

ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ РАБОТЫ.

Стахановское движение ломает старые взгляды на технику, ломает старые технические нормы, старые проектные мощности, старые производственные планы и требует создания новых, более высоких технических норм, проектных мощностей и производственных планов. Сварочные трансформаторы, работающие исключительно при неустановившемся режиме, не имеют теоретически обоснованного выражения мощности, идущей на покрытие потерь, которые имеют место в самом трансформаторе. Не зная потерь, нельзя расчитать трансформатора, и следовательно, нельзя от него получить другой, более высокой, проектной мощности.

Настоящая работа ставит своей целью заполнить этот пробел.

Мощность, доставляемая трансформатору, работающему вхолостую, расходуется в нем самом на покрытие потерь в меди первичной обмотки и потерь в железе от гистерезиса и токов Фуко. Первые потери обязаны наличию активного сопротивления первичной обмотки. Потери на гистерезис обязаны той работе, которую нужно затратить на циклическое перемагничивание железа. Потери от токов Фуко обязаны тем паразитным токам, которые индуцируются переменным магнитным потоком в листах железа трансформатора.

Рассмотрим каждую составляющую потерю отдельно. С целью упрощения рассмотрим сначала их при работе трансформатора вхолостую. В этом последнем случае намагничение железа трансформатора производится только первичной обмоткой.

МЕДНЫЕ ПОТЕРИ.

Активная составляющая тока холостого хода сравнительно с намагничивающей составляющей настолько мала, что ею можно пренебречь. Следовательно, можно считать, что потери при холостом ходе трансформатора вызываются только намагничивающим током.

Поэтому в нижеследующие формулы для подсчета потерь при холостом ходе будет входить только намагничивающий ток. Зависимость между током и потоком или током и индукцией дается следующими авторами.

1) Bergtold (л. 1):

$$i = C_1 \frac{B}{10^4} + C_2 \left(\frac{B}{10^4} \right)^\gamma \quad (1)$$

Здесь C_1 , C_2 и γ —постоянные, зависящие от сорта листовой стали, B —индукция в гауссах и i —ток в амперах.

2) Ollendorff (л. 2):

$$h = \sinh b \quad (2)$$

Здесь h —напряженность магнитного поля и b —относительная индукция.

Для трансформаторов Ollendorff дает $b = \frac{B}{2590}$.

Здесь B —максимальное значение магнитной индукции в гауссах.

3) Summers (л. 3):

$$h = A_1 \frac{b}{B_m} + A_3 \operatorname{sn} 3 \operatorname{arcsn} \frac{b}{B_m} + A_5 \operatorname{sn} 5 \operatorname{arcsn} \frac{b}{B_m} + \dots \quad (3)$$

Здесь

$$A_1 = H_{B_m} - (-A_3 + A_5 - A_7 + A_9 + \dots),$$

$$A_3 - A_9 = \frac{1}{3} (\gamma_2 - \gamma_4 + \gamma_6),$$

$$A_5 = \frac{1}{5} (\gamma_2 - \gamma_4 + \gamma_6 - \gamma_8 + \gamma_{10}),$$

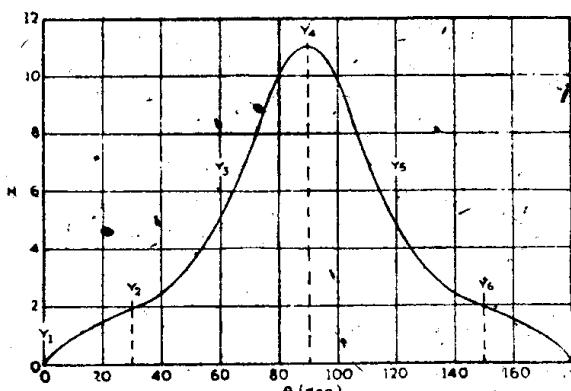
b —мгновенное значение индукции,

B_m —максимальное значение индукции,

H —максимальное значение напряженности поля и

γ —см. на фиг. 1.

О'Пенфорд—более просто выражает зависимость b от h . Поэтому в дальнейшем буду пользоваться этой последней формулой.



Фиг. 1.

При включении трансформатора в момент, когда напряжение не проходит через максимум, ток достигает некоторого максимального значения, после чего затухает до нормальной своей величины. Затухание тока зависит от насыщения железа трансформатора. При больших насыщении, благодаря малому индуктивному сопротивлению, затухание тока происходит довольно быстро (фиг. 2).

Для сравнения на фиг. 3 представлена осцилограмма тока включения у большого, но умеренно насыщенного трансформатора.

Для того, чтобы найти зависимость тока от времени в явном виде, воспользуемся дифференциальным уравнением трансформатора:

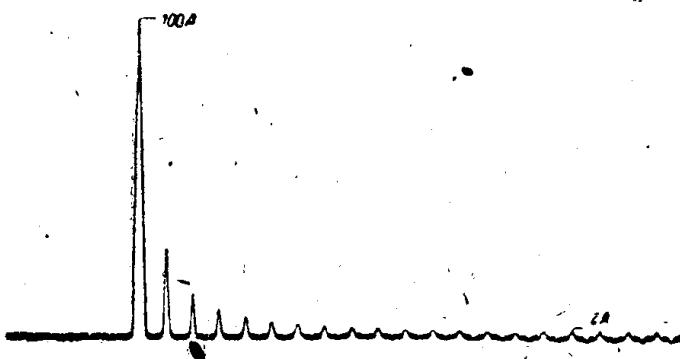
$$W \omega 10^{-8} \frac{d\Phi}{da} + iR = V_m \operatorname{sn} \alpha.$$

Здесь Φ —магнитный поток, $a = \omega t$, i —мгновенное значение тока, R —активное сопротивление, V_m —максимальное значение напряжения, W —число витков, ω —угловая скорость и t —время.

Так как $h \equiv i$, то можем написать:

$$i = i_0 \frac{\operatorname{sn} b}{\operatorname{sn} b_0} \quad (4)$$

Здесь i_0 —мгновенное значение тока холостого хода, b_0 —относительная индукция при холостом ходе



Фиг. 2.

и b —значение относительной индукции при включении.

Подставляя формулу (4) в дифференциальное уравнение трансформатора, получим:

$$\frac{d\Phi}{da} = \frac{10^8}{W_\omega} \left(V_m \operatorname{sn} \alpha - i_0 R \frac{\operatorname{sn} b}{\operatorname{sn} b_0} \right) \quad (5)$$

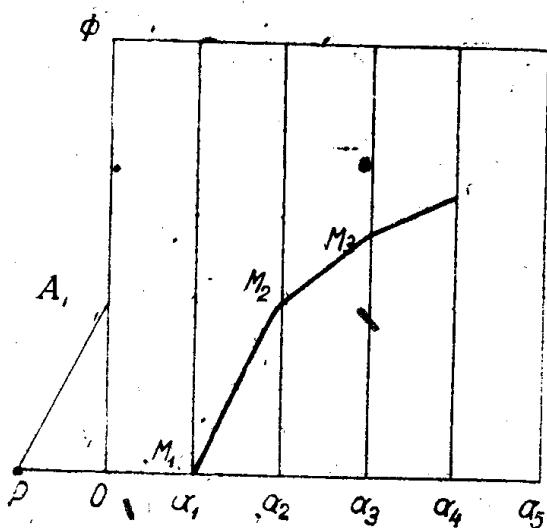
Интегрирование данного дифференциального уравнения может быть произведено только приближенно. Я считаю наиболее простым, дающим достаточно точность, графический метод Эйлера Коши (л. 4), который заключается в следующем. Прямыми, параллельными оси ординат, разбиваем ось абсцисс на k равных частей (фиг. 4) и влево от начала координат откладываем отрезок OP , равный единичному значению. В моем случае OP равен одному радиану. При $\alpha = \alpha_0 = 0$, $\frac{d\Phi_0}{d\alpha_0} = 0$. Подставляя в правую

часть уравнения (4) $\alpha = \alpha_1$, определим величину $\frac{d\Phi_1}{d\alpha_1}$ и отложим на оси ординат отрезок OA_1 , равный $\frac{d_1 \Phi}{d\alpha_1}$. Отрезок PA_1 будет иметь угловой коэффициент,

равный $\frac{d\Phi_1}{d\alpha_1}$ и будет, следовательно, параллелен касательной к кривой в точке M_1 . Из точки M_1 проводим луч, параллельный PA_1 , до пересечения его в точке M_2 с прямой $\alpha = \alpha_2$, параллельной оси $O\Phi$. Поступая аналогично

и для других значений, построим ломаную линию, представляющую приблизительно искомую интегральную кривую. На фиг. 5 представлены кривые $\Phi = f(\alpha)$. Они построены указанным выше способом для трансформатора 50 KVA 50 периодов, 8000/191 вольт, $\Phi = 1.131,10^6$ силовых линий, $B = 12600$ гаусс, $R = 13,5$ ом и $I_0 = 0,2$ А.

Для того, чтобы найти зависимость магнитного потока от времени и наблюдать его изменения, не прибегая к отысканию большого числа точек, можно указанным выше способом построены кривые изменения магнитного потока от времени для следующих данных (фиг. 5): кривые 1, 2 и 3—включение напряжение проходит через нуль, и

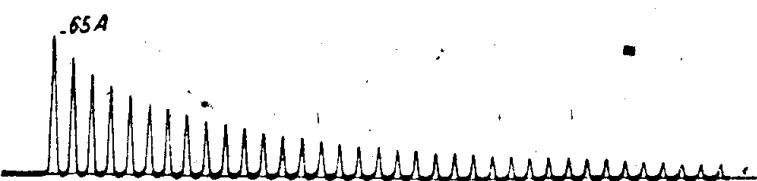


Фиг. 4.

