№ 19. 1901. ОКТЯБРЬ.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Журналъ, издаваемый VI Отдѣломъ

Императорскаго Русскаго Техническаго Общества.

Современные взгляды на катушку Румкорфа.

Статья В. К. Лебединскаго.

1. Катушка Румкорфа была изобрѣтена ровно пятьдесятъ лѣтъ тому назадъ, въ 1851 г., чрезъ двадцать лѣтъ послѣ открытія Генри и Фарадеемъ *) явленія электромагнитной индукціи, которое лежитъ въ основѣ ея дѣйствія.

Катушка Румкорфа давно стала однимъ изъ самыхъ популярныхъ физическихъ приборовъ, запечатлѣвавшихся изъ курсовъ средней школы на ряду съ Лейденской банкой и т. п.; но долгое время она не имѣла никакого широкаго, серьезнаго значенія: ея примѣненіе ограничивалось опытами надъ разрядами въ газахъ, которые долгое время представляли собою лишь собираніе фактовъ; многочисленныя теоріи, приходившія на умъ изслѣдователямъ этихъ разрядовъ, оказывались примѣнимыми лишь къ тому или иному небольшому классу явленій.

Лишь за послѣднее время опыты Гертца и Рентгена доставили Румкорфовой катушкѣ мѣсто въ самой жизненной струѣ науки; эта катушка оказалась лучшимъ изъ способовъ возбуждать электромагнитныя волны и многія изъ тѣхъ іонныхъ явленій, къ которымъ теорія причисляетъ и лучи Рентгена.

Въ это же время катушка пережила еще новую перемѣну: волны Гертца стали основаніемъ телеграфіи безъ проводовъ, х-лучи—новымъ діагностическимъ средствомъ въ медицинѣ, а, слѣдовательно, ихъ возбудитель пріобрѣлъ характеръ прибора практически необходимаго, нужнаго большому классу потребителей. Хорошая катушка перестала быть предметомъ курьеза въ богатыхъ физическихъ кабинетахъ; съ одной стороны, она стала потребностью физика, для котораго важно, главнымъ образомъ, понимать результатъ ея дѣйствія; съ другой — она становится предметомъ широкаго спроса, большого производства многихъ мастерскихъ, а при этомъ выступаетъ уже и вопросъ о дешевизнѣ. Ее начинаютъ изучать съ различныхъ сторонъ, вслѣдствіе этого теорія ея начинаетъ проясняться; начинаютъ понимать съ одной стороны, какое сложное явленіе представляетъ она собою, и съ другой — какъ нераціональна бываетъ ея конструкція.

2. Основаніемъ дѣйствія Румкорфовой спирали служитъ, какъ мы уже сказали, электромагнитная индукція. На языкѣ современной теоріи можно сказать, что во вторичной катушкѣ индуктируются токи при образованіи и исчезновеніи магнитнаго потока N первичной обмотки; при этомъ количества Q электричества, проносимыя этими токами, равны между собою, будучи опредѣлены выраженіемъ

$$Q = \frac{N}{R_2} n_2 \ldots (1)$$

гдѣ R_2 и n_2 обозначаютъ сопротивленіе и число витковъ вторичной катушки. Это выраженіе выводится изъ основного закона электромагнитной индукціи, по которому эл.-дв. сила въ каждомъ виткѣ въ каждый моментъ равна скорости измѣненія потока внутри его. Оно непосредственно провѣряется на опытѣ, такъ какъ гальванометръ, включенный во вторичную обмотку, при каждомъ замыканіи и размыканіи первичной цѣпи измѣряетъ именно величину Q (т.-наз. баллистическій отсчетъ)

3. Но было бы неправильно предположить, что сами токи замыканія и размыканія одинаковы: понятно, что одно и то же Q можетъ быть пронесено весьма различными токами, но, конечно, въ соотвѣтственно различное время; токи же замыканія и размыканія непремѣнно различны, если различны эл.-движущія силы, индуктируемыя при этихъ процессахъ, т.-е. различны скорости измѣненія магнитнаго потока; эти послѣднія различны по самому существу названныхъ процессовъ.

Съ того момента, когда первичная катушка

*) По поводу юбилея Генри въ Американскихъ журналахъ было очень подробно выяснено участіе этого ученаго въ великомъ открытіи электромагнитной индукціи. Генри сдѣлалъ это открытіе въ концѣ сентября 1831 г., но не обнародовалъ, намѣреваясь раньше повторить свои опыты, съ новыми приборами. Когда, въ 1832 г., въ Апрѣлѣ, Фарадей обнародовалъ свои изслѣдованія въ Annals of Philosophy, Генри, по разсказамъ его дочери, былъ глубоко опечаленъ (filled with disappointement); онъ опубликовалъ свое открытіе въ Silliman's Journal, въ Іюлѣ 1832 года.

Генри установилъ явленіе самоиндукціи, зависимость его отъ формы сердечника, и первый (1842 г.) предположилъ явленіе колебательнаго разряда. (См. напр. Electrical World, January 13, 1900 г.)

Электронная библиотека Российской государственной универсальной научной библиотеки www.booksite.ru

замыкается на батарею (напр. аккумуляторовъ), въ ней начинаетъ дѣйствовать эл.-дв. сила E этой батареи; но, кромѣ того, въ ней дѣйствуетъ обратная эл.-движущая сила электромагнитной индукціи вслѣдствіе измѣненія, увеличенія потока внутри ея; эта послѣдняя замедляетъ установленіе тока $i = \frac{E}{r_1}$ въ катушкѣ (подъ r_1 разумѣемъ сопротивленіе первичной катушки), а, слѣдовательно, и потока внутри ея, сама какъ бы производя токъ обратнаго направленія, т.-наз. экстратокъ замыканія; расчетъ показываетъ, что замедленіе зависитъ отъ r_1 и самоиндукціи L_1 катушки, т. е. отношенія того потока N, который ею въ концѣ концовъ образуется, къ величинѣ тока i, и что обратная эл.-движущая сила равна

$$E_1 = Ee^{-\frac{r_1}{N/i}t} = Ee^{-\frac{r_1}{L_1}t} \quad \ldots\ldots (2),$$

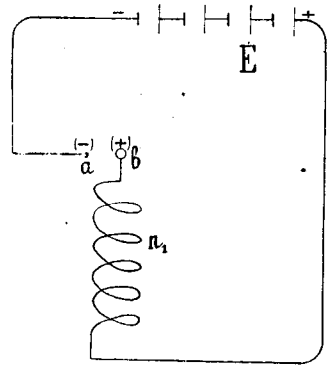
гдѣ время t считается отъ момента замыканія; формула показываетъ, что E_1 обращается въ ноль лишь при $t = \infty$; однако практически она очень скоро получаетъ весьма малое значеніе, т. к. $\frac{r_1}{L_1}$ величина очень большая.

