

1000伏以下 电气装置中的熔断器

苏联 Б. Л. 艾森貝尔格著

郑志裕 張之乾譯

電力工業出版社

目 录

緒論	2
第一章 熔断器工作的理論基础	3
第二章 保护(“時間——电流”)特性曲綫	19
第三章 1000伏以下电气装置中所采用的 熔断器的型式	33
第四章 电气装置的短时过载保护	66
第五章 熔断器保护选择性的計算及熔件 的选择性系統	82
第六章 熔断器的断路能力的提高	124

緒 論

只有在保護裝置能迅速反應電氣裝置正常工作條件的破壞，並按一定的、預先規定的時間順序起作用，從而及時將電氣裝置的故障元件與正常工作元件切斷的條件下，電氣裝置才能不間斷地工作。

熔斷器是最簡單的保護裝置之一，它特別廣泛地應用在1000伏以下的電氣裝置中。

熔斷器不論在城市電網中，或是在工業企業、公共場所以及住宅房屋的電氣裝置中，都獲得了廣泛的應用。

本書旨在探討熔斷器的理論問題，闡明如何利用熔件熱平衡的方法，結合着試驗資料來確定各種不同的因素對熔件特性的影響。同時也敘述了確定熔件在短路電流下的燒斷時間的方法，以及為保證對各種不同電氣裝置元件的保護而建立熔斷器熔件的選擇系統的方法。書中引証了在各企業中使用的各種熔斷器的資料，對其運行上的優缺點給予評價，並且也提供了在提高熔斷器的斷路能力上的工作成果。

書中所敘述的材料、結論和建議都是依據作者在最近幾年中會同列寧格勒電業管理局列寧格勒電纜網絡管理所、以及各工業企業的工作人員通過多次的試驗研究而提出的。

請將所有對本書的批評與意見寄至列寧格勒瑪爾蘇沃廣場1號國立動力出版社列寧格勒分社。

作 者

對於本書譯本內容及譯文之意見，請寄交北京復興門外月壇南路(社會路)電力工業出版社。

第一章 熔断器工作的理論基础

有关熔断器一般理論問題的著作在技术文献中为数較少。在1902—1912年，曾經有一些关于熔断器的研究作品刊載在国外的杂志上，有的編成單行本出版（梅耶尔，埃德勒和舒斯脫，雅謝等人的著作），以后經過長期的中斷，直至1934—1937年才重有出現。在苏联的技术文献中从未登載过有关熔断器的一般理論的著作。熔断器的理論仅在涉及个別的特殊問題时才討論过几次，例如在1932年、1938年和1946年在討論关于选择大起動电流的用电設備保护用的熔件时，曾經提出过熔断器的理論。

在作者的著作中，曾探究过熔件的热平衡，散热的各个分量的作用，以及这些分量与熔断器的熔件的型式、制作方法和材料的关系，但未曾导出表示这些关系的算式。

从已發表的关于熔断器理論的研究作品中，可以看出这些作品的主要缺点是熔件的熔断時間与負載电流間的数学关系極为复杂，因而所有的作者不得不引入許多簡化的方法，以致使这些計算不能不造成相当可觀的誤差。

在Г. 梅耶尔和Э. 雅謝的著作中，認為熔件表面向周圍介質的放热是和熔件温度和周圍介質温度之差的一次冪成正比的。如果这在以对流和傳导方式向周圍空气散热的情况下是正确的話，那么对于輻射散热就应取为這兩温度之差的四次冪。Г. 梅耶尔在將所有从熔件表面的散热方式併入一个算式中时，預先說明实际上放热要比温度差增加得更快，但

是可以認為誤差是不大的。这是因为：作为这种推論基础的實驗是在熔件仅加热到 100°C 以下作出的，而这时輻射在熔件的总的熱平衡中所起的作用比較小。但在較高的溫度下，此熱平衡分量对开啓的熔件具有決定性的意义，所以这样的簡化按其結果来看是不容許的。

Г. 約翰的著作与 Г. 梅耶尔的理論 (Г. 約翰引用梅耶尔的理論作为原始資料) 相比，並沒有任何新的論点。但是他提出了按實驗所确定的各点去求熔件的整根保护特性曲綫及其極限电流的近似圖解法。如果这些点子是在相当大的过载电流倍数下求得的，那么在繪制曲綫时就可以大大的节省時間。但是仔細研究上述的方法以后可以看出，这个方法在求極限电流时造成相当大的誤差。