включение происходит в момент, когда напряжение проходит через нуль, и сопротивления первичной обмотки предположены соответственно равными:

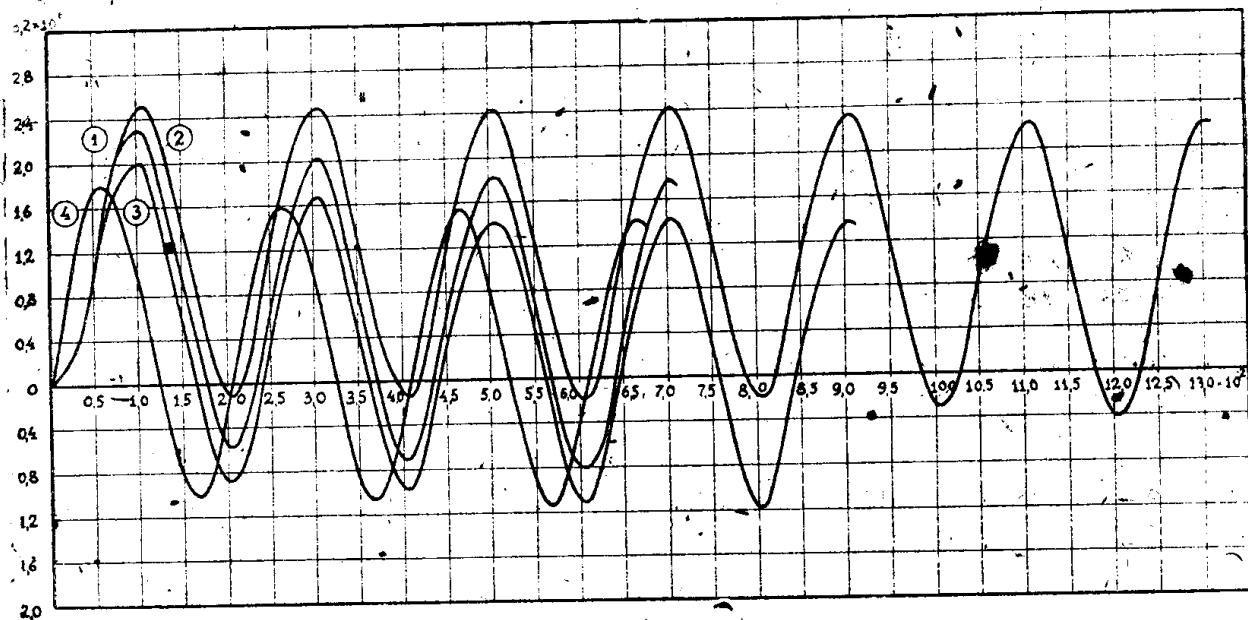
$$R_1 = 13,5; R_2 = 2500 \text{ и } R_3 = 1000 \text{ ом.}$$

Кривая (4) соответствует случаю, когда в момент включения напряжение $V = V_m \operatorname{sn} 67^\circ 30'$, и сопротивление первичной обмотки предположено равным $R_4 = 1000$ ом.



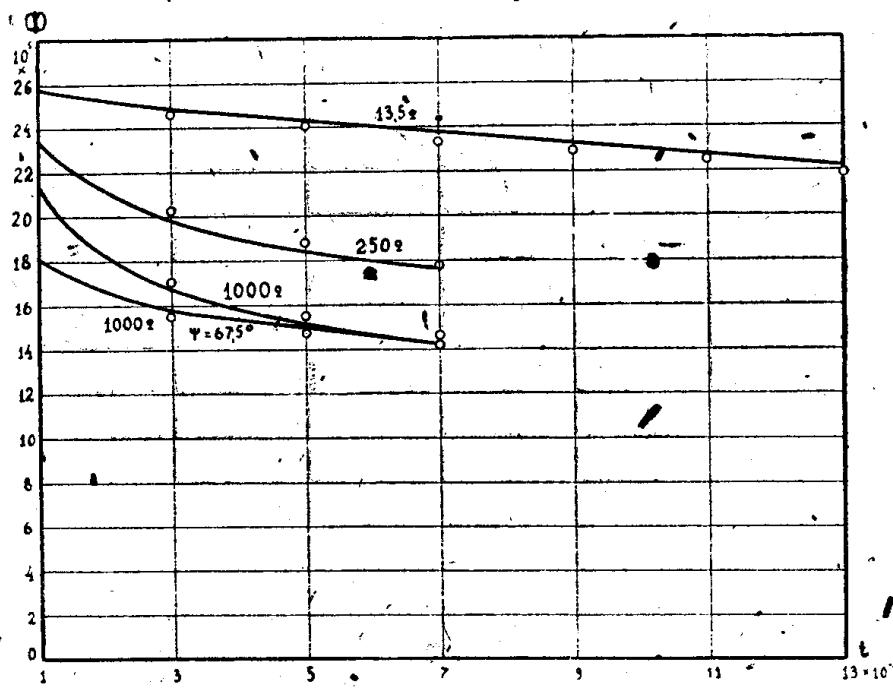
Фиг. 3.

С целью удобства наблюдения для указанных на фиг. 5 случаев, мною вычерчены кривые, проходящие через максимальные значения магнитного



Фиг. 5.

потока (фиг. 6). Результирующий магнитный поток состоит, как известно, из потока установившегося режима и потока переходного режима. Под-



Фиг. 6.

счеты показывают, что поток переходного режима может быть выражен нижеследующей предлагаемой мною формулой:

$$\Phi_n = \Phi_m e^{-1.48 b_0 \sqrt{R} t} \quad (6)$$

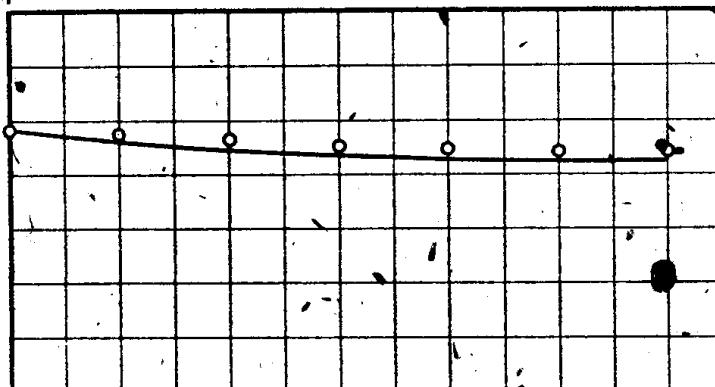
Здесь Φ_n —переходная составляющая магнитного потока, Φ_m —наибольшее значение переходной составляющей магнитного потока, t —время и e —основание натуральных логарифмов. В таком случае, результирующий магнитный поток получится равным (л. 5):

$$\Phi = \Phi_m [-\cos(\alpha + \psi) + \cos \psi e^{-1.48 b_0 \sqrt{R} t}] \quad (7)$$

Здесь Φ_m —максимальное значение установившегося магнитного потока, ψ —определяет мгновенное значение напряжения в момент включения.

Подставляя в эту формулу, соответствующие случаям включения, имеющим место на фиг. 5, значения R , и также b_0 , Φ_m , ψ и t , получим значения магнитного потока, отмеченного на фиг. 6, точками. Мы видим, что поток, найденный графическим методом, весьма мало отличается от магнитного потока, подсчитанного по формуле (7), т. е. предлагаемая мною формула (6) достаточно точно представляет переходную составляющую магнитного потока.

Ф



Фиг. 8.

фиг. 8). Точки выше кривой показывают значение магнитного потока, подсчитанного по формуле (7). На основе проделанных сравнений прихожу к заключению, что формулой (7) вполне можно пользоваться при количественных подсчетах, связанных с неустановившимся режимом работы трансформатора.

Так как $\Phi \equiv b$, то формулу (7) можно преобразовать так:

$$b = b_0 [-\cos(\alpha + \psi) + \cos \psi e^{-1.48 b_0 \sqrt{R} t}]$$

Следовательно, среднее действующее значение тока за время включения

$$I = \frac{I_0}{\sinh b_0} \sqrt{\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \sinh^2 b_0 [-\cos(\alpha + \psi) + \cos \psi e^{-1.48 b_0 \sqrt{R} t}] dt}$$

(Здесь I_0 —действующее значение тока холостого хода)

или заменяя $\sinh [. . .]$,

$$I = \frac{I_0}{\sinh b_0} \sqrt{\frac{1}{2t_1} \int_0^{t_1} \cosh 2b_0 [-\cos(\alpha + \psi) + \cos \psi e^{-1.48 b_0 \sqrt{R} t}] dt - \frac{1}{2t_1} \int_0^{t_1} dt} \quad (8)$$



Фиг. 7.

Для того, чтобы сравнить кривую магнитного потока, найденную по формуле (7), с действительной кривой, мною снята осциллограмма тока включения (фиг. 7) катушки, имеющей активное сопротивление $R=0,7$ ома.