Измѣненіе потока внутри первичной катушки представляетъ собою измѣненіе потока и внутри вторичной и служитъ для этой послѣдней единственною причиною появленія эл.-движущей силы. Чтобы расчитать величину этой эл.-движущей силы, слѣдуетъ сперва узнать, какую эл.-движущую силу индуктируетъ измѣняющійся потокъ въ одномъ виткѣ; это можно узнать изъ форм. (2), раздѣливъ E_1 на n_1, гдѣ n_1 означаетъ число первичныхъ витковъ. Помноживъ $\frac{E_1}{n_1}$ на n_2, узнаемъ, что во вторичной индуктируется эл.-дв сила

$$\frac{n_2}{n_1} E_1.$$

Въ моментъ $t = 0$, $E_1 = E$ (но обратна по знаку), какъ это видно изъ форм. (2); въ этотъ моментъ во вторичной катушкѣ дѣйствуетъ эл.-движ. сила въ $\frac{n_2}{n_1}$ разъ большая. Въ этомъ смыслѣ, называя катушку Румкорфа трансформаторомъ (эл.-движущей силы батареи E), можно сказать, что ея коэффиціентъ трансформированія равенъ отношенію чиселъ витковъ вторичной и первичной обмотокъ.

4. Обращаемся къ процессу размыканія. Еслибы онъ заключался въ томъ, что изъ первичной обмотки была бы выключена батарея E, но цѣпь ея при этомъ не прерывалась бы, то исчезающее магнитное поле индуктировало бы въ ней прямую эл.-движущую силу, вслѣдствіе которой пошелъ бы токъ, мѣшающій исчезновенію потока, и это исчезновеніе произошло бы по том желогариѳмическому закону (форм. 2). Во втоичной катушкѣ индуктировалась бы опять тарже эл.-дв. сила $\frac{n_2}{n_1} E_1$. Но на дѣлѣ при выключеніи элемента цѣпь размыкается въ ab (фиг. 1); если бы это привело (вслѣдствіе невозможности замедляющаго тока) къ мгновенному уничтоженію поля, т. е. еслибы потокъ исчезъ съ безконечно большою скоростью, то въ обѣихъ катушкахъ индуктировалась-бы одно мгновеніе безконечно большая эл.-движущая сила, которая создала бы мгновенный токъ, проносящій количество Q. И наше сознаніе не можетъ постичь безконечно быстраго достиженія конечныхъ результатовъ, и въ природѣ явленіе оказывается инымъ: Прежде всего опытъ показываетъ, что первичная катушка не можетъ быть мгновенно разомкнута, такъ какъ между контактными точками размыкателя появляется искра; пока существуетъ искра, цѣпь



Фиг. 1.

первичной катушки замкнута чрезъ нее; вслѣдствіе этого процессъ размыканія становится продолжительнымъ, и эл.-движущая сила, индуктируемая исчезающимъ полемъ, не безконечно велика. Не превращается ли вслѣдствіе этого процессъ размыканіи въ тожественный съ процессомъ замыканія? Опытъ показываетъ, что—нѣтъ; но было бы невозможно доказать это теоретически съ полною ясностью, такъ какъ явленіе искры еще далеко непонято. Можно лишь сказать, что для прохожденія искры, хотя бы самой короткой, необходимы извѣстные (до извѣстныхъ потенціаловъ) заряды на концахъ тѣхъ двухъ тѣлъ a и b, между которыми она проскакиваетъ *); для накопленіи этихъ зарядовъ нужно извѣстное время; въ теченіе этого времени, слѣдовательно, первичная цѣпь остается незамкнутой, и потому потокъ исчезаетъ быстрѣе, чѣмъ образуется.

У читателя можетъ явиться справедливое возраженіе: хотя первичная цѣпь остается незамкнутой, по ней проходитъ индуктированный токъ (заряжающій a и b), слѣдовательно, исчезновеніе N замедляется; но здѣсь токъ проходитъ меньшій, чѣмъ бы это было при замкнутой первичной обмоткѣ, т. к. въ ней, кромѣ эл.-дв. силы исчезающаго поля, дѣйствуютъ еще заряды тѣлъ a и b, производящіе эл.-дв. силу обратную той, которая шла отъ батареи, а, слѣдовательно, обратную эл.-дв. силѣ исчезающаго поля. Вотъ почему

*) Это обусловливается т. наз. сопротивленіемъ перехода электричествъ съ металическихъ частей a и b въ воздухъ.

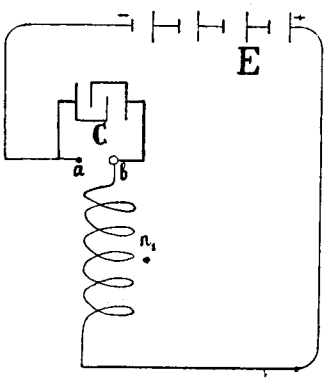
Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

поле исчезаетъ быстрѣе, чѣмъ слѣдуетъ по форм. 2—примѣнимой къ замкнутой цѣпи.

Токъ, заряжающій концы незамкнутой обмотки, даетъ ключъ къ истинному пониманію явленія размагничиванія разомкнутой катушки, совершенно уничтожая возможность того мгновеннаго процесса, о которомъ говорилось выше.

Итакъ, при размыканіи индуктированная эл.-дв. сила больше, чѣмъ при замыканіи.

5. Большимъ усовершенствованіемъ въ катушкѣ Румкорфа является конденсаторъ Физо, включаемый между точками a и b, какъ показано на схемѣ (C на фиг. 2); присутствіе этого



Фиг. 2.

конденсатора должно еще болѣе увеличить эл.-дв. силу размыканія. Дѣйствительно, конденсаторъ C долженъ быть заряженъ вмѣстѣ съ a и b; его присутствіе какъ бы увеличиваетъ емкость этихъ двухъ тѣлъ; для сообщенія имъ заряда, необходимаго для прохожденіи искры, требуется теперь бо́льшее количество электричества, чѣмъ было безъ конденсатора; слѣдовательно, бо́льшая часть потока N исчезнетъ при благопріятныхъ для скорости его исчезновенія условіяхъ — при существованіи обратной эл.-дв. силы конденсатора въ цѣпи, незамкнутой искрою. Можно на столько увеличить емкость C, что всего количества Q не будетъ достаточно для достаточнаго ея заряженія; тогда между a и b не будетъ искры. Дальнѣйшее увеличеніе C можетъ быть уже невыгоднымъ, т. к. количество Q заряжаетъ тогда конденсаторъ все до болѣе незначительной разности потенціаловъ, которая, какъ мы видѣли, играетъ роль желательнаго противодѣйствія эл.-дв. силѣ самоиндукціи.

