

Ueber den sogenannten Fleischl-Effect.

Von

J. L. Hoorweg in Utrecht.

(Mit 1 Textfigur.)

1. Im Jahre 1894 habe ich im Deutschen Archiv für klinische Medicin¹⁾ eine Arbeit veröffentlicht, die eine Erklärung enthält des von Gärtner²⁾ gefundenen merkwürdigen Verhaltens des menschlichen Körpers Inductionsströmen gegenüber. Gärtner verband die secundäre Kette eines gewöhnlichen Inductionsapparates mit einem empfindlichen Spiegelgalvanometer und beobachtete die Ausschläge und Ablenkungen dieses Instrumentes, das eine Mal bei Einschaltung des menschlichen Körpers, das andere Mal bei Einschaltung eines Rheostaten. Im letzten Falle war immer der Ausschlag für den Oeffnungsschlag dem des Schliessungsschlages gleich, und verharrten bei spielendem Hammer die Spiegel des Galvanometers genau in der Nulllage; im ersten Falle dagegen waren die Ausschläge für die Oeffnungsschläge immer grösser als die für die Schliessung, und entstand bei spielendem Hammer eine starke Ablenkung im Sinne der Oeffnungsschläge:

Tabelle Gärtner's (l. c. S. 515).

Applicationsstelle der Elektroden	Ausschlag bei Schliessung	Ausschlag bei Oeffnung
Vorderarm	2	28
Schläfe.	40	90
Hals	30	95
Patella	10	44
An der Stelle des Menschen ein Graphit-Widerstand	18	18

1) Bd. 52 S. 541.

2) Med. Jahrb. Wien 1888.

Bei Wiederholung und näherer Untersuchung dieses Versuches entdeckte ich bald, dass es viele nicht lebendige Substanzen gibt, die dieselbe Erscheinung zeigen. Man kann die Gärtner'sche Erscheinung auch an jedem Zersetzungsapparate, am Engelmanschen Kohle-Rheostat, an jedem losen Contact und recht schön bei einem Kohlrausch'schen Condensator, in welchen man zwischen den beiden Collectorplatten einen Tropfen Wasser fallen gelassen hat, kurz an jedem Körper, in welchem die gewöhnliche Leitung des elektrischen Stromes von einer condensirenden Wirkung begleitet ist, beobachten.

Eine meiner Tabellen enthält folgende Angaben ¹⁾:

Elektroden auf:	Ausschlag bei Schliessung	Ausschlag bei Oeffnung	Ablenkung bei spielendem Stamme
Durchnetztem Papier . .	5	8	12
Engelmann-Rheostat .	8	10	40

Und was ist auch natürlicher, als dass ein Condensator von den höher gespannten Oeffnungsströmen eine stärkere Ladung bekommt als von den Schliessungsströmen von niedrigerer Spannung.

Denn gleichwie ein Condensator von einer Batterie von 50 Elementen eine grössere Quantität Electricität ansammeln wird als von einer von 10 Elementen, so muss auch ein dergleicher Körper von den hochgespannten Oeffnungsströmen eine grössere Electricitätsmenge anhäufen als von den schwächeren Schliessungsströmen. Wie im Anhang I bewiesen wird, ist bei Einschaltung eines gewöhnlichen Widerstandes die durch einen Schlag in Bewegung gesetzte Electricitätsmenge (Q)

$$Q = \frac{MI_p}{R},$$

wo: M der gegenseitige Inductionscoefficient der beiden Rollen,
 I_p die Intensität des primären Stromes
 und R der Widerstand der secundären Kette.

Diese Menge ist also für beide Arten der Inductionsströme dieselbe.

1) l. c. S. 544.

Aber bei Anwendung eines Leiters, der zugleich eine condensirende Wirkung besitzt, findet man:

$$Q = \frac{MI_p}{R} \left\{ 1 - \frac{CR^2}{L - \frac{R}{v}} \right\},$$

in welcher M , I_p und R dieselbe Bedeutung haben wie oben.

L der Selbstinductionscoëfficient der secundären Kette,

C die Capacität des Leiters,

während v die Geschwindigkeit darstellt, mit welcher der primäre Strom von Null bis auf seinen constanten Werth I_p ansteigt oder auch vom Werthe I_p bis auf Null herabsinkt.

v ist bei der Oeffnung viel grösser als bei der Schliessung, und desshalb muss Q bei der Oeffnung immer grösser als bei der Schliessung sein.