所以，以計算方式来确定熔件的燒断時間为过载电流函数的方法，当过载电流对極限电流(或額定电流)的倍数不大时，由于熱平衡的算式極端复杂，并由于技术文献中所提出的簡化公式不够准确，实际上是不能采用的。

只有在大的过载电流倍数下，熔件的燒断時間才可以用計算方式从便于实用的公式中求得。

埃德勒、舒斯脫、雅謝和其他作者所提出的公式的缺点，是在导出这些公式时既不考虑到花在熔化热上的必需時間，又不考虑到熔件燒断时所造成的电弧的熄灭時間。此外，这些公式对判断两个串接的熔断器能否保証保护选择性这一点，沒有提出論据。

因此目前的主要研究任务是在于获得一个公式，它不仅确定熔件切断电流回路的全部時間，而且还可以确定串接的熔断器是否保証保护选择性。

以后的文中將采用下列的定义和符号：

a) 熔断器的**额定电流**是标明在熔断器上的电流值，它等于规定装在这个熔断器中的各个熔件的额定电流中的最大值。

b) 熔件的**极限电流** I_{∞} 是长期（实际上在试验时取 1 或 2 小时）通过熔件而不致烧断的最大电流。

б) 熔件的**额定电流** I_n 是熔件应该长期工作的电流（由制造厂规定）。熔件的额定电流是以试验结果为依据，通过校验的方式来确定的。

г) 熔件的**保护特性曲线**或“时间-电流”特性曲线是表示切断电流的全部时间（熔件从额定电流负载下的温度热到熔件材料的熔化温度所需的时间加上熔件的烧断时间与电弧的燃烧时间）与通过熔件的电流 I 对熔件额定电流 I_n 比率间关系的特性曲线，亦即 $t = f\left(\frac{I}{I_n}\right)$ 的特性曲线。

д) 熔件的**热平衡方程**是一等式，其左边表示通过熔件的电流 I 在时间 t 内在熔件中产生的热量，右边则表示在时间 t 内熔件向触头和周围介质中的散热量以及用来使熔件温度升高和花在熔件烧断时熔化热上的热量。

大家知道，当电流通过熔断器的熔件时，必然同时会有热产生，热量可按焦耳-楞次定律确定。

在正常情况下，此热以下列方式散到周围介质中：

1) 辐射；

2) 对流；

3) 传导（主要是通过触头传导，只有很少一部份热传导到周围介质中去）。

如果熔件中产生的热超过散到周围介质中的热时，多余的这部份热或者将使熔件的温度升高，一直升高到在新的温

度下重新得到热的平衡为止，或者將使熔件燒断。

当电流通过熔件时，熔件的热平衡的各个分量的特点，可以用工程师 M. H. 依万宁柯夫在 1933 年研究所得的資料来闡明。

熔件向周圍介質中的热輻射与熔件的表面积、熔件与周圍介質的绝对溫度差的四次幂以及輻射系数成正比。輻射系数与熔件材料、表面和溫度有关。这一分量的数值随着熔件溫度的升高而增加得非常快，在高溫下，它超过了所有其他散热方式的分量。

对于熔化溫度低的熔件(鋅熔件或鉛熔件)以及帶填料的封閉管式熔断器或者熔件裝在密封壳中的管式熔断器的熔件，热輻射的数值可以忽略不計而不致引起显著的誤差。

以对流方式向周圍介質的放热与熔件的表面积、熔件溫度与周圍空气溫度差的一次方幂及放热系数成正比。放热系数視熔件的形狀、表面狀況、溫度和周圍空气的流动速度而定，它的变动范围很大。

当开啓式熔断器的銅綫熔件的直徑很小时，放热系数是非常大的，因而以对流方式的放热一般要超过其他方式的放热。

通过熔断器触头的热傳导取决于触头的結構、材料和冷却条件以及熔件的截面、長度、导热性及其冷却条件。导热系数可以近似地当作正比于熔件中心溫度与触头溫度的一次方差、熔件截面以及导热系数(导热系数与熔件材料有关)，而反比于熔件長度。当熔件是由銀、銅或鋁制成而長度很短时，导热系数可能是比較大的。