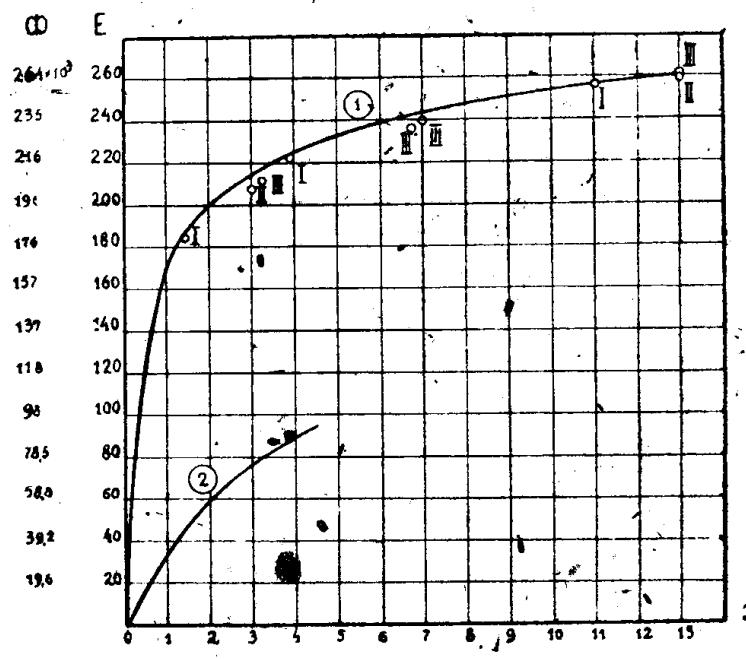
По осциллограмме (фиг. 7) и по кривой намагничения (кривая 2, фиг. 9) мною построена кривая результирующего магнитного потока

Здесь t_1 —время включения, т. е. время от момента включения и до момента выключения.

Этот интеграл можно вычислить только приближенно, например, по формуле Симпсона (л. 6)

$$\int_a^b f(x) dt = \frac{b-a}{3k} [f(x_0) + \varphi f(x_1) + 2f(x_2) + \varphi f(x_3) + \dots + f(x_k)] \quad (9)$$

(Здесь k —число слагаемых, равное четному числу);



Фиг. 9.

или путем следующих преобразований подинтегрального выражения

$$\begin{aligned}
 & \cdot \frac{1}{2t_1} \int_0^{t_1} \cosh 2b_0 [-\cos(\alpha+\psi) + \cos \psi e^{-1.48 b_0 \sqrt{R} t}] dt = \\
 & = \frac{1}{2.2t_1} \int_0^{t_1} e^{2b_0 [-\cos(\alpha+\psi) - \cos \psi e^{-1.48 b_0 \sqrt{R} t}]} dt + \\
 & + \frac{1}{2.2t_1} \int_0^{t_1} e^{-2b_0 [-\cos(\alpha+\psi) - \cos \psi e^{-1.48 b_0 \sqrt{R} t}]} dt = \\
 & = -\frac{1}{4t_1} \int_0^{t_1} -e^{2b_0 \cos(\alpha+\psi)} \cdot e^{2b_0 \cos \psi e^{-1.48 b_0 \sqrt{R} t}} dt + \\
 & + \frac{1}{4t_1} \int_0^{t_1} e^{2b_0 \cos(\alpha+\psi)} \cdot e^{-2b_0 \cos \psi e^{-1.48 b_0 \sqrt{R} t}} dt.
 \end{aligned}$$

Если ввести следующие сокращенные обозначения

$$2b_0 \cos \psi = a; \quad 1.48 b_0 \sqrt{R} = c,$$

то уравнение может быть написано еще и так:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2t_1} \int_0^{t_1} \cosh 2b_0 [-\cos(\alpha + \psi) + \cos \psi e^{-1,48 b_0 \sqrt{R} t}] dt = \\ & = \frac{1}{4t_1} \int_0^{t_1} e^{-2b_0 \cos(\alpha + \psi)} \cdot e^{ae^{-ct}} dt + \frac{1}{4t_1} \int_0^{t_1} e^{2b_0 \cos(\alpha + \psi)} \cdot e^{-ae^{-ct}} dt. \end{aligned}$$

Из теории функций Бесселя (л. 7) известно, что

$$e^{2b_0 \cos(\alpha + \psi)} = J_0(2b_0) + 2J_1(2b_0) \cos(\alpha + \psi) + 2J_2(2b_0) \cos(2\alpha + \psi) + \dots$$

$$e^{-2b_0 \cos(\alpha + \psi)} = J_0(2b_0) - 2J_1(2b_0) \cos(\alpha + \psi) + 2J_2(2b_0) \cos(2\alpha + \psi) - \dots$$

и из теории рядов известно (л. 8), что

$$e^{ae^{-ct}} = 1 + \frac{ae^{-ct}}{1!} + \frac{a^2 e^{-2ct}}{2!} + \frac{a^3 e^{-3ct}}{3!} + \dots$$

$$e^{-ae^{-ct}} = 1 - \frac{ae^{-ct}}{1!} + \frac{a^2 e^{-2ct}}{2!} - \frac{a^3 e^{-3ct}}{3!} + \dots$$

следовательно,

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2t_1} \int_0^{t_1} \cosh 2b_0 [-\cos(\alpha + \psi) + \cos \psi e^{-1,48 b_0 \sqrt{R} t}] dt = \\ & = \frac{1}{4t_1} \int_0^{t_1} [J_0(2b_0) - 2J_1(2b_0) \cos(\alpha + \psi) + \\ & + 2J_2(2b_0) \cos(2\alpha + \psi) + \dots] \left[1 + \frac{ae^{-ct}}{1!} + \frac{a^2 e^{-2ct}}{2!} + \dots \right] dt + \\ & + \frac{1}{4t_1} \int_0^{t_1} \left[J_0(2b_0) + 2J_1(2b_0) \cos(\alpha + \psi) + \dots \right] \times \\ & \times \left[1 - \frac{ae^{-ct}}{1!} + \frac{a^2 e^{-2ct}}{2!} - \dots \right] dt. \end{aligned}$$

Считаю метод Симпсона менее громоздким и, стало быть, более пригодным для решения уравнения (8). Применительно к моему случаю формула Симпсона примет следующий вид:

$$\begin{aligned} I &= \frac{I_0}{\sinh b_0} \sqrt{\frac{1}{2t_1} \int_0^{t_1} \cosh 2b_0 [-\cos(\alpha + \psi) + \cos \psi e^{-1,48 b_0 \sqrt{R} t}] dt} - \frac{1}{2t_1} \int_0^{t_1} dt = \\ & = \frac{J_0}{\sinh b_0} \sqrt{\frac{1}{2.3.k} \left\{ \cosh 2b_0 [-\cos(\alpha_0 + \psi) + \cos \psi e^{-1,48 b_0 \sqrt{R} t_0}] + \right.} \\ & \left. + 4 \cosh 2b_0 [-\cos(\alpha_1 + \psi) + \cos \psi e^{-1,48 b_0 \sqrt{R} t_1}] + 2 \cosh 2b_0 [-\cos(\alpha_2 + \psi) + \right. \\ & \left. + \cos \psi e^{-1,48 b_0 \sqrt{R} t_2}] + \dots + \cosh 2b_0 [-\cos(\alpha_k + \psi) + \cos \psi e^{-1,48 b_0 \sqrt{R} t_k}] \right\}} - \frac{1}{2} \quad (11) \end{aligned}$$

Относительную индукцию $b_0 = \frac{B_m}{x}$, соответствующую нормальному напряжению, необходимо так выбрать, чтобы ток

$$i = i_0 - \frac{\sinh b}{\sinh b_0} \quad (4)$$

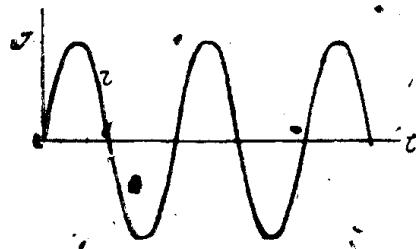
соответствовал тому значению, которое получается по кривой намагничения.

Прежде чем приступить к определению по формуле (11) тока включения для вышеуказанной катушки, мною проделан подбор b_0 , который заключается в том, что, задавая произвольно значение b_0 , я находил по формуле (4) такой ток, который при заданном значении b_0 соответствовал току, найденному по кривой намагничения. Чобы сравнить токи, полученные по формуле (4), с токами, найденными по кривой намагничения, мною токи, найденные по формуле (4), указаны на фиг. 9 точками с соответствующими индексами.

Точки с индексом I около кривой намагничения соответствуют случаю, когда к катушке приложено напряжение 135 вольт, $B_m = 10500$ гаусс и $b_0 = 3,18$. Точки с индексом II относятся к случаю, когда к катушке приложено напряжение 168 вольт, $B_m = 13000$ гаусс и $b_0 = 5,05$. Точки с индексом III относятся к случаю, когда к катушке приложено напряжение 188 вольт, $B_m = 14600$ гаусс и $b_0 = 5,37$.

При включении катушки в момент, когда напряжение проходит через нуль, толчек тока достигает наибольшего значения. При включении катушки в момент, когда напряжение проходит через максимум, толчка тока

совершенно не будет (фиг. 10). При включении катушки в момент, отличный от указанных выше, толчек тока будет иметь какое-то промежуточное значение. Так как появление того или иного случая включения равновероятно, то значение эквивалентного тока включения для отмеченных выше 3 случаев включения определяется по формуле (9).