Aus dieser Berechnung geht hervor, dass die condensatorische Wirkung des menschlichen Körpers eine völlig befriedigende Erklärung der von Gärtner gefundenen Erscheinungen liefert. Zugleich ist diese Theorie die einzige, welche die schnelle scheinbare Aenderung des Widerstandes erklärt, durch welche allein die starke Ablenkung bei spielendem Hammer verursacht werden kann. Später bemerkte ich, dass schon 1878 Herr v. Fleischl dieselbe Erscheinung am ausgeschnittenen Nerven beobachtet hatte¹⁾. Wenn man die abwechselnd gerichteten Schläge eines Schlittenapparates bei spielendem Hammer mittelst unpolarisirbarer Elektroden durch einen Nerven und gleichzeitig durch einen empfindlichen Galvanometer leitet, so zeigt das letztere Instrument eine beträchtliche dauernde Ablenkung im Sinne der Oeffnungsschläge. Auch ist der Ausschlag für einen einzelnen Inductionsschlag bei der Oeffnung immer grösser als bei der Schliessung, wie aus folgender Tabelle erhellt:

Tabelle v. Fleischl²⁾.

Elektroden in symmetrischen Punkten des Nerven	Ausschlag bei Schliessung	Ausschlag bei Oeffnung
Prim. Strom +	— 69	+ 126
„ „ +	— 87	+ 130
„ „ —	+ 93	— 141
„ „ —	+ 92	— 145

1) Sitzungsber. der Wiener Akademie, math.-naturw. Classe 1878 S. 159.

2) l. c. S. 170.

Hier haben wir es also ganz mit derselben Erscheinung zu thun, und weil die Beobachtung des Herrn v. Fleischl der Gärtner'schen viele Jahre vorangeht, so ist es richtig, diese Erscheinung forthin den Fleischl-Effect zu nennen, wie es auch Herr Cremer in seiner betreffenden Abhandlung¹⁾ gethan hat.

Für die reine Fleischl'sche Erscheinung beanspruche ich aber ganz dieselbe Erklärung wie für die Gärtner'sche.

Jeder Nerv bildet mit seinen Elektroden eine Art Condensator, gerade wie jeder Zersetzungsapparat, und deshalb muss auch der Nerv die Ausschläge der Schliessungsströme kleiner machen als die der Oeffnungsströme. Zwar fand v. Fleischl²⁾, dass bei spielendem Hammer das Scalabild in der Ruhestelle verharrte, falls die beiden unpolarisirbaren Pinselektroden in ein Gefäss tauchten, welches mit $\frac{3}{4}\%$ Kochsalzlösung gefüllt war, oder wenn der Raum zwischen den Pinseln durch einen Streifen durchtränkten Fliesspapiers oder durch ein Stück nassen Zwirnfadens überbrückt war, aber dies negative Resultat schreibe ich der äusserst schwachen Intensität der angewendeten Inductionsströme zu³⁾, denn ich selbst habe in dergleichen Fällen recht deutliche Ablenkungen erhalten⁴⁾, und Herr Cremer⁵⁾ fand, dass eine mit Zinksulfatlösung gefüllte Glascapillare zwischen unpolarisirbaren Elektroden einen typischen Fleischl-Effect gab.

Es kann also nicht geleugnet werden, dass der Fleischl-Effect bei jedem Zersetzungsapparate mehr oder minder vorkommt.

Auch wissen wir durch die Untersuchungen von Kohlrausch, Warburg, Wien u. A., dass die Polarisation dieser Apparate durch Wechselströme ganz den Charakter einer condensirenden Wirkung zeigt; man kann selbst die Polarisations-Capacität dieser Apparate experimentell bestimmen. Es zeigt sich weiter, dass diese Capacität gerade das Umgekehrte der von Hermann schon lange angewendeten Polarisationsconstante (h) vorstellt, dass also $C = \frac{1}{h}$, und weil Hermann auch schon lange die innere Polarisation

1) Sitzungsber. der Gesellsch. f. Morphol. u. Physiol. in München 1903.

2) l. c. S. 16.