以傳导方式向周圍介質的导热对于开啓的熔件所起的作用不大，因为这种熔件的大部份热是由輻射和对流放出

的。对带有固体填料的封闭式熔断器的熔件来说，这一方式和对流放热仅在熔断器的保险管的表面发生，而从熔件表面向保险管表面的放热以及从保险管表面向周围介质的局部放热是由传导方式传递的。导热系数取决于熔件温度与保险管温度的一次方差、熔件与保险管的直径比、熔件长度和填料的导热系数。

在不稳定的工作状态下，当负载电流增大时，熔件中产生的一部份热还用来加热熔件，而当热到超过材料的熔化温度时，则尚有一部份热花在熔化热上。

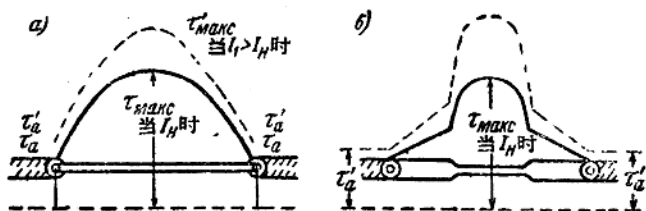
当电流不大时，花在升高熔件温度上的热是不多的，但是在大的过载电流倍数，例如在短路电流下，这个热与熔化热是应该列入计算中的唯一因素，而所有其余的热平衡分量则可忽略不计。

花在升高熔件温度上的热量，与熔件的质量(重量)、在所研究时间内熔件的最后温度与开始温度之差以及熔件材料的热容量成正比。熔件的全部熔化热等于其质量(重量)乘以熔件材料的熔化热比。

由于受到电流加热的结果，熔件的温度升高，但是对熔件的不同部份而言，温度的升高并不是一致的。

图1表示沿不一样构造的熔件全长的温度分佈情况。当熔件截面一定时，温度的分佈按照抛物线的形状(图1, a)，而当熔件截面不一样时，温度的分佈则按照比较复杂的曲线形状(图1, b)；而在这两种情况下，最高温度都发生在熔件的中間。对于构造比较复杂的熔件，在它的温度分佈曲线上(图1, b)有着两个最高温度点。

显然，随着通过熔件的电流的增大，熔件的温度将升高，而曲线亦将作相应的变动(如虚线所示)；这种情况一直



繼續到曲綫上最高点的溫度達到熔件材料的熔化溫度時為止。

上面已經說過，所有有關熔斷器理論作品的依據是在於解出熔件的最熱元件的熱平衡微分方程，以及根據

這個方程確定熔件熱到熔化溫度所需的時間與通過熔件的電流間的關係。

一般說來，此微分方程可以寫成

$$AI^2 dt = Bdr + Cdt, \quad (1)$$

式中係數 A 、 B 、 C 與所研究的熔件元件的溫度有着複雜的關係^①。

方程的左邊是熔件元件在時間 dt 內所產生的熱量，右邊則是此熱量的分配，其第一項表示花在升高元件溫度上的一部份熱量，第二項則表示在時間 dt 內從元件中散出去的一部份熱量。係數 B 和 C 與溫度的關係取決於熔斷器和熔件的構造以及許多其他的因素，這個關係極為複雜，只有在某

① 熔件的热平衡方程的分析是由作者和工程師 M. A. 加夫里洛夫 共同提出的（見 M. A. 加夫里洛夫在第一屆蘇聯城市電網技術會議上的報告，ВНТОЗ，會議年刊，第三分冊，1948 年）。

些最简单的特殊情况下，方才可以用算式来表示，但这也只是近似的。

例如，以开启式熔断器的均匀截面的熔件这样一个比较简单的情况而言，方程(1)可以展开成下列的形式：

$$\frac{A\rho_0(1+\alpha\tau)\cdot I^2 dt}{d^2} = Bd^2(1+\beta\tau)\cdot d\tau + C_1 d(\tau - \tau_0)^m \cdot dt \\ + C_2 d(\tau^4 - \tau_0^4) \cdot dt + C_3 d^2 \frac{d^2 \tau}{dt^2} \cdot dt. \quad (2)$$