Фиг. 10.

$$I_s = \sqrt{\frac{I_1 I_2 t_1 + I_2 I_3 t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots} + \frac{R_{12} t_1 + R_{23} t_2}{3(t_1 + t_2 + \dots)}} \quad (12)$$

Здесь t_1 и t_2 — отрезки времени между двумя смежными ординатами; в любом случае они равны, т. е. $t_1 = t_2$;

$$I_{12} = I_1 - I_2; \quad I_{23} = I_2 - I_3;$$

I_1 — действующее значение тока включения, если оно произошло в момент, когда напряжение проходит через нуль;

I_2 — действующее значение тока включения, если включение произошло в момент, когда напряжение $v = v_m \sin 45^\circ$;

I_3 — действующее значение тока включения, если включение произошло в момент, когда напряжение проходит через максимум.

Эквивалентный ток включения будет тем больше, чем больше индукция. В таблице 1 приводятся подсчитанные по формулам (11) и (12) значения эквивалентных токов включения при различных значениях напряжения, приложенного к катушке с активным сопротивлением $R = 0,7$ ома.

Таблица 1.

	Н а п р я ж е н и е		
	135 V	168 V	188 V
B_m	10500	13000	14000
b_0	3,18	5,05	5,35
I_1	1,4	9,75	23,7
I_2	1,24	4,95	9,3
I_3	0,6	0,9	1,55
I_4	1,2	5,25	13,3
k	160	124	100
t_1	0,0025	0,0025	0,0025
t_2	0,4	0,31	0,25
P_{med}	1 ватт	24,2 ватта	123 ватта

Здесь $t_1 = t_2 = t_3 = \dots$ — отрезки времени между двумя смежными ординатами, t_1 — время включения, I_3 — эквивалентный ток включения, P_{med} — потери в меди, подсчитанные по формуле $I_3^2 R$. Число ординат в каждом случае взято таким, чтобы ток в конце включения составлял не больше (1—5%) от толчка тока при включении.

Из таблицы 1 видно, что потери в меди тем больше, чем больше индукция. С достаточной для практики точностью они могут быть подсчитаны по предлагаемой мною формуле:

$$P_{med} = R \left(\frac{B_m}{9000} \right)^{\gamma} \quad (13)$$

Действительно, подставляя указанные ниже значения γ , получим при $B = 10500$ гаусс.

$$P_{m_1} = 0,7 \left(\frac{10500}{9000} \right)^{10,0} = 3,2 \text{ ватт},$$

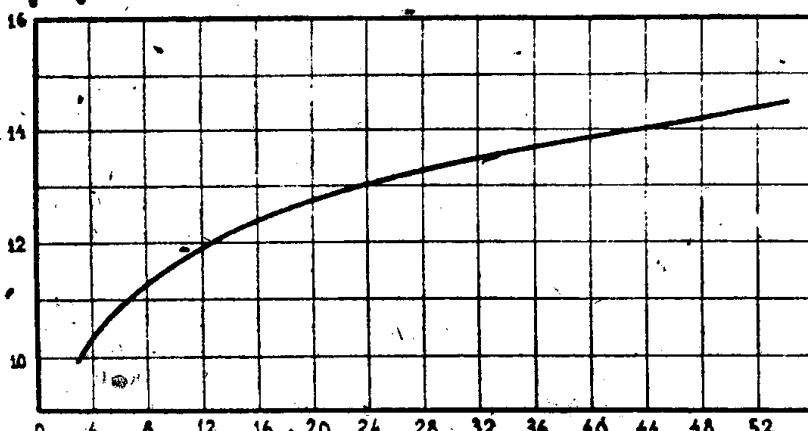
при $B = 13000$ гаусс

$$P_{m_2} = 0,7 \left(\frac{13000}{9000} \right)^{10,0} = 28 \text{ ватт},$$

и при $B = 14600$ гаусс

$$P_{m_3} = 0,7 \left(\frac{14600}{9000} \right)^{10,4} = 115 \text{ ватт}.$$

Значительное расхождение в первом случае не имеет большого значения, так как при малом насыщении потери в меди составляют лишь 5%.



Фиг. 11.

от потерь в железе. Расхождения во втором случае с опытными данными, как увидим ниже, нет. При другом числе включений в секунду показатель степени имеет иное значение. Чтобы иметь возможность пользоваться этой формулой при самом различном числе включений в секунду, мною на основании формул 11 и 12 вычислена и построена, представленная на фиг. 11, кривая, представляющая зависимость показателя степени γ от числа включений в секунду n' .

ПОТЕРИ ОТ ТОКОВ ФУКО.

При установившемся режиме работы токи Фуко в трансформаторе порождаются электродвижущей силой, наводимой изменениями магнитного потока. При включении трансформатора, в железе его, кроме установившегося тока $I_{\phi y}$, появляется еще переходная составляющая $I_{\phi n}$. Последняя имеет следующее выражение (л. 10)

$$I_{\phi n} = -A_3 e^{-\frac{t}{T_h}} + A_4 e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (13)$$

T_s — постоянная времени полей расстояния от токов Фуко, $T_s = L_s / R_\phi$;
 L_s — коэффициент самоиндукции рассеяния от токов Фуко;

R_ϕ — сопротивление токам Фуко,

T_h — постоянная времени главного поля токов Фуко,

A_3 и A_4 — постоянные, значение которых см. ниже.

Если предположить, что изменение напряжений трансформатора происходит по закону синуса, то среднее действующее значение переходного тока за время включения определяется по формуле

$$\begin{aligned} I_{\phi n} &= \sqrt{\frac{1}{t_1 \pi} \int_0^{t_1} \int_0^\pi \left[-A_3 e^{-\frac{t}{T_h}} \cos \psi + A_4 e^{-\frac{t}{T_s}} \cos \psi \right]^2 d\psi dt} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{t_1 \pi} \int_0^{t_1} \int_0^\pi (A_3^2 e^{-\frac{2t}{T_h}} - 2A_3 A_4 e^{-\frac{t}{T_h} - \frac{t}{T_s}} + A_4^2 e^{-\frac{2t}{T_s}}) \cos^2 \psi d\psi dt} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{2t_1 \pi} \int_0^{t_1} \int_0^\pi (A_3^2 e^{-\frac{2t}{T_h}} 2A_3 A_4 e^{-\frac{t}{T_h} - \frac{t}{T_s}} + A_4^2 e^{-\frac{2t}{T_s}}) (\cos 2\psi + 1) d\psi dt} = \\ &= \sqrt{\frac{T_h A_3^2}{4t_1} (1 - e^{-\frac{2t_1}{T_h}}) + \frac{T_s}{4t_1} A_4^2 (1 - e^{-\frac{2t_1}{T_s}})} - \\ &\quad - A_3 A_4 \frac{T_h T_s}{T_h + T_s} (1 - e^{-\frac{t_1(T_h + T_s)}{T_h + T_s}}) \end{aligned} \quad (15)$$

Для того, чтобы определить R_ϕ воспользуемся следующими рассуждениями.

Фиг. 12 представляет сечение стержня трансформатора. По теореме Стокса (<л. 11>) $\int A ds$, взятый по кривой S , будет равен сумме таких же интегралов, взятых по периферии отдельных площадок, ибо по линии со-прикосновения двух смежных площадок $A ds$ будет иметь противоположные значения, так как A сохраняет свое направление, а ds для смежных площадок имеет противоположные значения. Следовательно, магнитное дей-

ствие токов Фуко, проходящих по сердечнику, может быть заменено действием их при прохождении по железному витку, расположенному на периферии сердечника, активное сопротивление которого найдем так:

Потери от токов Фуко

$$P_\phi = I_\phi^2 R_\phi,$$

отсюда

$$R_\phi = \frac{P_\phi}{I_\phi^2} \quad (16)$$

Г. Н. Петров (л. 12) дает потери от токов Фуко при толщине листов железа 0,35 мм в восемь раз меньше потерь на гистерезис и при толщине листов железа 0,5 мм потери от токов Фуко в 5 раз меньше потерь на гистерезис, т. е.

$$P_\phi = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{9} \right) P_{\text{ж}} \quad (17)$$

Здесь $P_{\text{ж}}$ — потери в железе.

Следовательно

$$\begin{aligned} R_\phi &= \frac{P_\phi}{I_\phi^2} = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{9} \right) \frac{P_{\text{ж}}}{I_{\text{ж}}^2} = \\ &= \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{9} \right) \frac{P_{\text{ж}}}{\left(\frac{P_{\text{ж}}}{V} \right)^2} = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{9} \right) \frac{P_{\text{ж}}}{\left[\left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{9} \right) \frac{P_{\text{ж}}}{V} \right]^2} = \frac{6 \div 9}{P_{\text{ж}}} V^2 \text{ ом} \end{aligned}$$

Высота витка

$$H_s = 2h_k + 2l_j + 2h_j \quad (18)$$

Здесь h_k — высота стержня, l_j — длина ярма между осями стержней, h_j — высота ярма. Толщина витка равна толщине листов железа трансформатора, длину воздушного промежутка, в котором проходит поток рассеяния, принимаю равной $\delta = 1 \text{ см}$.

Коэффициент самоиндукции, соответствующий потоку рассеяния,

$$L_s = \frac{0.4 \pi w^2}{H_s} \left(\frac{C}{3} + \frac{\delta}{2} \right) U \quad (19)$$

Здесь U — длина железного витка.