Заряды конденсатора разряжаются, наконецъ, чрезъ искру, если C недостаточно великъ, или чрезъ самую первичную обмотку n_1, если искра не можетъ произойти; въ этомъ послѣднемъ случаѣ токъ разряда начнется съ того момента, когда эл.-дв. сила конденсатора сдѣлается уже настолько большою, что превыситъ эл.-дв. силу самоиндукціи. Токъ разряда, направляющійся отъ b къ a (на фиг. 2), ускоритъ уничтоженіе оставшагося потока и, кромѣ того, можетъ произвести магнитный потокъ обратнаго направленія. Пока мы не будемъ разсматривать, что произойдетъ съ этимъ обратнымъ потокомъ; достаточно лишь упомянуть, что дѣйствіе тока, разряжающаго конденсаторъ, увеличиваетъ скорость исчезновенія N.

Опыты дѣйствительно показываютъ, что присутствіе конденсатора увеличиваетъ эл.-дв. силу во вторичной обмоткѣ, и что увеличеніе C все уменьшаетъ искру въ промежуткѣ ab; наконецъ, недавніе опыты Мизуно, Беатти и др. показали, что увеличеніе C далѣе нѣкотораго предѣла снова уменьшаетъ вторичную эл.-дв. силу, что, слѣдовательно, для C дѣйствительно существуетъ наивыгоднѣйшая величина.

Въ прежнее время въ объясненіи дѣйствія конденсатора Физо рядомъ съ вѣрными мыслями повторялись совсѣмъ ложныя утвержденія; такъ, напр. въ учебникѣ Мюллера (изд. 1857 г.) говорится, что при конденсаторѣ нѣтъ обратнаго тока (т. II, стр. 391); въ физикѣ Гано (изд. 1887 г. р. 1302) спутаны понятія экстратока и исчезновенія магнетизма; въ Физикѣ Ферне (Fernet, изд. 1893, р. 723) эти понятіи менѣе спутаны, но все таки явленіе остается невыясненнымъ. Флеммингъ въ своемъ извѣстномъ трудѣ: Alternating Current Transformers ролью конденсатора Физо считаетъ обратный токъ.

6. Къ приведенному выше разсужденію слѣдуетъ сдѣлать еще слѣдующія добавленія: Мы разсматривали индуктированный токъ въ разомкнутомъ проводникѣ, какъ заряжающій его концы, или конденсаторъ у его концовъ; но вѣдь, весь проводникъ представляетъ собою конденсаторъ: каждый витокъ обмотки относительно сосѣднихъ витковъ, съ изолирующимъ слоемъ въ промежуткѣ, представляетъ извѣстную емкость. Дѣло весьма усложнилось бы, еслибы мы разсматривали, что индуктированный токъ сообщаетъ заряды всѣмъ этимъ емкостямъ, т. к. пришлось бы разсматривать не токи, идущіе отъ конца къ концу по всей обмоткѣ (плюсъ электричество на фиг. 2 отъ a чрезъ обмотку въ b и отрицательн. эл. въ обратномъ направленіи), но безконечно разнообразные токи, заканчивающіеся во всевозможныхъ ея точкахъ.

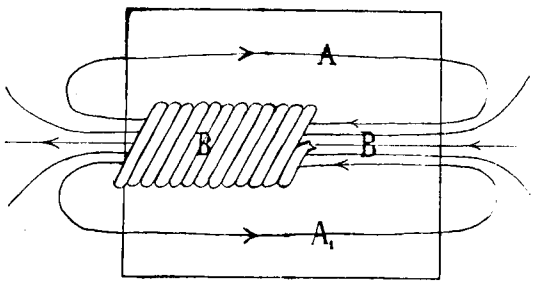
7. Во-вторыхъ, при размыканіи цѣпи, пока a (фиг. 2) удаляется отъ b, можетъ проскочить не одна, а нѣсколько искръ, если индукціонный токъ первичной обмотки успѣваетъ нѣсколько разъ конденсатору ab сообщить заряды, соотвѣтствующіе искрамъ при различныхъ разстояніяхъ a отъ b. Число отдѣльныхъ искръ и разстоянія по времени между ними сложно зависитъ отъ перемѣнной скорости молоточка a, хода измѣненія индукціоннаго тока, и закона, опредѣляющаго зависимость между этими явленіями и длиною искры съ одной стороны и заряда, необходимаго для пробиванія искры — съ другой. Этотъ вопросъ отчасти можетъ быть рѣшенъ помощью математики, вполнѣ-же неразрѣшимъ еще въ настоящее время. Каждая искра въ первичной цѣпи производитъ, какъ показано выше (§ 4), измѣненіе въ скорости исчезновенія поля, а, слѣдовательно,

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

измѣненіе величины электродвижущей силы вторичной обмотки.

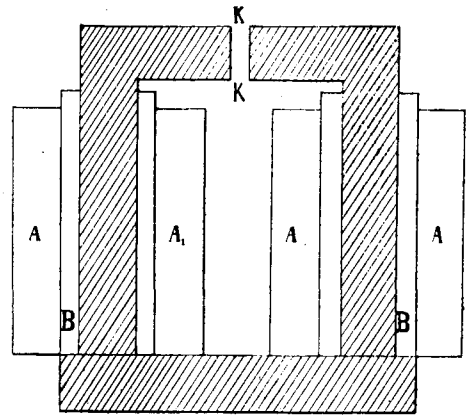
Кромѣ образованія искры въ промежуткѣ ab, могутъ происходить другія формы разряда въ зависимости, напр., отъ металла электродовъ a и b; такъ Беатти наблюдалъ образованіе вольтовой дуги при электродахъ изъ платины и мѣди и при отсутствіи конденсатора Физо; этимъ онъ объяснилъ уменьшеніе вторичной электродвижущей силы при увеличеніи сопротивленія r_1 первичной, хотя увеличеніе r_1 должно было-бы вызвать болѣе скорое исчезновеніе поля, какъ показываетъ форм 2 *). Вольтова дуга дѣлала первичную цѣпь замкнутой (болѣе приближала ее къ замкнутой, чѣмъ искра). Явленія не наблюдалось при электродахъ угольныхъ, цинковыхъ, а при свинцовыхъ наблюдалось обратное. При различныхъ r_1 Беатти пропускалъ чрезъ первичную обмотку токъ все одной и той-же силы (2,5 амп.), соотвѣтственно, мѣняя число аккумуляторовъ (величину E).