3) v. Fleischl (l. c. S. 161) nennt schon die Intensität der inducirten Ströme eine mässige, wenn sie auf der Zunge noch kein schmerzhaftes Gefühl erregten.

4) l. c. S. 547.

5) l. c. S. 9.

der Nerven nachgewiesen hat, so besteht aller Grund, auch für den rein Fleischl-Effect dieselbe Erklärung anzunehmen, welche ich für die am lebendigen Menschen beobachtete Erscheinung gegeben habe.

Zugleich wird es deutlich, dass, als v. Fleischl¹⁾ die Ursache der Erscheinung in der Polarisation der Nerven suchte, dieser Forscher nicht weit von der Wahrheit entfernt war.

2. Die condensatorische Wirkung des menschlichen Körpers, welche ich zum ersten Male nur aus obigen theoretischen Gründen postulirt hatte, hat sich später in vielerlei Gestalt offenbart, in der Weise, dass heutzutage wohl Niemand mehr diese condensirende Wirkung leugnen wird.

Erstens hat man beobachtet, dass beim Franklinisiren einer isolirten Person die Funken der Elektrisirmaschine einen viel stärkeren Knall haben und einander nicht so schnell folgen als ohne die Einschaltung des menschlichen Körpers. Zweitens habe ich oft beobachtet, dass, wenn man mit zwei Personen, die einander die Hand geben, den Gärtner'schen Versuch anstellt, die Ausschläge grösser ausfallen als mit einer einzigen Person, obgleich der Gesamtwiderstand im ersten Falle viel grösser ist als im zweiten. Drittens hat Wertheim Salomonson²⁾ entdeckt, dass, wenn man mit dem Oudin'schen Resonator eine Kette von 4 oder 6 Personen einschaltet und ein Hitzdrahtampèrometer successive in verschiedene Punkte dieser Kette bringt, man immer findet, dass der Strom um so schwächer ist, je weiter man sich von der Stromquelle entfernt. Eine Kette menschlicher Körper verhält sich also in dieser Hinsicht genau wie ein unterseeisches Kabel, wie ich schon 1894 in folgenden Worten aussprach: „Wir dürfen aber den menschlichen Körper nicht mit einem gewöhnlichen Condensator vergleichen, welcher die Electricität zwar anzuhäufen, nicht aber fortzuleiten vermag. Viel eher ist der menschliche Körper einem unterseeischen Kabel ähnlich, welches durch seine Construction eine ziemlich grosse Capacität besitzt, alle Ströme aber doch nach der anderen Seite hinüberführt.“

Auch Dubois in Bern hat bei seinen Versuchen mit fallenden Kugeln die condensirende Wirkung des menschlichen Körpers zurückgefunden. Dieser Forscher war selbst der Erste, der diese Capacität

1) l. c. S. 164, 3.

2) Pflüger's Archiv Bd. 85 S. 524. 1901.

zu messen versuchte. Dubois fand 0,15 M.-F. Später habe ich selber bei meinen Condensatorversuchen die Capacität des menschlichen Körpers auf ungefähr 0,004 M.-F. bestimmt. Bordier fand später 0,0025 M.-F. und de Metz 0,0011 M.-F., während Wertheim Salomonson durch eine Reihe genauer Versuche auch nicht mehr als 0,002 M.-F. fand. Die Dubois'sche Zahl ist also wohl zu hoch.

Jedenfalls ist aber durch diese Versuche verschiedener Forscher die condensirende Wirkung des menschlichen Körpers über jeden Zweifel erhaben, und somit hat meine Theorie des Fleischl-Effects hierin eine kräftige Stütze gefunden.

Die einzige Differenz der Gärtner'schen und der Fleischl'schen Erscheinung, ist, dass der menschliche Körper seine condensirende Wirkung hauptsächlich seinem grossen Umfang, der Nerv aber seiner Polarisation verdankt.

3. In der Hoffnung, dass meine Theorie, weil sie alle hierher gehörigen Erscheinungen ohne Schwierigkeit erklärt, auch allgemein angenommen sein würde, bin ich aber sehr getäuscht worden.

Denn in der oben citirten Arbeit des Herrn Max Cremer aus München: „Ueber die Bedeutung der Joule'schen Wärme der Reizströme“ theilt Herr Cremer mit, „dass er meiner Erklärung nicht beipflichten kann und dieselbe vielmehr für direct unrichtig halte“.