Для трансформаторов U равно удвоенной ширине листа железа стержня или ярма, если стержень и ярмо имеют одинаковые размеры. В нашем случае $U = 2.3.6 = 7.2 \text{ см}$.

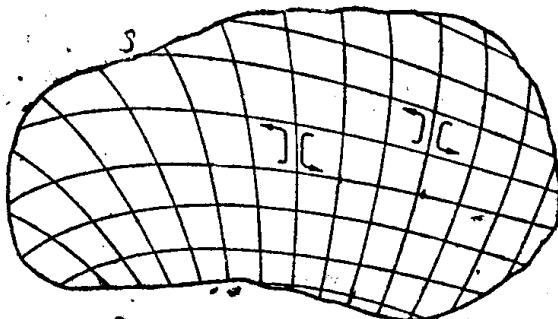
Постоянная времени потока рассеяния от токов Фуко

$$T_s = \frac{L_s}{R_\phi} = \frac{0.4 \pi w^2 P_{\text{ж}} U}{2(h_k + l_j + h_j)(6 \div 9) V^2} \left(\frac{C}{3} + \frac{\delta}{2} \right)$$

Подставляя $C = 0.85 \text{ мм}$, получим

$$T_s = \frac{0.4 \pi 35.7.2}{2.41.6.9.168^2} \left(\frac{0.035}{3} + 0.5 \right) = 7.92, 10^{-6} \text{ сек.}$$

Здесь $W = 1$, при $C = 0.5 \text{ см}$; $T_s = 10.310^{-6} \text{ сек.}$



Фиг. 12.

В формуле (6) по аналогии с ненасыщенными цепями можно считать

$$1.48 b_0 \sqrt{R} = \frac{1}{T}. \quad (20)$$

Здесь T — постоянная времени.

В таком случае постоянная времени главного поля, первичной обмотки

$$T_1 = \frac{1}{1.48 b_0 \sqrt{R}} = \frac{1}{1.48 \cdot 5.05 \sqrt{0.7}} = 0.16 \text{ сек.}$$

Постоянная времени главного поля токов Фуко при $V = 168$

$$T_\phi = \frac{1}{1.48 \cdot 5.05 \sqrt{\frac{9.1682}{35}}} = 1.57 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

Для того, чтобы определить ошедшие в уравнения (13) постоянные A_3 и A_4 , воспользуемся дифференциальными уравнениями двух обмоток, индуктивно связанных общим магнитным потоком. Для замкнутого накоротко, со стороны вторичной обмотки, трансформатора они примут следующий вид:

$$\begin{aligned} L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + R_1 i_1 &= E \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + R_2 i_2 &= 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Если продифференцировать уравнение (21) по t и исключить i_2 из вновь полученных уравнений, то получается следующее линейное дифференциальное уравнение второго порядка относительно i_1 , правую часть которого приравниваю нулю, так как меня интересуют лишь затухающие токи неустановившегося режима (л. 13):

$$\frac{d^2 i_{1n}}{dt^2} + (a_1 + a_2) \frac{di_{1n}}{dt} + a_1 a_2 \tau i_{1n} = 0.$$

Здесь

$$a_1 = \frac{R_1}{L_1 \tau}, \quad a_2 = \frac{R_2}{L_2 \tau}, \quad \tau = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}.$$

R_1, R_2, L_1, L_2 — соответственно активные сопротивления и коэффициенты самоиндукции первичной и вторичной обмоток трансформатора, M — коэффициент взаимоиндукции, i_{1n} — переходная составляющая тока первичной обмотки.

Вышенаписанное дифференциальное уравнение имеет следующее решение:

$$i_{1n} = A_1 e^{-\alpha_1 t} + A_2 e^{-\alpha_2 t} \quad (22a)$$

Точно такое же дифференциальное уравнение как для i_{1n} существует и для i_{2n} . Таким образом для текущего по вторичной обмотке тока получается

$$i_{2n} = A_3 e^{-\alpha_1 t} + A_4 e^{-\alpha_2 t} \quad (22b)$$

Здесь t — время в секундах;

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{a_1 + a_2}{2} - \sqrt{\frac{(a_1 + a_2)^2}{4} - a_1 a_2 \tau} \\ \alpha_2 &= \frac{a_1 + a_2}{2} + \sqrt{\frac{(a_1 + a_2)^2}{4} - a_1 a_2 \tau} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

A_1, A_2, A_3, A_4 — постоянные интегрирования.

Подставляя уравнения (22) и уравнения (21), и приравнивая правую часть нулю, получим:

$$\left. \begin{aligned} L_1 A_1 \alpha_1 + M A_3 \alpha_1 - R A_1 &= 0 \\ L_1 A_2 \alpha_2 + M A_4 \alpha_2 - R A_2 &= 0 \\ L_2 A_3 \alpha_1 + M A_1 \alpha_1 - R A_{2,3} &= 0 \\ L_2 A_4 \alpha_2 + M A_2 \alpha_2 - R A_{2,4} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Предположим, что включение происходит в момент, когда напряжение проходит через нуль, т. е. (л. 14)

$$i_{in} = -I, \quad i_{2n} = -I'_2 \quad (25)$$

$$A_1 + A_2 = -i_1, \quad A_3 + A_4 = -i'_2 \quad (26)$$

Тогда уравнение (24) вместе с уравнением (26) дает необходимое и достаточное число уравнений для определения постоянных интегрирования от A_1 до A_4 .

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{I_1 \alpha_1 (1 - \alpha_2 T_1)}{\alpha_2 - \alpha_1} - \frac{M \alpha_1 \alpha_2 I'_2}{R (\alpha_2 - \alpha_1)} \\ A_2 &= -\frac{I_1 \alpha_2 (1 - \alpha_1 T_1)}{\alpha_2 - \alpha_1} + \frac{M \alpha_1 \alpha_2 I'_2}{R (\alpha_2 - \alpha_1)} \\ A_3 &= \frac{(1 - \alpha_2 T_1) L_1 I_1 (1 - T_1 \alpha_1)}{(\alpha_2 - \alpha_1) M T_1} + \frac{I'_2 \alpha_1 (1 - T_1 \alpha_2)}{\alpha_2 - \alpha_1} \\ A_4 &= -\frac{(1 - \alpha_1 T_1) L_1 I_1 (1 - T_1 \alpha_2)}{(\alpha_2 - \alpha_1) M T_1} + \frac{I'_2 \alpha_1 (1 - T_1 \alpha_2)}{\alpha_2 - \alpha_1} \end{aligned}$$

Коэффициент рассеяния J — весьма малая величина. Допуская $\tau = 0$, получим для постоянной затухания α_1 неопределенность вида $\frac{0}{0}$, которая переходит, однако, после раскрытия по правилу Лопиталя (л. 15), в

$$\alpha_1 = \frac{1}{T_1 + T_2}$$

и кроме того

$$\alpha_2 = \infty$$

Подставляя значение α_1 в α_2 и уравнение для A_3 , получаю неопределенность вида $\frac{\infty}{\infty}$, которая переходит, после раскрытия по правилу Лопиталя, в

$$A_3 = (-I_1 + I'_2) \frac{T_2}{T_1 + T_2}$$

Так как $-I_1 + I'_2 = -I_\mu$,

$$A_3 = -I_\mu \frac{T_2}{T_1 + T_2} \quad (26a)$$

Других постоянных интегрирования не отыскиваю, так как они не требуются. Здесь T_2 — постоянная времени вторичной цепи. В рассматриваемом случае $T_2 = T_\phi$, так как индуктивно связаны общим магнитным потоком будут первичная обмотка трансформатора и железный виток, по которому проходят токи Фуко, а вторичная обмотка разомкнута. Следовательно, в окончательном виде формула напишется так:

$$A_3 = -I_\mu \frac{T_\phi}{T_1 + T_\phi}.$$

Пренебрегая составляющей от потока рассеяния, среднее действующее значение переходной составляющей токов Фуко за время включения согласно формуле (15) —

$$I_{\phi n} = \frac{A_3}{2} \sqrt{\frac{T_h}{t_1} \left(1 - e^{-\frac{2t_1}{T_h}}\right)}.$$

Подставляя значения A_3 и $T_h = T_1 + T_\phi$ (л. 16), получим

$$I_{\phi n} = -\frac{I_\mu}{2} \frac{T_\phi}{T_1 + T_\phi} \sqrt{\frac{T_1 + T_\phi}{t_1} \left(1 - e^{-\frac{2t_1}{T_1 + T_\phi}}\right)}.$$

Составляющая токов Фуко установившегося режима $I_{\phi u} = \frac{P_{ju}}{9V}$. Результатирующее значение токов Фуко за время включения

$$I_{\phi v} = \sqrt{I_{\phi u}^2 + I_{\phi n}^2} \quad (27)$$

Потери от токов Фуко при неустановившемся режиме работы

$$P_{\phi v} = I_{\phi v}^2 R_\phi$$

Потери от токов Фуко при неустановившемся режиме работы зависят от числа включений в секунду и приводятся в таблице 2.

Таблица 2.