8. Въ-третьихъ, обращаемся къ характеру магнитнаго потока, создаваемаго первичною обмоткой. Во всемъ предыдущемъ мы предполагали, что всѣ силовыя линіи, образующіяся или исчезающія внутри ея, образуются или исчезаютъ и внутри вторичной катушки. Это предполагаетъ такое устройство катушки, при которомъ силовыя линіи не выходятъ изъ концовъ первичной обмотки, замыкаясь внутри вторичной, образуя въ ней поле обратнаго направленія, уменьшающее главное поле, т.-е. при которомъ не существуетъ силовыхъ линій, подобныхъ двумъ на фиг. 3,



Фиг. 3.

гдѣ A и A_1 изображаетъ сѣченіе вторичной обмотки, а B—первичной. При большей толщинѣ обмотокъ AA_1 такое устройство, можетъ быть, лучше всего достигается пріемомъ, описаннымъ Клингельфусомъ (изъ Базеля) въ Drude's Annalen der Physik und Chemie, 1901 г. № 8 (фиг. 4). Заштрихованная часть представляетъ сердечники изъ мягкаго желѣза и ихъ продолженіе (первичная и вторичная обмотки раздѣлены каждая на двѣ отдѣльныя катушки); силовыя линіи проходятъ по этимъ частямъ прибора, какъ представляющимъ наименьшее магнитное сопротивленіе, и дѣйствительно является весьма малая возможность ихъ замыканію чрезъ вторичную обмотку. Клингельфусъ приводитъ слѣдующую таблицу, доказывающую преимущества такого «замкнутаго» сердечника: при одной и той-же



Фиг. 4.

первичной обмоткѣ и различныхъ числахъ витковъ вторичной (n_2), катушки давали искры l_1 и l_2 въ сантиметрахъ, смотря по тому, былъ-ли сердечникъ замкнутъ или нѣтъ:

n_2	6000	10000	14000	18000	20000
l_1	7,5	17,5	27,5	37,5	42,5
l_2	6	11	16	21	33,5

Мы видимъ, какъ и слѣдовало ожидать, что замкнутый сердечникъ особенно выгоденъ при большемъ n_2, т.-е. для толстыхъ катушекъ. Для очень большихъ разностей потенціаловъ, соотвѣтственныхъ искрамъ 40—100 см., схема фиг. 4 оказалась неудобной, такъ какъ приходилось особеннымъ образомъ изолировать вторичныя катушки одна отъ другой. Клингельфусъ примѣняетъ въ этихъ случаяхъ сердечники квадратнаго сѣченія съ весьма небольшимъ отношеніемъ стороны квадрата къ длинѣ сердечника (отъ $\frac{1}{20}$ до $\frac{1}{12}$); и это позволяетъ ему значительно уменьшить число n_2 въ сравненіи съ обычнымъ типомъ катушекъ. Такъ, фирма Карпантье (по Клингельфусу) изготовляетъ катушки для искры 40—45 см. (около 200000 вольтъ) съ $n_2 = 153000$, тогда какъ Базельскій конструкторъ для той-же искры пользуется лишь $n_2 = 38000$ *). Искру въ 1 метръ получаетъ онъ отъ $n_2 = 84000$ (сопрот. 40000 омовъ). Большое сѣченіе сердечника относительно его длины, какъ и соединительныя желѣзныя части схемы фиг. 4, уменьшаютъ вообще магнитное сопротивленіе прибора. Но нужно имѣть въ виду, что это уменьшеніе, или увеличеніе потока N при томъ-же токѣ i, увеличивая Q (форм. 1), съ другой стороны уменьшаетъ

*) Вѣрность этого соображенія доказывалъ токъ замыканія: вторичная электродвижущая сила замыканій увеличивалась съ увеличеніемъ первичнаго сопротивленія (Philos. Mag. 1900, № 302).

*) Сообразно этому уменьшается и сопротивленіе вторичной катушки вмѣсто 50000 омовъ у Карпантье, всего—около 3000 омовъ у Клингельфуса.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

электродвижущую силу индукціи, какъ это видно изъ формулы (2). Въ виду этого вреднаго значенія большого потока Клингельфусъ и дѣлаетъ воздушный промежутокъ kk (фиг. 4), увеличивающій во много разъ сопротивленіе магнитной цѣпи и мало измѣняющій общее направленіе силовыхъ линій потока N.

9. Наконецъ, въ четвертыхъ, укажемъ еще на нѣкоторыя, опущенныя въ предыдущемъ, черты взаимнодѣйствія обѣихъ катушекъ; говоря о причинахъ, вліяющихъ на скорость измѣненія потока N_1 мы разсматривали въ §§ 3 и 4 только токъ первичной обмотки; но, вѣдь, въ это-же время индуктируется того же направленія токъ и во вторичной обмоткѣ; онъ производитъ также свое поле, мѣшающее измѣненію N. Однако дѣйствіямъ этого поля на явленіе въ первичной катушкѣ («взаимной индукціей вторичной обмотки на первичную») обыкновенно пренебрегаютъ; такъ поступалъ г. осковскій проф. Колли въ своемъ замѣчательномъ изслѣдованіи катушки Румкорфа, сообщенномъ на петербургскомъ Съѣздѣ Естествоиспытателей 1890 года; такъ поступаетъ, напр. и Друде въ своей Physik des Aethers. Причины этого пренебреженія слѣдующія: вторичная катушка имѣетъ столь большое сопротивленіе, что по ней проходятъ лишь слабые токи; кромѣ того, она обыкновенно разомкнута, что еще болѣе, какъ мы видѣли, ослабляетъ индуктированный токъ. Наконецъ, магнитное поле, образуемое ею, измѣняется медленно, потому что величина $\frac{r_2}{L_2}$, гдѣ L_2— огромная самоиндукція вторичной катушки, мала; это не противорѣчитъ утвержденію о большой величинѣ r_2, т. к. число витковъ n_2, которому пропорціональна r_2, входитъ въ L_2 во второй степени; слѣдовательно, по той же причинѣ, по которой r_2 велико, $\frac{r_2}{L_2}$ мало. Въ виду всего этого токъ, индуктируемый въ первичной обмоткѣ полемъ, создаваемымъ вторичной обмоткой, ничтоженъ. Но, легко понять, что отнюдь нельзя пренебрегать дѣйствіемъ этого поля на саму вторичную катушку; вѣдь, это дѣйствіе и выражается въ малости величины $\frac{r_2}{L_2}$, важной по своимъ слѣдствіямъ; слабое и медленно измѣняющееся поле ничтожно дѣйствуетъ на первичную обмотку, имѣющую небольшое число витковъ, но въ сотни разъ значительнѣе дѣйствуетъ на вторичную обмотку съ большимъ n_2.