Leider gibt Herr Cremer keinen einzigen Grund für diesen vernichtenden Ausspruch, und desshalb wird wohl Niemand es mir verübeln, wenn ich wenigstens vorläufig die Richtigkeit meiner Erklärung vollständig aufrecht halte. Vielleicht auch gelangt Herr Cremer durch die Lectüre dieser Mittheilung zu einer anderen und günstigeren Meinung.

Herr Cremer¹⁾ glaubt, wenigstens zum Theil, in der Joule'schen Wärme eine Erklärung für den Fleischl-Effect zu finden: die nach dem Joule'schen Gesetze in jedem Leiter entwickelte Wärme verringert bekanntlich den Widerstand der Leiter zweiter Classe und also auch des Nerven. Hierdurch wird die Ablenkung des Galvanometers um so grösser, je stärker die Erwärmung, und weil die stärkeren Oeffnungsinductionsströme stärker erwärmen als die viel schwächeren Schliessungsströme, so ist der grössere Ausschlag für die Oeffnungsschläge und somit der ganze Fleischl-Effect mit einem Schläge erklärt. Es ist das Ei des Columbus!

1) l. c. S. 6.

Wenn wir aber die Sache näher betrachten, so erheben sich viele Bedenken und Schwierigkeiten.

1. Die Inductionsströme, welche v. Fleischl angewendete, waren, wie oben bemerkt ist, äusserst schwach. Wie ist es möglich, dass diese äusserst schwachen Ströme in den Nerven so viel Wärme entwickeln können, dass dadurch der ziemlich grosse Widerstand der secundären Kette in genügender Weise geändert wird, den Unterschied der Oeffnungs- und Schliessungsausschläge zu verursachen?

2. Der Nerv ist ein schlechter Leiter der Wärme. Ist es wahrscheinlich, dass bei spielendem Hammer die Temperatur des Nerven in etwa $\frac{1}{30}$ Secunde so schnell steigen und wieder sinken kann, dass dadurch der Widerstand und mit diesem die Intensität der Inductionsströme so viel variirt, als für das Auftreten des Fleischl-Effects nothwendig ist?

Bei seinen Versuchen ¹⁾ mit einem kleinen Nerven-Thermometer spricht Cremer von einer gewissen Trägheit des Instrumentes. Wird diese Trägheit, die gewiss nicht so recht klein gewesen ist, nicht auch bei dem Fleischl-Versuch störend auftreten? Ist es also nicht viel wahrscheinlicher, dass nach einiger Zeit die Temperatur des Nerven gleichmässig erhöht wird und also der Widerstand für beide Arten von Inductionsströmen gleich viel geändert sei?

Wenn man die Erklärung Cremer's rechnerisch verfolgt, so zeigt sich, dass sie ganz und gar unhaltbar ist.

Wie im Anhang II bewiesen ist, ist die Quantität Elektrizität Q , die von einem einzigen Inductionsschlage in Bewegung gesetzt wird, falls man die von der entwickelten Wärme im Nerven verursachte Widerstandsänderung in Rechnung bringt:

$$Q = \frac{I_s \cdot L}{R} + \frac{I_s^3 \cdot L}{mc} \cdot 0,08 \alpha,$$

und nehmen wir mit Einthoven ²⁾ den Widerstand eines gewissen Nerven gleich 140 000 Ohm und dessen Masse gleich 60 mg an, indem wir c gleich 1 setzen und für α nach dem Hilfsbuch der Elektrotechnik von Grawinkel und Strecker 1893, S. 66 2,5 % oder $\frac{1}{40}$ nehmen, so findet man für eine Polspannung der secundären Kette von 100 Volt, dass

$$\frac{0,08 \alpha I_s^3 L}{mc} \text{ nur } \frac{1}{4} \% \text{ von } \frac{I_s L}{R}$$

1) l. c. S. 8.