式中 τ ——熔件的最热元件的温度；

τ_0 ——周围空气温度；

d ——确定熔件截面和周长的线性尺寸，例如圆截面时的直径；

l ——熔件长度。

甚至对这样一个最简单情况的方程，也只有引用了前面所说的一系列简化后才能解出。当电流为熔件额定电流的许多倍时（实际上当 $\frac{I}{I_n} \geq 3.5-4$ 时），也就是在短路电流 I_k 的情况下，可以认为熔件的任何元件中所产生的热只是花在升高此元件的温度上。在这种情况下，方程(2)可简化为：

$$AI_k^2 dt = Bd\tau, \quad (3)$$

或者展开成：

$$0.24I_k^2 \rho_0(1+\alpha\tau) \frac{l}{s} \cdot dt = sl\gamma c d\tau, \quad (4)$$

由此

$$\int_{t=0}^{t=t'} \frac{0.24\rho_0 I_k^2}{\gamma c s^2} dt = \int_{\tau=\tau_0}^{\tau=\tau_s} \frac{d\tau}{1+\alpha\tau},$$

式中 t' ——在电流 I_k 时，将熔件热到熔化温度 τ_s 所需的时间。

$$t' = A' \cdot \frac{s^2}{I_k^2}, \quad (5)$$

式中

$$A' = \frac{c\gamma}{\alpha \cdot 0.24\rho_0} \cdot \ln \frac{1 + \alpha\tau_s}{1 + \alpha\tau_a}.$$

各种金属的 A' 值

表 1

熔件金属	比重 γ	电阻的温度系数 α	比电阻 ρ_0	在下列温度时的热容量		温 度		A'
				τ_a	τ_s	τ_s	τ_a	
铜	8.9	0.0045	0.0153	0.095	0.118	1083	100	80 000
银	10.5	0.0040	0.0147	0.050	0.076	961	100	62 000
锌	7.1	0.0039	0.06	0.098	0.110	419	75	9000
铅	11.3	0.00411	0.21	0.031	0.034	327	50	1200

金属达到熔化温度时开始变为液态，在熔化过程中熔件的温度保持不变并且等于 τ_s 。所产生的热全部消耗于熔化过程。在截面不变的熔件长度为 l 的一段上：

$$AI_k^2 dt = 0.24 I_k^2 \rho_{nA} \frac{l}{s} \cdot dt,$$

式中 ρ_{nA} ——金属在熔化过程中的电阻比，它从开始值 ρ_1 变到最后值 ρ_2 。中间值 ρ_{nA} 取决于液态金属与固态金属的体积比和它们在电路中的布置。如果假定熔件的基本段的熔化过程是从某一截面开始而后扩展到全段，那么可以认为沿熔件的电路上顺次布置着液态和固态金属，因此电阻比的中间值是由下列电阻比的和所组成

$$\rho_{nA} = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1) \frac{l_2}{l},$$

式中 l_2 ——熔件基本段的熔化部份的长度； l ——熔件基本

段的全長。

为了确定熔件金屬热到熔化溫度后从固态轉变到液态的时间 t'' ，必須取

$$0.24 I_k^2 \frac{l}{s} \left[\rho_1 + (\rho_2 - \rho_1) \cdot \frac{l_2}{l} \right] dt = \gamma L_c s dl_2, \quad (6)$$

式中 L_c —— 熔件金屬的比熔化热，

$$\int_0^{t''} dt = \int_0^l \frac{\gamma L_c s^2}{0.24 I_k^2 l} \cdot \frac{dl_2}{\left[\rho_1 + (\rho_2 - \rho_1) \frac{l_2}{l} \right]}, \quad (7)$$

由此

$$t'' = A'' \frac{s^2}{I_k^2}, \quad (8)$$

式中

$$A'' = \frac{\gamma L_c}{0.24 (\rho_2 - \rho_1)} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

各种金屬的 A'' 值

表 2

熔件金屬	熔化热 L_c	在熔化溫度时的比电阻		A''
		在固态下 ρ_1	在液态下 ρ_2	
銅	43	0.084	0.204	11 600
銀	21	0.071	0.150	8000
鋅	28	0.160	0.353	3000
鉛	6.3	0.490	0.945	400

除了時間 t' 与 t'' 以外，为了完全切断电路，尚需某一時間 t''' 对熔化后的熔件作补充加热，在時間 t''' 內金屬电路断开，电弧發生并随即熄灭(圖 2)。