Для полноты представленія явленій во вторичной катушкѣ необходимо еще замѣтить, что первоначальная причина тока во вторичной катушкѣ иного характера, чѣмъ въ первичной; эта послѣдняя или замыкается на постоянную эл.-дв. силу E батареи, или вдругъ лишается этой E, тогда какъ вторичная катушка при обоихъ процессахъ замыканія и размыканія находится подъ продолжительной эл.-дв. силой, происходящей отъ измѣненія потока N, причемъ это измѣненіе уже вслѣдствіе явленій только въ первичной катушкѣ бываетъ очень сложнаго характера. Наконецъ, относительно вторичной обмотки можно еще замѣтить, что силовыя линіи потока N, движущіяся при измѣненіи потока по радіусамъ (оставаясь параллельными длинѣ сердечника) не пересѣкаютъ въ дѣйствительности всѣ n_2 вторичныхъ витковъ одновременно, какъ это предполагается въ расчетахъ, такъ какъ эти витки занимаютъ собою нѣсколько слоевъ; это особенно важно для очень большихъ катушекъ съ большимъ числомъ слоевъ вторичной обмотки. Это явленіе прежде всего влечетъ за собою уменьшеніе вторичной эл.-дв. силы.

Если существуютъ силовыя линіи, подобныя двумъ на фигурѣ 4 (§ 8), то онѣ индуктируютъ эл.-движущую силу только въ тѣхъ виткахъ, которые онѣ пересѣкаютъ при своемъ образованіи (когда движутся отъ первичной ко вторичной) или исчезновеніи (когда движутся въ обратномъ направленіи).

10. Въ § 5 мы пришли къ мысли о томъ, что разрядъ конденсатора создаетъ потокъ направленія обратнаго первоначальному потоку. Примѣнивъ предыдущія разсужденія къ этому новому потоку, мы найдемъ, что при его исчезаніи, будетъ индуктироваться токъ обратный первоначальному, и будетъ перезаряжаться конденсаторъ, разрядъ котораго опять создастъ обратный потокъ, т. е. уже того же направленія, какое было у первоначальнаго, и т. д. Короче говоря, мы пришли къ представленію объ электрическихъ колебаніяхъ въ первичной обмоткѣ. Согласно ихъ теоріи, эти колебанія будутъ происходить съ періодомъ $T_1 = 2\pi\sqrt{L_1C_1}$; при этомъ, чрезъ каждую четверть періода будетъ чередоваться явленіе наибольшаго тока съ явленіемъ наибольшей разности потенціаловъ у зажимовъ конденсатора, причемъ и то, и другое будетъ съ каждымъ періодомъ уменьшаться въ

$$e^{r_1\sqrt{C_1/L_1}} \text{ разъ} \ldots\ldots (3).$$

На стран. 267 могло явиться представленіе, что обратнаго потока можетъ и не произойти при извѣстномъ соотношеніи между N_1, C_1 и другими величинами; теорія колебаній показываетъ, что разрядъ одиночный можетъ дѣйствительно имѣть мѣсто, но лишь при $r_1 > 2\sqrt{\frac{L_1}{C}}$,—это условіе не бываетъ вообще выполнено въ первичной обмоткѣ Румкорфовой катушки.

Соображеніе объ электрическихъ колебаніяхъ въ первичной обмоткѣ должно было необходимо явиться и въ теоріи Румкорфова прибора въ наше время, когда физики наблюдаютъ и изучаютъ теоретически колебанія во всякомъ проводникѣ, который предоставленъ самому себѣ послѣ дѣйствія въ немъ электродвижущей силы, какого бы происхожденія ни была эта послѣдняя *).

*) См. Электричество. 1899 г., № 2, стр. 33.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Съ полнымъ основаніемъ это же соображеніе должно быть примѣнено и ко вторичной обмоткѣ; и въ ней эл.-дв. сила, индуктируемая измѣняющимся полемъ, вызываетъ колебанія со свойственнымъ ей періодомъ $T_2 = 2\pi\sqrt{L_2C_2}$, затухающія такъ, что разность ея потенціаловъ съ каждымъ періодомъ уменьшается въ

$$e^{r_2\sqrt{C_2/L_2}} \text{ разъ} \ldots\ldots (3').$$

Колебанія вторичной катушки не будутъ происходить въ чистомъ видѣ, такъ какъ, какъ мы уже упоминали, электрическія явленія въ ней вызываются не мгновеннымъ импульсомъ, но колебательнымъ — соотвѣтственно колебаніемъ первичной обмотки; на самостоятельныя колебанія вторичной накладываются колебанія, индуктированныя первичною. Эти послѣднія однако скорѣе затухаютъ, чѣмъ ея самостоятельныя колебанія, какъ это уясняется сравненіемъ формулъ (3) и (3').

Въ этомъ разсужденіи снова опускается разсмотрѣніе взаимодѣйствія вторичной обмотки на первичную; еслибы мы приняли его во вниманіе, то не могли бы уже сказать, что на вторичныя колебанія налагаются неизмѣненныя первичныя, а должны были бы принять во вниманіе ихъ искаженіе явленіями во вторичной обмоткѣ.

Упрощенную теорію колебаній въ обмоткахъ Румкорфовой катушки впервые установилъ проф. Колли въ упомянутой выше работѣ.

11. Теорія электрическихъ колебаній существенно измѣняетъ взглядъ на явленіе въ катушкѣ Румкорфа. Въ рядѣ статей Drude's Annalen за 1900 и 1901 гг. Іонсонъ предлагаетъ попытку развитія этого новаго взгляда.