Время включения в секундах	$I_{\phi n}$	$I_{\phi u}$	$I_{\phi v}$	$P_{\phi v}$	$P_{\phi u}$	V	$\frac{P_{\phi v}}{P_{\phi u}}$
0,31	$3,16 \cdot 10^3$	$8,32 \cdot 10^2$	$2,34 \cdot 10^2$	4,0	3,9	168	1,03
0,02	$5,91 \cdot 10^3$	$2,32 \cdot 10^2$	$2,38 \cdot 10^2$	4,12	3,9	168	1,08

В таблице 2 I_μ взято по кривой намагничения (фиг. 9), T_ϕ подсчитан по формуле (20) и потери от токов Фуко при установившемся режиме работы подсчитаны по формуле

$$P_{\phi u} = \frac{P_{ju}}{9}.$$

Здесь R_{ju} — потери в железе при установившемся режиме работы. Из таблицы 2 следует, что, если число включений в секунду меньше ста, то переходной составляющей потерь от токов Фуко можно пренебречь.

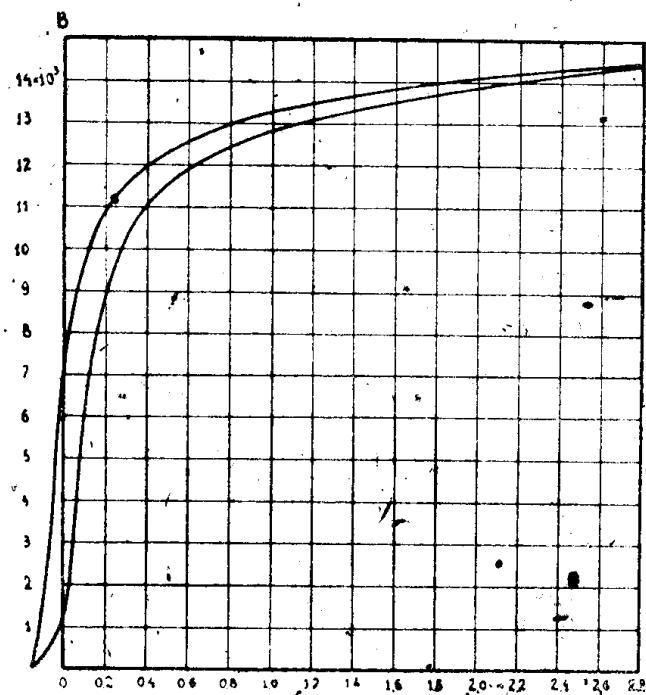
В таком случае потери от токов Фуко при неустановившемся режиме работы будут выражаться так же, как и при установившемся режиме работы, т. е.

$$P_{\phi\psi} = \frac{P_{\text{жy}}}{6 \div 9}$$

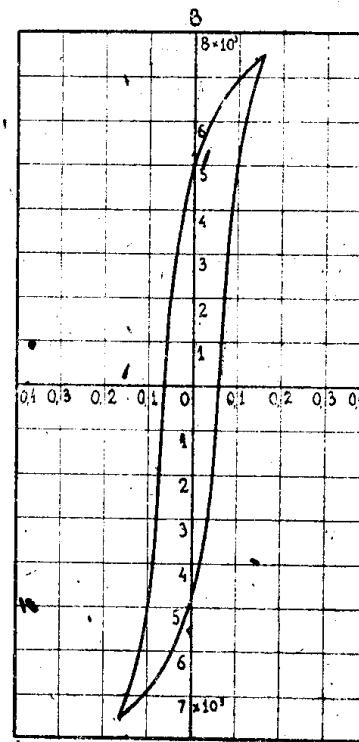
Потери на гистерезис

До настоящего времени вопросом потерь на гистерезис при больших смещенных циклах никто не занимался. Работа J. D. Wall (л. 17) относится к небольшим смешанным циклам. В книге В. К. Аркадьева (л. 18), тоже не рассматриваются потери на гистерезис при больших смещенных циклах.

Потери на гистерезис пропорциональны петле гистерезисного цикла. В большинстве случаев включения трансформатора гистерезисный цикл смещается относительно оси напряженности поля (фиг. 13 и 15). При включении трансформатора в момент, когда напряжение проходит через нуль, магнитный поток, стало быть и индукция, достигают удвоенного значения (фиг. 13). При включении трансформатора в момент, когда напряжение проходит через максимум, магнитный поток в железе трансформатора за время включения не превзойдет нормального значения (фиг. 14), т. е. будет одинаков с тем, который имеет место при установившемся режиме. Во всех иных случаях включения трансформатора гистерезисные циклы будут



Фиг. 13.

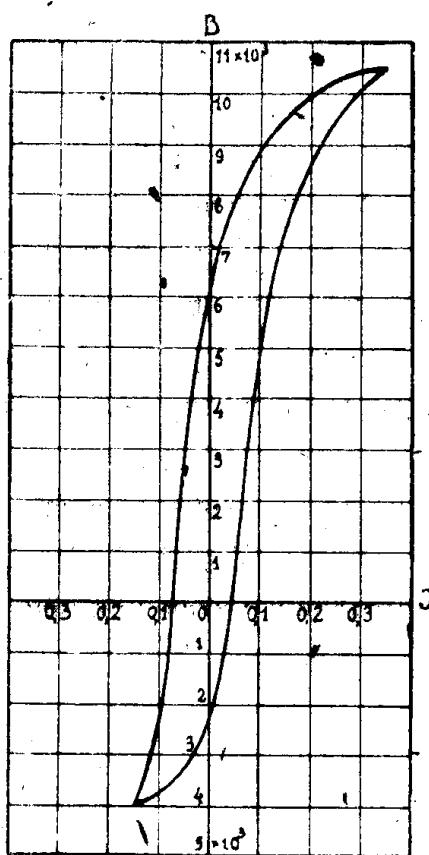


Фиг. 14.

занимать промежуточные положения между теми, которые указаны на фиг. 13 и 14, например, — фиг. 15. Таким образом максимум индукции при включении трансформатора будет достигать значения в пределах B_n до $2B_n$. Здесь B_n — нормальное значение индукции.

С целью установить количественные изменения потерь на гистерезис при больших смещенных циклах, мною в электроизмерительной лаборатории Томского индустриального института аппаратом Кежеля для отме-

ченных выше моментов включения заснята петля гистерезиса (фиг. 13, 14 и 15). Рамах петли во всех случаях оставался один и тот же. Исследуемый стержень был изготовлен из простого железа.



Фиг. 15.
дукции при неустановившемся режиме.

$$\text{Действительно, при } \left(\frac{B}{B_y} \right) = 1,94$$

$$\left(\frac{B}{B_y} \right)^{0,375} = (1,94)^{0,375} = 1,282$$

$$\frac{S_1}{S_3} = \frac{19,5}{15,1} = 1,29;$$

$$\frac{B}{B_y} = 1,4$$

$$\left(\frac{B}{B_y} \right)^{0,375} = (1,4)^{0,375} = 1,134$$

$$\frac{S_2}{S_3} = 1,125.$$

при

Следовательно, первый после включения гистерезисный цикл будет вызывать потери

$$P_{1z} = P_y \left(\frac{B_1}{B_y} \right)^{0,375}$$

Здесь P_y — потери на гистерезис за один цикл при установившемся режиме работы, B_1 — максимальное значение индукции первого после включения цикла. Последующие циклы по причине затухания будут иметь меньшее значение максимальной индукции. Наконец, настанет такой момент, когда гистерезисный цикл будет симметричен относительно оси времени. Потери на гистерезис складываются из потерь, вызываемых отдельными гистерезисными циклами, следовательно, среднее действующее значение их будет равно

$$P_z = \sqrt{\frac{1}{f} \sum_0^f P_{yz}^2}$$

Здесь f — число циклов; P_{yz} — потери на гистерезис за один цикл, равные

$$P_{yz} = P_y \left(\frac{B}{B_y} \right)^{0.375} \quad (28)$$

Максимальное значение индукции в каждый данный момент неустановившегося режима состоит из составляющей, установленного режима и переходной составляющей, определяемой моментом включения, т. е.

$$B_f = B_y (1 + \cos \phi e^{-\alpha Tf})$$

Здесь T — время одного цикла, f — число циклов, ϕ определяет мгновенное значение напряжения при включении и B_f — максимальное значение индукции при f цикле. Если допустить, что включение происходит при $\cos \phi = 1$ и подставить формулу (29) в форм. (28), то потери на гистерезис за f_1 циклов будут равны

$$P_z = P_{yz} \sqrt{\frac{1}{f_1} \int_0^{f_1} (1 + e^{-\alpha Tf})^{0.75} df}$$

Здесь P_{yz} — потери на гистерезис при установленном режиме работы и $\alpha = 1.48 b_0 \sqrt{R}$.