2) Pflüger's Archiv Bd. 82 S. 125.

beträgt, was bedeutet, dass bei ziemlich starken Inductionsströmen der Einfluss der Joule'schen Wärme nur $\frac{1}{4}$ % des Ausschlages ausmacht, während v. Fleischl für sehr schwache Inductionsströme eine Differenz von 45 % beobachtete. Die Joule'sche Wärme kann also niemals als die Ursache der von v. Fleischl entdeckten Erscheinung betrachtet werden. Nur wenn man, wie Herr Cremer es that, die Intensität der Ströme auf eine solche ausserordentliche Höhe ansteigen lässt¹⁾, dass dadurch der Nerv mit einem Schlage getödtet wird, nur dann lässt sich der genannte Einfluss in stets schneller steigendem Maasse geltend machen. Dann aber muss dieser Einfluss sich auch bei allen Leitern zweiter Classe ohne Ausnahme zeigen, und deshalb beobachtete Herr Cremer auch den genannten Effect bei allerlei thierischen und auch bei Pflanzengewebe²⁾.

Wenn man dann weiter zu gleicher Zeit einen constanten Strom in die secundäre Kette einschaltet, so wird der Galvanometer eine immer anwachsende Ablenkung anzeigen, weil die rasch auf einander folgenden Inductionsströme fortwährend die Temperatur des Leiters erhöhen und somit den Widerstand derselben herabsetzen.

Diese Erscheinung muss sich dann aber ebensogut mit der Helmholtz'schen Nivellireinrichtung als mit der gewöhnlichen Vorrichtung für Inductionsströme zeigen. Je stärker die angewendeten Inductionsströme, je deutlicher ist dann die Erscheinung; dagegen auch, je schwächer diese Ströme, je unsicherer das Resultat, und alsbald wird die Widerstandsänderung durch Erwärmung unbedeutend, und von diesem Augenblicke an zeigt sich nur der rein condensatorische Effect der **nicht nivellirten Ströme**.

Die Versuche auf S. 7 der Cremer'schen Abhandlung können also schwierig eine Bestätigung des Befundes Hermann's genannt werden, denn Hermann arbeitete mit schwachen Strömen, die den Nerven nicht schadeten, und Cremer wendete solche excessiv starken Ströme an, dass die Nerven davon getödtet wurden. Bei letzteren Versuchen ist jede vitale Erklärungsweise von vornherein ausgeschlossen.

1) Herr Cremer wendete primäre Ströme von 6 und mehr Ampère an.

2) l. c. S. 5.

Anhang.

I.

Die genaue Berechnung der Intensität der in einem Schlittenapparat auftretenden inducirten Ströme ist äusserst schwierig und verwickelt¹⁾.

Wenn man aber die schwächeren Einflüsse den stärkeren gegenüber vernachlässigt, so kann man ziemlich leicht annähernde Ausdrücke bekommen, die genügende Genauigkeit besitzen. Man kann dann folgende Differentialgleichung aufstellen:

$$M \frac{di_p}{dt} = i_s R + L \frac{di_s}{dt} \dots \dots \dots (1)$$

in welcher:

i_s die zeitliche Intensität,

R der Widerstand

und L der Selbstinductionscoefficient des secundären Stromes,

i_p die zeitliche Intensität des primären Stromes

und M der gegenseitige Inductionscoefficient der beiden Rollen ist.

Wenn man nun während der Schliessung des primären Stromes setzt:

$$i_p = I_p (1 - e^{-vt}) \dots \dots \dots (2)$$

wo I_p die constante Intensität, auf welcher der primäre Strom heransteigt,

und v die Geschwindigkeit ist, mit welcher dieses Ansteigen vor sich geht, so findet man aus (1) und (2):

$$i_s = \frac{MI_p v}{R - Lv} \left(e^{-vt} - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \dots \dots \dots (3)$$

welche Formel für $t = 0$, $i_s = 0$; für $t = \frac{L}{R - Lv} (\log R - \log Lv)$ einen maximalen Werth für i_s gibt.

$$I_s = \frac{MI_p}{L} \dots \dots \dots (4)$$

indem für $t = \infty$ wieder $i_s = 0$ gefunden wird.