Причину существованія наивыгоднѣйшей величины C онъ объясняетъ слѣдующимъ образомъ: теорія колебаній показываетъ, что наибольшая величина E_m, до которой достигаетъ эл.-дв. с. конденсатора (точекъ a и b на фиг. 2), выражается

$$E_m = a\frac{E}{r_1}\sqrt{\frac{L_1}{C}} \ldots (4).$$

если мы назовемъ чрезъ e электродвижущую силу, необходимую для пробиванія искрою промежутка ab, то можемъ сказать, что выраженіе: $E_m \geqq e$ представляетъ условіе необходимое для существованія искры въ первичной обмоткѣ. Разъ прошедшая искра поглощаетъ большую часть энергіи этой обмотки, и дальнѣйшія колебанія въ ней происходятъ уже ничтожно малыми; чѣмъ больше E_m, тѣмъ въ болѣе раннюю часть періода это случится. Если мы настолько увеличимъ C, что E_m станетъ меньше e, то искра будетъ уже невозможной. Дальнѣйшее увеличеніе C поведетъ къ напрасному уменьшенію E_m обратно пропорціональному $\sqrt{C_1}$, какъ показываетъ формула (4). Величина E_m даетъ возможность заключить о величинѣ электродвижущей силы во вторичной обмоткѣ: опыты Клингельфуса довольно постоянно подтверждаютъ, что отношеніе электродвижущихъ силъ вторичной и первичной искры равно отношенію $\frac{n_2}{n_1}$. Съ другой стороны, опыты Мизуно показали, что электродвижущая сила, образовывающая вторичную искру, пропорціональна $\frac{E}{r_1\sqrt{C}}$, что совершенно согласно съ выраженіемъ для величины E_m (формула 4) для того случая, когда емкость C настолько велика, что искръ уже не проскакиваетъ; такимъ образомъ и это показываетъ, что вторичная электродвижущая сила пропорціональна величинѣ E_m.

12. Весьма интересною частью изслѣдованій Іонсона является та, гдѣ онъ доказываетъ, что при процессѣ размыканія вторичная искра, вообще говоря, состоитъ изъ цѣлаго ряда искръ и выводитъ выраженіе для промежутка времени между этими искрами вторичной обмотки. Въ этомъ выводѣ, привести который здѣсь мы не можемъ, Іонсонъ получаетъ, что въ первичной обмоткѣ происходятъ затухающія колебанія (C полагается настолько большой, что $E_m < e$); при этомъ, такъ какъ Іонсонъ принялъ во вниманіе «взаимодѣйствіе вторичной обмотки на первичную» (см. § 9), періодъ этихъ колебаній получился $T = 2\pi\sqrt{L_1C_1\left(1-\frac{L_1L_2}{M^2}\right)}$, гдѣ M и опредѣляетъ это взаимодѣйствіе *). Емкость вторичной катушки Іонсонъ предположилъ малой (емкость тѣхъ электродовъ, между которыми проскакиваетъ искра) и искру ея очень короткой, а, слѣдовательно, разность потенціаловъ E_2, необходимую для этой искры, весьма малою. При такихъ условіяхъ, вторичная катушка не имѣетъ собственнаго періода колебаній, въ ней лишь индуктируются колебанія съ періодомъ T. Далѣе Іонсонъ разсчитываетъ, чрезъ какіе промежутки времени электроды вторичной катушки заряжаются до E_2; эти промежутки для ряда послѣдовательныхъ искръ оказываются неравными, а именно періодически измѣняющимися, причемъ максимумы этихъ періодовъ все удлиняются, сообразно затуханію первичныхъ колебаній. Эти выводы представляютъ теоретическое обоснованіе многихъ, наблюденныхъ разными авторами, явленій: такъ, Франке, Вальтеръ и другіе наблюдали, что искра вторичной обмотки, соотвѣтствующая размыканію первичной, состоитъ изъ большого числа искръ. Моллъ считалъ **) промежутки

*) Мы видимъ, что Іонсонъ пришелъ къ иному виду формулы для T, чѣмъ видъ, упомянутый въ § 10. По его формулѣ T выходитъ гораздо меньшимъ, если M близко къ $\sqrt{L_1L_2}$. Не этимъ ли объясняется успѣхъ катушекъ Клингельфуса, устройство которыхъ дѣйствительно приближаетъ M къ этой величинѣ, и, слѣдовательно, дѣлаетъ періодъ колебаній въ нихъ очень малымъ.

**) Онъ фотографировалъ разрядъ на вращающуюся фотографическую пластинку, вслѣдствіе чего отдѣльныя искры отпечатались въ различныхъ мѣстахъ пластины, на разстояніяхъ соотвѣтственныхъ промежутку времени, протекшему между моментами ихъ появленія, и скорости вращенія пластины.

Электронная библиотека универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

времени между искрами; они оказались измѣняющимися согласно теоріи Іонсона (опыты Молла были произведены раньше этой теоріи); вотъ, напр. списокъ этихъ промежутковъ въ одномъ рядѣ опытовъ:

0,000325	секунды
0,000343	«
0,000423	«
0,000323	«
0,000453	«
0,000415	«
0,000473	«

Мы видимъ, что максимальные промежутки времени все удлиняются (423, 453, 473).

Самому Іонсону удалось слѣдующимъ прямымъ методомъ убѣдиться въ существованіи колебаній во вторичной цѣпи: онъ включаетъ въ нее Волластоновскій вольтаметръ (съ электродами изъ тонкой платиновой проволоки), наполненный подкисленной водой; при дѣйствіи катушки онъ наблюдалъ выдѣленіе гремучаго газа у обоихъ электродовъ вольтаметра; можно было-бы приписать выдѣленіе кислорода и водорода у каждаго электрода дѣйствію обратныхъ токовъ — замыканія и размыканія, но непосредственные опыты убѣдили его, что токъ замыканія не производитъ разложенія; отсюда слѣдуетъ, что «токъ размыканія» состоитъ изъ противоположныхъ токовъ, т.-е. имѣетъ колебательный характеръ. Кстати замѣтимъ, что количества выдѣленнаго гремучаго газа были на двухъ электродахъ не одинаковыя, такъ, напр. 2,12 кб. см. на одномъ и 1,44 кб. см.—на другомъ (отношеніе этихъ количествъ, почти равное 2, легко могло повести къ ошибочному заключенію, что на первомъ электродѣ выдѣляется H_2, на второмъ O); это неравенство объясняется неодинаковымъ дѣйствіемъ магнитнаго потока на внутренніе и внѣшніе слои вторичной обмотки (см. § 9); дѣйствіемъ пирогаллокислаго натра эти количества были низведены соотвѣтственно до 1,19 кб. см. и 0,81 кб. см., т. е. поглощеніемъ кислорода гремучая смѣсь дѣйствительно низводилась до объема равнаго двумъ третямъ предыдущаго объема.

Наконецъ, и Клингельфусъ наблюдая, правда, грубымъ методомъ *), сложный разрядъ катушки Румкорфа, нашелъ, что онъ состоитъ изъ отдѣльныхъ искръ, появляющихся чрезъ періоды времени, обратно пропорціональные $\sqrt{C}$. Въ его опытахъ эти періоды были порядка 0,0001 до 0,0015 секунды.