Пусть

$$1 + e^{-\alpha Tf} = u.$$

Тогда

$$e^{-\alpha Tf} = u - 1; \quad -f = \frac{l_n(u-1)}{\alpha T}$$

$$-df = \frac{du}{(u-1)\alpha T}$$

и

$$\sqrt{\frac{1}{f_1} \int_0^{f_1} (1 + e^{-\alpha Tf})^{0.75} df} = \sqrt{-\frac{1}{\alpha Tf_1} \int_0^{f_1} \frac{u^{3/4}}{u-1} du}$$

Предположим

$$u = z^4.$$

тогда

$$du = 4z^3 dz.$$

$$\sqrt{-\frac{1}{\alpha Tf_1} \int_0^{f_1} \frac{u^{3/4}}{u-1} du} = \sqrt{-\frac{4}{\alpha Tf_1} \int_0^{f_1} \frac{z^6 dz}{z^4 - 1}}; \quad z^6 : z^4 - 1 \Rightarrow z^2 + \frac{z^2}{z^4 - 1}$$

Следовательно

$$\sqrt{-\frac{4}{\alpha Tf_1} \int_0^{f_1} \frac{z^6 dz}{z^4 - 1}} = \sqrt{-\frac{4}{\alpha Tf_1} \int_0^{f_1} z^2 dz - \frac{4}{\alpha Tf_1} \int_0^{f_1} \frac{z^2}{(z^2)^2 - 1} dz}.$$

Разлагая $\frac{z^2}{(z^2)^2 - 1}$ на элементарные дроби, получим

$$\frac{z^2}{(z-1)(z+1)(z^2+1)} = \frac{A}{z-1} + \frac{B}{z+1} + \frac{Cz+D}{z^2+1}.$$

Следовательно

$$\begin{aligned} & \sqrt{-\frac{4}{\alpha Tf_1} \int_0^{f_1} z^2 dz - \frac{4}{\alpha Tf_1} \int_0^{f_1} \frac{z^2}{(z^2)^2 - 1} dz} = \\ & = \sqrt{\frac{4}{\alpha Tf_1} \left[\frac{z^3}{3} - \frac{1}{4} \ln(z-1) + \frac{1}{4} \ln(z+1) - \frac{1}{2} \operatorname{arctg} z \right]_0^{f_1}} \end{aligned}$$

Подставляя

$$z = u^{\frac{1}{4}} = (1 + e^{-\alpha Tf_1})^{\frac{1}{4}},$$

найдем

$$\begin{aligned} P_z = P_y \sqrt{\frac{1}{\alpha Tf_1} \left\{ -\frac{4}{3} (1 + e^{-\alpha Tf_1})^{\frac{3}{4}} + \ln[(1 + e^{-\alpha Tf_1})^{\frac{1}{4}} + 1] - \right. \right. \\ \left. \left. - \ln[(1 + e^{-\alpha Tf_1})^{\frac{1}{4}} - 1] - 2 \operatorname{arctg}(1 + e^{-\alpha Tf_1})^{\frac{1}{4}} + 1,53 \right\}}. \right. \end{aligned}$$

Полученное выражение потерь на гистерезис при неустановившемся режиме работы неудобно для пользования. Если, пользуясь этой формулой, вычертить кривую, то она получится весьма мало отличающейся от прямой линии. Я не сделаю большой ошибки, если допущу, что изменение потерь на гистерезис от момента включения и до установившегося состояния происходит по прямой линии. Следовательно, для момента включения, когда напряжение проходит через нуль, эквивалентные потери на гистерезис за неустановившийся период, согласно формуле (12), будут равны

$$P_{z0} = P_{zy} \sqrt{1,29 \cdot 1 + 0,29^2} = 1,14.$$

Здесь 1 определяет потери при установившемся режиме работы и 1,29 определяет максимальные потери при включении, когда напряжение проходит через нуль.

Для случая, когда при включении мгновенное значение индукции достигает $B = 1,5 B_y$, эквивалентные потери на гистерезис за неустановившийся период будут равны

$$P_{r1,5} = \sqrt{1,16 \cdot 1 + \frac{0,16^2}{3}} P_{zy} = 1,08 P_{zy}.$$

Здесь

$$1,16 = \left(\frac{B}{B_y} \right)^{0,375} = (1,5)^{0,375}$$

Так как появление того или иного случая включения равновероятно, то эквивалентные потери на гистерезис от момента включения и до момента установившегося режима работы будут равны

$$P_{ze} = P_{zy} \sqrt{\frac{1,14 \cdot 1,08 + 1,08 \cdot 1}{2} + \frac{0,32^2 + 0,08^4}{6}} = 1,075 P_{zy},$$

Здесь 1 — определяет потери при включении, когда напряжение проходит через максимум.

Если включение происходит через каждые 0,02 сек, т. е. за время включения совершаются только один гистерезисный цикл, то потери на гистерезис за время включения будут равны

$$P_{\text{вв}} = P_{\text{ву}} \sqrt{\frac{1,29 \cdot 1,16 + 1,16 \cdot 1}{2} + \frac{0,13^2 + 0,16^2}{6}} = 1,15 P_{\text{ву}}$$

Следовательно, можно считать, что потери на гистерезис при установленном режиме работы трансформатора

$$P_{\text{вв}} = (1,075 \cdot 1,15) P_{\text{ву}} \quad (31)$$

Здесь 1,075 относится к случаю, когда каждое последующее включение происходит при полном исчезновении переходной составляющей, и 1,15 относится к случаю, когда включение происходит через каждые 0,02 сек.

Общие потери в трансформаторе при неустановившемся режиме работы, согласно формуле 13, 27 и 31, будут равны

$$P_n = R \left(\frac{B_m}{9000} \right)^2 + I^2 \phi R_\phi + (1,075 + 1,15) P \quad (32)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

С целью экспериментального подтверждения формулы (32) мною в электромашинной лаборатории Томского индустриального института были проведены следующие опыты.

Катушка (модель трансформатора) в течение определенного времени работала при неустановившемся режиме, для которого желательно было определить потери по формуле (32). По окончании опыта находилась потребляемая катушкой мощность, которая затем сравнивалась с подсчитанной по формуле (32).

Катушка имела следующие данные: сечение стержня 13 см², толщина листов трансформаторного железа 0,35 мм, активное сопротивление $R = 0,7$ м², число витков $w = 444$, кривая намагничения катушки (1) и кривая потребляемой мощности при холостом ходе (2) приведены на фиг. 9. Во время опыта катушка погружалась в трансформаторное масло. С целью уменьшения количества тепла, отдаваемого окружающей среде, бак с маслом изолировался от окружающей среды.

За время опыта энергия, поглощаемая катушкой,

$$Pt = t (I^2 R + P_\phi + P_i) \quad (33)$$

расходуется на нагревание масла, обмотки, железа, сосуда, в котором помешалась катушка с маслом, и часть ее уходит в окружающую среду.

В формуле (33) P — мощность, t — время в секундах, I — ток, R — активное сопротивление обмотки, P_ϕ — потери от токов Фуко и P_i — потери на гистерезис.

Уравнение теплового баланса имеет следующий вид (л. 9)

$$Pt = C \tau + A \tau_{cp} t \quad (34)$$

Здесь τ — приращение температуры за время опыта τ_{cp} — среднее пре-вышение температуры масла над температурой окружающей среды, C — общая теплоемкость и A — теплоотдача. Определить общую теплоемкость C и теплоотдачу A методом подсчета затруднительно. Для определения указанных величин я поступил следующим образом.

Указанную выше катушку подключил на некоторое время к сети с напряжением 230 вольт. За время, когда катушка была подключена к сети, температура масла повысилась до 36,5°C.

Через 4 часа 30 мин. после отключения катушки температура масла понизилась на $\tau = 6^\circ\text{C}$, при

$$\tau_{cp} = \frac{36,5 + 30,5}{2} - 18 = 15,5^\circ\text{C}$$

Здесь $18 = \theta$ — температура окружающей среды.

После отключения катушки от сети, уравнение теплового баланса примет следующий вид

$$C\tau = A\tau_{cp}t \quad (35)$$

Подставляя в эту формулу найденное методом подсчета приближенное значение $C \approx 30000 \frac{\text{вatt}}{^\circ\text{C}}$, найдем

$$A = \frac{C\tau}{\tau_{cp}t} = \frac{30000 \cdot 6}{15,5 \cdot 16200} = 0,74 \frac{\text{вatt}}{^\circ\text{C}}$$

Теплоемкость C — найдена приближенно. Для того, чтобы найти более точное ее значение, указанная выше катушка была подключена к сети с напряжением 230 вольт в течение 10080 секунд. Работая при установившемся режиме, катушка потребляла мощность 50 ватт. Температура масла за время опыта поднялась на 14,5°C. Нагрев масла незначителен. Поэтому можно считать — нарастание температуры масла за время нагрева происходит по прямой линии с весьма малыми потерями тепла в окружающую среду.

В таком случае

$$\tau_{cp} = \frac{Rt}{2C} = \frac{50 \cdot 10080}{2 \cdot 30000} = 8,4^\circ\text{C},$$

и более точное значение теплоемкости

$$C = \frac{Pt - A\tau_{cp}t}{\tau} = \frac{50 \cdot 10080 - 0,74 \cdot 8,4 \cdot 10080}{14,6} = 30400 \frac{\text{вatt}}{^\circ\text{C}}$$

Принимаю окончательно $C = 30400 \frac{\text{вatt}}{^\circ\text{C}}$ и $A = 0,74 \frac{\text{вatt}}{^\circ\text{C}}$.

Сравнение потерь, подсчитанных по формуле (32), с потерями, полученными из опыта, производилось, пользуясь данными трех опытов.

Во всех трех опытах время, когда катушка была подключена к сети, составляет 75% времени цикла, т. е. 75% времени от одного до другого включения. Время включения в каждом опыте соответствует тому значению, при котором был подсчитан по формуле (11) ток при неустановившемся состоянии. В таком случае уравнение теплового баланса катушки за время опыта выразится

$$0,75 P_o t = C\tau - A\tau_{cp}t' \quad (36)$$

Здесь t — время в течение которого длился опыт, P_o — эквивалентная мощность неустановившегося режима, t' — время от начала опыта до конца измерения температуры масла. Это соответствует моменту, когда температура масла достигает установленного состояния.