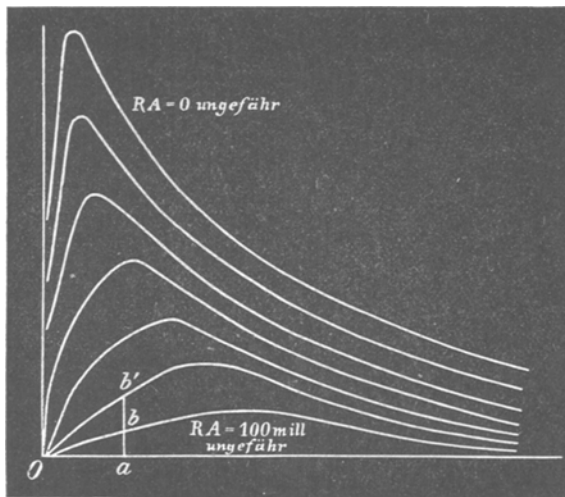
Die secundären Ströme können also in graphischer Weise vorgestellt werden von umstehender, aus Fleming's Werk entnommener Curven.

1) Siehe Fleming, The alternate current Transformer p. 180 u. s. w. London 1892.

Die hierbei in Bewegung gesetzte Elektrizitätsmenge Q ist nun

$$Q = \int_0^{\infty} i_s dt = \frac{M I_p}{R} \dots \dots \dots (5)$$

und ganz dieselbe Quantität liefert auch ein einzelner Oeffnungsschlag, für welche: $i_p = I_p e^{-v't}$ ist; Q ist also unabhängig von v und v' , was bedeutet, dass bei jeder Oeffnung ebensoviel Elektrizität in Bewegung gesetzt wird als bei jeder Schliessung. Wenn aber in der secundären Kette ein Leiter eingeschaltet ist, der zu gleicher



$$L \text{ in } L - CR^2$$

umgeändert, und alsdann ist:

$$Q = \int_0^{\infty} \frac{M I_p v}{R - Lv} \left\{ e^{-vt} - e^{-\frac{Rt}{L - CR^2}} \right\} dt,$$

aus welchem Ausdruck hervorgeht:

$$Q = \frac{M I_p}{R} \left\{ 1 - \frac{CvR^2}{Lv - R} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

Die bei der Oeffnung des primären Stromes in Bewegung gesetzte Elektrizitätsmenge (Q') ist alsdann

$$Q' = \frac{M I_p}{R} \left\{ 1 - \frac{Cv'R^2}{Lv' - R} \right\}$$

und weil bekanntlich v' viel grösser als v , so wird auch in diesem

Fall Q' stets grösser als Q sein. Der Fleischl-Effect ist dann vollständig erklärt.

II.

Will man den Fleischl-Effect aus der Joule'schen Wärme erklären, so muss man beachten, dass, falls i in Ampère, R in Ohm ausgedrückt worden ist, die Joule'sche Wärme beträgt:

$$0,24 i^2 R \text{ Calorien pro Secunde.}$$

Die in dt -Secunden erreichte Temperaturerhöhung ist also

$$\frac{0,24 i^2 R dt}{mc} \text{ Celsiusgrad,}$$

wenn m die Masse,

c die spezifische Wärme des eingeschalteten Nerven ist.

Wenn also ein Widerstand von 1 Ohm durch eine Temperaturerhöhung von 1°C. um α Ohm geändert wird, so ist die Widerstandsänderung:

$$-\frac{0,24 i^2 R^2 \alpha}{mc} dt,$$

und die gewöhnliche einfache Differentialgleichung

$$L \frac{di_s}{dt} + i_s R = 0$$

ändert sich in:

$$L \frac{di_s}{dt} + i_s R - \frac{0,24 i_s^3 R^2 \alpha}{mc}$$

oder setzend:

$$\frac{0,24 \alpha}{mc} = \beta,$$

$$L \frac{di_s}{dt} + i_s R - \beta i_s^3 R^2 = 0 \dots \dots (7)$$

wo L , i_s und R dieselbe Bedeutung haben wie oben.

Die Gleichung (7) kann durch Einführung einer neuen Veränderlichen: $z = i_s^{-2}$ leicht integrirt werden.

Wir finden dann:

$$i_s = \sqrt{\frac{I_s e^{-\frac{R}{L}t}}{1 - \beta R I_s^2 \left(1 - e^{-\frac{2R}{L}t}\right)}}$$

für welchen Ausdruck man annähernd schreiben kann:

$$i_s = I_s e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{\beta R I_s^3}{2} \left(e^{-\frac{R}{L}t} - e^{-\frac{3R}{L}t} \right) \dots (8)$$

Man findet dann weiter:

$$Q = \int_0^\infty i_s dt = \frac{I_s L}{R} + \frac{\beta I_s^3 L}{3} \dots (9)$$