16. Іонсонъ примѣнилъ теорію колебательнаго разряда и къ процессу замыканія первичной цѣпи; въ этомъ случаѣ конденсаторъ C, бывшій заряженнымъ до разности потенціаловъ E при разомкнутой цѣпи, вдругъ замыкается проводникомъ ab (фиг. 2); онъ разряжается и при этомъ происходятъ колебанія въ цѣпи, замыкающей его, отвѣтвляющіяся въ цѣпь n_1 и налагающіяся на явленія, происходящія въ ней.

17. Теорія колебаній измѣняетъ взглядъ на дѣйствіе катушки Румкорфа и значеніе ея частей; даже подъ сопротивленіемъ ея обмотокъ въ случаѣ колебаній слѣдуетъ понимать не то обыкновенное сопротивленіе, измѣряемое при постоянномъ токѣ, но—гораздо большее, соотвѣтственно тому, что при быстрыхъ перемѣнахъ токъ протекаетъ не по всей толщѣ проводника, а лишь по поверхностному слою; слой этотъ—все тоньше съ увеличеніемъ числа перемѣнъ въ секунду; сообразно этому съ момента прерыванія первичной цѣпи, какъ говоритъ Іонсонъ, не все количество электричества, имѣвшееся въ проводникѣ, соотвѣтственное току $i = \frac{E}{r_1}$, придетъ въ колебаніе, но лишь то, которое занимаетъ поверхностный слой; остальное будетъ подлежать другимъ законамъ. Ошибка отъ пренебреженія этимъ обстоятельствомъ тѣмъ больше, чѣмъ короче періодъ $T = 2\pi\sqrt{LC}$; она больше для первичной, болѣе толстой, обмотки, чѣмъ для вторичной. Развитіе теоріи колебаній также связано съ развитіемъ ученія о разрядѣ, неизвѣстнаго пока даже въ своихъ основныхъ чертахъ; можно было бы, напр., основываясь лишь на томъ, что для прохожденіи искры необходима нѣкоторая опредѣленная разность потенціаловъ, а, слѣдовательно, нѣкоторые опредѣленные заряды ея электродовъ, ожидать, что при процессѣ замыканія должна появиться во вторичной обмоткѣ максимальная искра такой же длины, какъ при процессѣ размыканія, т. к. въ обоихъ случаяхъ индуктируется за все время процесса одинаковое (§ 2) количество Q; эту одинаковость подтверждаетъ и подробная теорія Іонсона. Опыты показываютъ, какъ различны искры обоихъ процессовъ, и говорятъ, слѣдовательно, о другой какой-то основной причинѣ искры, поднимая весьма смутный вопросъ о значеніи для ея пробиванія скорости наростанія заряда на электродахъ искрового промежутка.

Со времени Гертца мы думаемъ, что проводникъ, въ которомъ происходятъ электрическія колебанія, излучаетъ электромагнитныя волны, или, по крайней мѣрѣ, навѣрно знаемъ, что онъ производитъ электрическія колебанія въ другихъ проводникахъ, имѣющихъ одинаковый съ нимъ періодъ $T = 2\pi\sqrt{LC}$; это объясняетъ тѣ, иногда весьма интенсивныя свѣтовыя или чисто электрическія явленія, которыя часто наблюдаются въ проводникахъ, находящихся около дѣйствующей катушки Румкорфа, явленія, наблюденныя Генри еще въ тридцатыхъ годахъ прошлаго вѣка и изученныя впослѣдствіи проф. Боргманомъ.

В. К. Лебединскій.

*) Онъ ставилъ разрядникъ катушки на пути несильнаго потока воздуха, вслѣдствіе чего отдѣльныя искры разряда происходили одна надъ другой, какъ бы сдвинутыя потокомъ; въ такомъ видѣ онѣ фотографировались; зная скорость воздуха и измѣряя разстоянія между отдѣльными отпечатками, можно было опредѣлить промежутки времени, протекающіе между отдѣльными искрами.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Расчетъ трансформаторовъ.

Статья В. Вудхауза.

При проектированіи трансформаторовъ обыкновенно приходится задаваться слѣдующими данными:

1. Мощность при данной частотѣ.
2. Отношеніе трансформированія, при полной нагрузкѣ.
3. Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія: не меньше, чѣмъ столько-то процентовъ.
4. Максимальное паденіе напряженія вторичной цѣпи.
5. Повышеніе температуры:—не должно превосходить столько-то градусовъ.
6. Сила тока при разомкнутой вторичной цѣпи.
7. Средства охлажденія трансформатора — (воздухомъ, масломъ, механической циркуляціей).

Указывая коэффиц. полезнаго дѣйствія и максимальную потерю напряженія слѣдуетъ указывать, напримѣръ—коэффиц. полезн. дѣйств. не долженъ быть меньше 95% въ цѣпи съ показ. мощности въ 0.8, гдѣ показ. мощн. есть косинусъ угла разности фазъ силы тока и электродвижущей силы (Cos φ). Коэф. п. д. обыкновенно гарантируется при половинѣ, трехъ-четвертяхъ и полной нагрузкѣ.

Способъ проектированія чисто опытный, такъ какъ вначалѣ выбираютъ извѣстную форму сердечника для даннаго расхода тока и затѣмъ анализируютъ результаты. Отношенія размѣровъ при этомъ легко измѣняются, пока, наконецъ, полученный результатъ не покажется наилучшимъ для слѣдующихъ условій:

1. Потеря, въ ваттахъ, въ желѣзѣ и мѣди.
2. Повышеніе температуры трансформатора.
3. Потеря напряженія вторичной цѣпи.
4. Стоимость матеріала и рабочихъ рукъ.

Размѣры сердечника.—Современные трансформаторы дѣлаются двухъ типовъ. Во первыхъ, такъ называемые „трансформаторы съ сердечниками", у которыхъ электрическая цѣпь короткая, а магнитная цѣпь—длинная; во вторыхъ-же—„панцырные трансформаторы", у которыхъ обѣ эти цѣпи приблизительно равны, а обмотка какъ-бы окружена сердечникомъ.

Преимущество перваго типа слѣдующія: 1) обмотка представляетъ изъ себя хорошую поверхность охлажденія; 2) доступность; 3) легкость обматыванія, такъ какъ въ этомъ случаѣ можно употреблять цилиндрическія катушки; 4) хорошая регулировка, благодаря небольшой длинѣ витковъ проволоки въ обмоткѣ. Неудобства же слѣдующія: бо́льшій вѣсъ мѣди и бо́льшая потеря матеріала при изготовленіи отдѣльныхъ листовъ.