对开啓式熔断器而言，時間 t''' 較封閉式熔断器为短；

不但如此，并且从許多实验中可見，并不需要将整个熔件完全都从固态变成液态，而只要熔化熔件的一部份已經足够，由于在高温 τ_s 下發生的机械作用的结果，电路便被断开。因

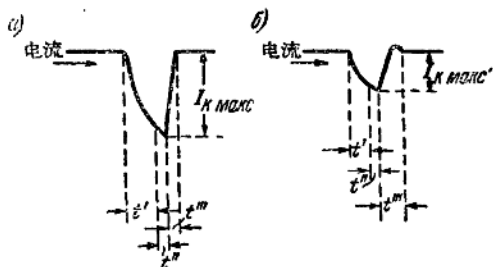


圖 2 用开啓式熔断器(a)和帶填料的封閉式熔断器
(b)切断短路电流的波形圖

此，如果对帶填料的封閉式熔断器的熔件而言，熔断器切断电流回路的全部時間可以由下式确定

$$t = t' + t'' + t''' = (A' + A'') \cdot \frac{s^2}{I_K^2} + t''' = (A' + A'') \cdot \frac{s^2}{I_K^2} k_3, \quad (9)$$

那么对开啓式熔断器以及不帶填料的封閉式熔断器，例如 ПП-1 的熔件而言，

$$t = t' + t'' + t''' = \left(A' + \frac{A''}{n} \right) \cdot \frac{s^2}{I_K^2} k_0. \quad (10)$$

將試驗資料分析的結果，公式(9)和(10)中的計算系数值可确定为：

$$k_3 = 1.7 - 2.0; k_0 = 1.2 - 1.3; n = 3.$$

所以，根据以上的見解，可以用下面所說的方法来計算电气装置中的熔断器的保护選擇性。

如果熔断器 1 裝在靠近电源的地方，而熔断器 2 裝在靠近用电設備的地方，那么在檢驗熔断器 1 的选择性时，必須使熔断器 2 切断电流回路的全部時間小于熔断器 1 的熔件热到熔化溫度的時間，因为只有在這種情況下，当熔断器 2 的熔件燒断以后，熔断器 1 的熔件还不致有任何的永久变形。因此可以从下列不等式着手檢驗：

$$t_1' > (t_2' + t_2'' + t_2'''),$$

当熔断器 2 是封閉式时

$$A_1' \frac{s_1^2}{I_{2\kappa}^2} > (A_2' + A_2'') \cdot k_3 \frac{s_2^2}{I_{2\kappa}^2}, \quad (11)$$

而当熔断器 2 是开啓式时

$$A_1' \frac{s_1^2}{I_{2\kappa}^2} > \left(A_2' + \frac{A_2''}{n} \right) \cdot k_0 \frac{s_2^2}{I_{2\kappa}^2}. \quad (12)$$

由此可知当熔断器 2 是封閉式时，在保証短路时的保护选择性的条件下，它的熔件截面与前面一个熔断器的熔件截面比必須为：

$$\frac{s_1}{s_2} > \sqrt{\frac{A_2' + A_2''}{A_1'} \cdot k_3}, \quad (13)$$

而当熔断器 2 是开啓式时，

$$\frac{s_1}{s_2} > \sqrt{\frac{A_2' + \frac{A_2''}{n}}{A_1'} \cdot k_0}. \quad (14)$$

必須注意，仅在計算数据与按波形圖近似确定的時間 $t' + t''$ 相差不远时，才可取数值 $n=3$ 。这时的可能誤差实际上可以說是沒有，因为在选择裕度系数 k_0 的大小时，此誤差已被修正。

將各种金屬所制熔件的 A' 与 A'' 值以及上面所述的 n 、

k_0 和 k_s 值代入，可以求得保证保护选择性的比值 $\frac{s_1}{s_2} = a$ ，熔断器 1 和 2 的熔件可以用任何金属制成，而且熔断器 2 可以是任何型式(熔断器 1 的型式不论)。表 3 给出这些数据。

表 3

保证保护选择性的熔断器 1 和 2 的熔件截面比

$$\left(a = \frac{s_1}{s_2} \right)$$

熔断器 1 的熔件 金属 (熔断器 1 的型式不论)	熔断器 2 的熔件金属							
	铜	银	锌	铅	铜	银	锌	铅
	熔断器 2 为带填料的封闭式				熔断器 2 为开启式或不带填料的封闭式			
铜	1.55	1.33	0.55	0.2	1.15	1.03	0.4	0.15
银	1.72	1.55	0.62	0.23	1.33	1.15	0.46	0.17
锌	4.5	3.95	1.65	0.6	3.5	3.06	1.2	0.44
铅	12.4	10.8	4.5	1.65	9.5	8.4	3.3	1.2