Периодическое включение катушки производилось с помощью машины постоянного тока, на шкив которой наложено деревянное кольцо, 0,75 длины окружности которого покрыто железом. В первом опыте число оборотов машины $n_1 = 112,5$ об/мин. или в секунду

$$\frac{n_1}{60} = \frac{112,5}{60} = 1,875 \text{ об/сек.}$$

Следовательно, время включения в первом опыте

$$t_1 = \frac{0,75}{1,87} = 0,4 \text{ сек.},$$

во втором опыте

$$t_2 = \frac{0,75 \cdot 60}{145} = 0,31 \text{ сек.},$$

в третьем опыте

$$t_3 = \frac{0,75 \cdot 60}{180} = 0,25 \text{ сек.},$$

Данные опытов сведены в таблицу 3.

Таблица 3.

	1-й опыт	2-й опыт	3-й опыт
ϑ_{mn}	28,2	19,4	11,8°C
ϑ_{oc}	15,7	20,2	14,2°C
t_n	17 ч. 27 м.	5 ч. 7 м.	12 ч. 40 м.
n	112,5 об/мин.	145 об/мин.	180 об/мин.
t_k	18 ч. 27 м.	5 ч. 45 м.	13 ч. 30 м.
ϑ_{mk}	28,5 °C	23 °C	26°C
t'	18 ч. 43 м.	6 ч. 5 м.	13 ч. 56 м.
V	135	168	188
τ'	12,8 °C	2,8 °C	11,8°C
τ_o	12,5 °C	-0,8	-2,4°C
τ_{cp}	12,65 °C	1°C	9,4°C
τ	0,3 °C	3,6°C	14,2°C
P_o	19,6 ватта	65,3 ватта	173,5 ватта

Здесь

ϑ_{mn} — температура масла в начале опыта;

ϑ_{oc} — температура окружающей среды;

t_n — время начала опыта;

n — число оборотов в минуту машины постоянного тока;

t_k — время выключения трансформатора;

ϑ_{mk} — температура масла в конце опыта;

t' — время когда масло достигло установившегося состояния;

v — напряжение;

τ' — превышение температуры масла над температурой окружающей среды при установившемся состоянии

$$\tau' = \vartheta_{mk} - \vartheta_{oc};$$

τ_o — превышение температуры масла над температурой окружающей среды в начале опыта

$$\tau_o = \vartheta_{mn} - \vartheta_{oc};$$

τ_{cp} — среднее превышение температуры масла над температурой окружающей среды

$$\tau_{cp} = \frac{\tau' + \tau_o}{2};$$

τ — приращение температуры масла за время опыта;

P_o — потери, найденные из опыта

$$P_o = \frac{C \tau - A \tau_{cp} t'}{0,75 t}.$$

Потери энергии, подсчитанные по формуле (22) и полученные из опыта, сведены в таблицу № 4. В таблице число включений в секунду $n' = \frac{1}{kt_1}$.

Здесь k — число ординат в формуле Симпсона и t — расстояние между двумя смежными ординатами, k в каждом опыте берется таким, которое было взято при пользовании формулой Симпсона, $P_{жy}$ взято по кривой 2 (фиг. 9), P_n — потери подсчитанные по формуле (32), и P_o — потери, полученные из опыта.

Таблица 4.

	Первый опыт $V = 135$	Второй опыт $V = 168$	Третий опыт $V = 188$
B_m	10500	13000	14600
n'	2,5	3,22	4,0
γ	10,0	10,0	10,4
$P_{жy}$	19 ватт	35 ватт	50 ватт
P_ϕ	2,1 ватта	3,9 ватта	5,6 ватта
P_z	18,0 ватта	33,5 ватта	47,8 ватта
P_m	3,2	28 ватт	115 ватт
P_n	23,3 ватта	65,4	168,4
P_o	19,6	65,3 ватта	173,5 ватта
R	0,7	0,7	0,7

Из таблицы 4 ясно, что увеличение потерь при неустановившемся режиме происходит главным образом за счет потерь в меди. Они тем больше, чем больше насыщение железа трансформатора и число включений в секунду. Для сравнения потерь при различном числе включений в секунду и при напряжении $V = 168$ вольт составлена, пользуясь формулами (13), (27) и (31), таблица 5. В ней при подсчете медных потерь, нагрузочный ток не учтен.

Таблица 5.

n'	P_m	P_z	P_ϕ	$P_{жy}$	$\frac{P_m}{P_{жy}}$
0	3,2	31,1	3,9	35	0,09
4	28	33,5	3,9	35	0,8
50	204	25,8	4,1	35	5,85

Если включение трансформатора происходит при коротком замыкании, то переходные составляющие тока в обмотках могут быть выражены следующими уравнениями

$$i_1 = -\frac{I_p}{2} e^{-\frac{t}{T_h}} - I e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (37a)$$

$$i_2 = -\frac{I_p}{2} e^{-\frac{t}{T_h}} + I e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (37b)$$

Здесь I — ток нагрузки, I_p — намагничающий ток, e — основание натуральных логарифмов, t — время, T_s — постоянная времени главного потока и T_s — постоянная времени потока рассеяния.

Намагничающий ток покрывается, как это видно из уравнений (37), обеими обмотками в одинаковой мере, в то время как намагничающий ток установившегося состояния покрывается, как известно, лишь с первичной стороны.

Переходная составляющая тока во вторичной обмотке достигает, конечно, лишь половинной высоты намагничающего тока, соответствующего накладывающему переходному потоку. Если поэтому во вторичной обмотке следует ожидать лишь удвоенного значения тока короткого замыкания, то в первичной обмотке, если рассеяние не очень мало, могут иметь место более высокие толчки тока.

Если обратиться к формуле (26а), то увидим, что намагничающая составляющая будет тем меньше, чем больше активное сопротивление цепи. Так как при включении сварочного трансформатора под нагрузкой активное сопротивление вторичной цепи большое, то можно считать с достаточной для практики точностью, что и в этом случае намагничение трансформатора происходит только с первичной стороны. В таком случае, считая ток вторичной обмотки совпадающим с напряжением, результирующий ток первичной обмотки будет

$$I_1 = \sqrt{\left(\frac{B_m}{9000}\right)^2 + \frac{I_{m2}^2}{a_1} \int_0^{a_1} [-\cos(\alpha + \psi) + \cos \phi e^{-\frac{t}{T_s}}]^2 d\alpha}.$$

Здесь I_{m2} — максимальное значение приведенного вторичного тока, ϕ — определяет мгновенное значение тока при включении. Так как постоянная времени рассеяния T_s — малая величина, то можно считать, что

$$I_1 = \sqrt{\left(\frac{B_m}{9000}\right)^2 + I_2'^2} \quad (38)$$

Здесь I_2' — приведенное значение вторичного тока. В таком случае потери в трансформаторе при неустановившемся режиме будут равны

$$P_n = R_1 \left[\left(\frac{B_m}{9000} \right)^2 + I_2'^2 \right] + R_2 I_2'^2 + R_\phi I_\phi^2 b + (1.075 - 1.15) P_{scy}, \quad (39)$$

Здесь R_2 — сопротивление вторичной обмотки и I_2 — ток вторичной обмотки.

Формула (39) позволяет произвести подсчет потерь в трансформаторе для любого случая включения и для любого значения индукции. Следовательно, с помощью этой формулы можно произвести более совершенный расчет трансформатора и получить большую мощность при одних и тех же затратах.

Вместе с этим необходимо отметить то обстоятельство, что лучшее использование сварочного трансформатора будет в том случае, когда индукция будет небольшая. Подробно на этом вопросе останавливаться не буду, так как этот вопрос и ряд других, связанных с ним, предполагаю разрешить в следующей работе.

Список литературы.

1. ETZ. 1928, S. 1847.
2. F. Ollendorff Afe. В XXI, 1928, S. 6, В. XXII. 1929, S. 349 и В. XXIII. 1929, S. 162.
3. Summet's GER. Voll. 36, № 4. 1933, P. 182.
4. В. И. Смирнов. Курс высшей математики, т. II, стр. 92.
5. Г. Н. Петров. Трансформаторы, т. I, стр. 223.
6. А. Крылов. Лекции о приближенном вычислении, стр. 78.
7. Р. О. Кузьмин. Бесселевы функции, стр. 60.
8. В. И. Смирнов. Курс высшей математики, т. I, стр. 268.
9. В. К. Попов. Применение электродвигателей в промышленности, ч. I, стр. 65.
10. Р. Рюденберг. Явления неуставновившегося режима в электрических установках, стр. 65.
11. К. А. Круг. Основы электротехники, т. I, стр. 512.
12. Г. Н. Петров. Трансформаторы, т. I, стр. 180.
13. И. Бирман. Сверхтоки в установках высокого напряжения, стр. 36.
14. И. Бирман. Сверхтоки в установках высокого напряжения, стр. 40.
15. В. И. Смирнов. Курс высшей математики, т. I, стр. 146.
16. И. Бирман. Сверхтоки в установках высокого напряжения, стр. 46.
17. JD Ball. Transactions AIEE p. 2693, 1915.
18. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах, 1935.
19. В. К. Попов. Применение электродвигателей в промышленности. Часть I, стр. 33.