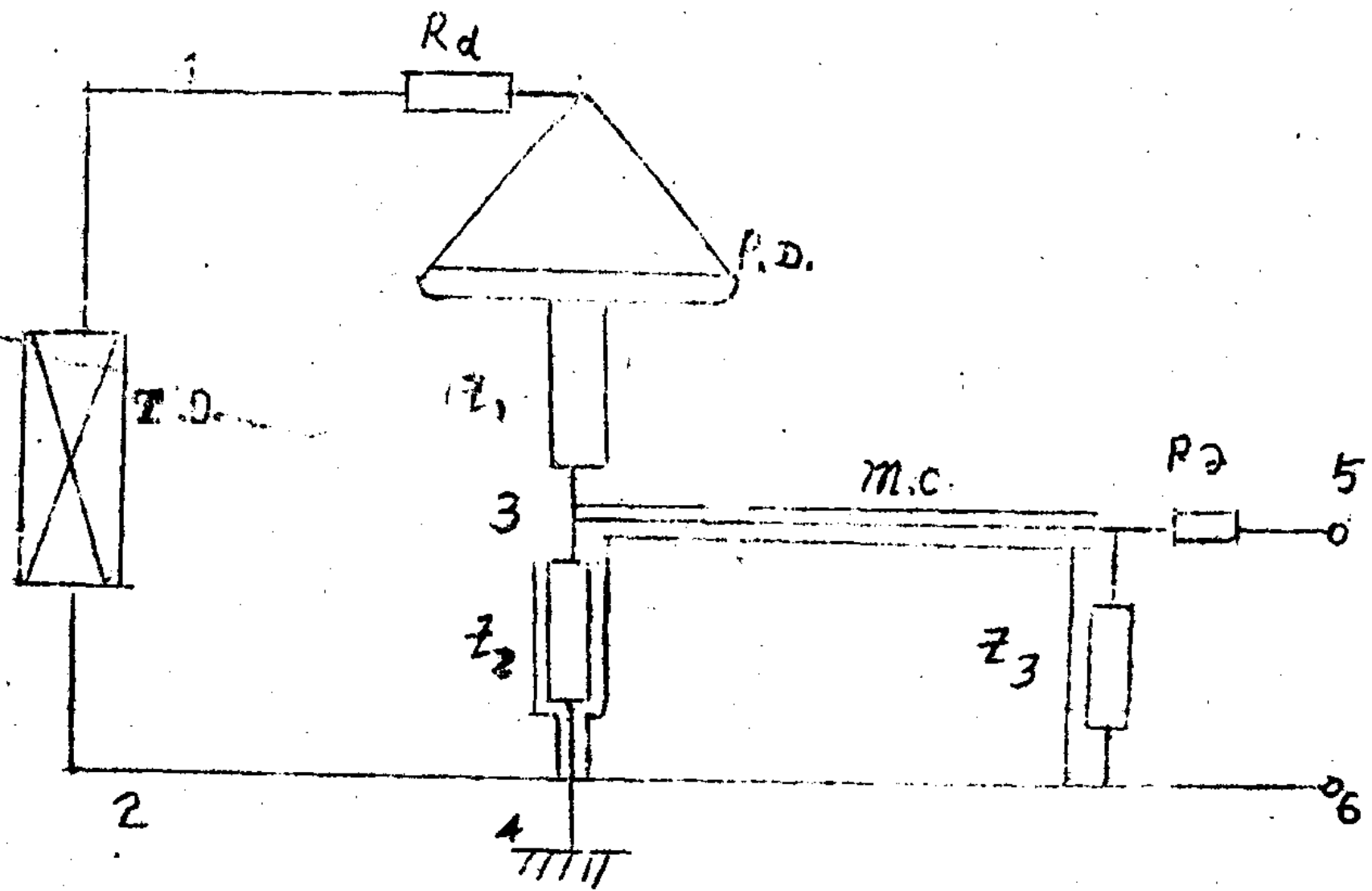


图 7

T.O. — 被試品

R_d — 阻尼电阻

P.D. — 分压器

m.c. — 測量电纜

Z_1, Z_2 — 分压器高低压臂阻抗元件, R_0 — 阻尼电阻

Z_3 — 电纜終端匹配元件

图中：C — 分压器高压端的入口电容；

C_f — 高压引线的对地电容；

T_c — 忽略 C_f 时所允許的被測波首切断時間。

图 8