如果按照给定的条件，数值 $a = \frac{s_1}{s_2}$ 等于或大于表 3 中所列的数值，那末保护选择性是得到保证的。

当 t 超过 0.01 秒时，公式(9)和(10)以及不等式(13)和(14)是完全正确的。当熔断器切断电流回路的全部时间较小时(限流熔断器)，在交流的情况下，时间 t' 和时间 t'' 内的 I_K 值不等，因此 $\frac{1}{I_K^2}$ 不能括出括弧之外。由于在方程(9)和(10)中取短路电流的有效值 $I_K = \frac{I_{K \max}}{\sqrt{2}}$ 作为计算数据，所以必须确定在简化的计算中采用短路电流的平均有效值 $\frac{I_{K \max}}{\sqrt{2}}$ 代替实际值时所引起的误差。

如果時間 t' 加 t'' 小于短路电流的最初半週期, 則在 t' 和 t'' 內的短路电流的均方根值可从下式求得:

$$I_k^2 r \frac{T}{m} = \int_0^{\frac{T}{m}} i^2 r dt, \quad (15)$$

式中 $\frac{T}{m}$ —— 电流週期 T 的所研究部份;
 r —— 熔件电阻。

方程(15)的左边和右边的电阻 r 可以采用同一数值, 因而方程兩边的 r 可以約去。

在所研究的时间內, 这两个电阻应该从同一的、相当于熔件額定温度下的开始值变到同一的、相当于熔件熔化温度下的最后值。为了証实方程(15)中兩边的 r 是容許約去的, 必須先說明一下在交流和在等值热效应的直流这两种情况下的比电阻的变化特性。

在直流时

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{\frac{i^2 t}{a}}; i = \text{常数}.$$

在交流时

$$\begin{aligned} i &= i_{\text{max}} \left[e^{-\frac{Rt}{L}} + \sin \left(\frac{2\pi t}{T} + \alpha \right) \right]; \\ \left(\frac{i}{i_{\text{max}}} \right)^2 &= e^{-\frac{2Rt}{L}} + 2e^{-\frac{Rt}{L}} \cdot \sin \left(2\pi \frac{t}{T} + \alpha \right) \\ &\quad + \sin^2 \left(2\pi \frac{t}{T} + \alpha \right). \end{aligned}$$

像后面所举的例子中一样, 取 $\alpha = \frac{3}{2}\pi$, 对于時間 $\frac{T}{8}$ 的各种分值, 可得如表 4 所示的数值。

在交流和等效直流下 ρ/ρ_0 的比較

表 4

用週期 T 的分值表示的 t'	在等效直流下的 ρ/ρ_0	在交流下的 ρ/ρ_0
0	1.0	1.0
0.02 T	1.27	1.23
0.06 T	1.96	1.92
0.10 T	2.98	3.03
0.125 T	3.74	3.74

在週期的最初 $\frac{T}{8}$ 开始时, 直流电流大于交流电流, 而熔件电阻比的增高显然比在交流下来得快, 但是当交流电流变为大于直流电流时, 在交流下的电阻比的增高就开始比在直流下来得快了。圖 3 略帶夸張地表示以上所述的情况。

因而, 方程(15)的右边和左边的电阻 $r=r_0(1+\alpha r)$ 相等的简化假设是容許的。

从方程(15)可得下式:

$$I'_k = \sqrt{\frac{m'}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{m'}} i^2 dt}$$

$$= I_{k \text{ макс}} \sqrt{\frac{m'}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{m'}} \left[e^{-\frac{t'R}{L}} + \sin\left(-\frac{2\pi t'}{T} + \alpha\right) \right]^2 dt}, \quad (15a)$$

相应地

$$I''_k = I_{k \text{ макс}} \sqrt{\frac{m''}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{m''}} \left[e^{-\frac{t''R}{L}} + \sin\left(-\frac{2\pi t''}{T} + \alpha\right) \right]^2 dt}. \quad (16)$$