Къ преимуществамъ второго типа относятся: 1) меньшая длина магнитной цѣпи и меньшій расходъ тока на намагничиваніе; 2) меньшая потеря металла при изготовленіи листовъ и меньшій вѣсъ мѣди. Къ неудобствамъ относится то обстоятельство, что катушки не доступны и охлаждающая поверхность меньше.

Сердечники перваго типа имѣютъ обыкновенно нижеслѣдующіе размѣры, при чемъ вѣтви квадратнаго сѣченія или же для возможнаго приближенія сѣченія сердечника къ круглой формѣ катушки употребляются составные сердечники изъ двухъ или трехъ частей (см. фиг. 5).

$L = 4{,}6w + 10$ см. ($= 4{,}6w + 4''$) *) и до $4{,}7w + 10$ см. ($= 4{,}7w + 4''$); $W = 3{,}2w + 2{,}5$ см. ($= 3{,}2 + 1''$).

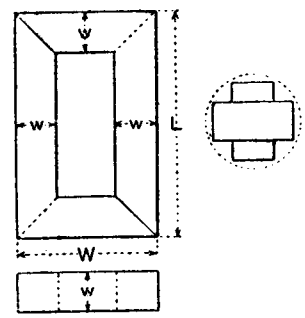
Сердечникъ дѣлается изъ отдѣльныхъ полосъ формы—L, которыя складываются попеременно то въ ту, то въ другую сторону.

*) Для удобства всѣ размѣры и цифровыя данныя будутъ приводиться въ метрахъ и дюймахъ.
Прим. Редакціи.

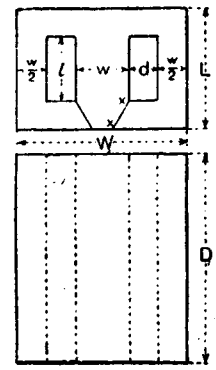
„Панцырные" сердечники наиболѣе распространены Вестингаузовскаго типа и размѣры ихъ слѣдующіе (фиг. 6).

$D = 3w$ . . . . . до $4w$
$l = 1w$ . . . . . до $1{,}2w$
$L = l + w$
$d = 0{,}5w$ . . . . до $0{,}6w$
$W = 2w + 2d = 3w$

Полосы разрѣзаются по линіямъ x, x и стороны отгибаются для пропуска обмотки, послѣ чего онѣ



Фиг. 5.



Фиг. 6.

снова загибаются назадъ. Каждая слѣдующая полоса кладется съ другой стороны, чѣмъ предыдущая, съ цѣлью чередованія стыковъ.

Токъ при работѣ трансформатора безъ нагрузки. — Хорошо спроектированный трансформаторъ не даетъ магнитной утечки при отсутствіи нагрузки.

Разсмотримъ перемѣнный токъ, максимальная сила котораго равна C_m, дѣйствующій въ первичной обмоткѣ.

Онъ возбуждаетъ въ сердечникѣ потокъ N, который увеличивается и уменьшается вмѣстѣ съ силой тока. Этотъ потокъ вызываетъ въ каждой обмоткѣ электродвижущую силу съ разностью фазъ въ 90°, которыя мы назовемъ E_1 и E_2. Электродвижущую силу первичной обмотки E_1 можно принять равной электродвижущей силѣ всей цѣпи, такъ какъ потерь съ практической точки зрѣнія можно не принимать во вниманіе. Максимальная величина E_1 пропорціональна максимальной величинѣ N, числу періодовъ въ секунду f, и числу первичныхъ витковъ T_1 т. е.

Электродв. сила въ сѣти =

$$= E_1 = N \times f \times T_1 \times 2\pi \times 10^{-8} \text{ вольтъ.}$$

Принимая синусоидальную форму волны и дѣля на $\sqrt{2}$, получаемъ дѣйствующую электродвижущую силу:

$$E_1 = 4{,}45 \times N \times f \times T_1 \times 10^{-8} \text{ вольтъ.}$$

Точно также получимъ:

$$E_2 = 4{,}45 \times N \times f \times T_2 \times 10^{-8} \text{ вольтъ}$$

гдѣ T_2—число витковъ вторичной обмотки.

Раздѣливъ первое выраженіе на второе, получимъ:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Это справедливо лишь до тѣхъ поръ, пока не разсматриваемъ обыкновеннаго нагруженнаго трансформатора, такъ какъ здѣсь напряженіе тока вслѣдствіе потерь уменьшается и потокъ N также убываетъ вслѣдствіе утечки, прежде чѣмъ онъ достигнетъ вторичной обмотки. Въ этомъ случаѣ отношеніе числа витковъ первичной и вторичной обмотокъ не равно отношенію напряженій тока въ нихъ.

Намагничивающій токъ.—Фиг. 7 предста-

Владимирская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

вляетъ діаграмму для трансформатора, не имѣющаго потерь и нагруженнаго не индуктивной нагрузкой.

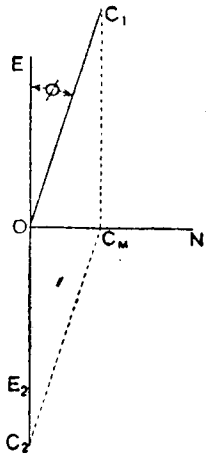
Пусть ON представляетъ потокъ въ сердечникѣ. OC_m — въ одной фазѣ съ нимъ, сила намагничивающаго тока, который его возбуждаетъ. Если сила тока OC_2 (въ фазѣ со вторичной электродвижущей силой и, слѣдовательно, на 90° отъ OC_m) будетъ проходить по вторичной обмоткѣ, то величина и фаза силы первичнаго тока получается въ видѣ вектора OC_1, дополняющаго параллелограммъ $OC_1 C_m C_2$, откуда видно, что сила намагничивающаго тока трансформатора есть равнодѣйствующая силъ первичнаго и вторичнаго токовъ.

Мощность, сообщаемая трансформатору =

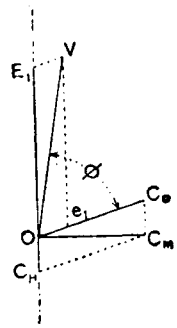
$$= E_1 \times C_1 \times Cos\,\varphi.$$

Мощность, отдаваемая имъ $= E_2 \times C_2$.

Діаграмма для трансформатора съ потерями въ желѣзѣ и мѣди безъ нагрузки показана на фиг. 8.



Фиг. 7.



Фиг. 8.

Пусть V — напряженіе первичной сѣти, въ вольтахъ.

P_h — ватты, потерянные на гистерезисъ и токи Фуко въ сердечникѣ.

При этомъ сила тока гистерезиса будетъ:

$$C_h = \frac{P_h}{V}$$

Этотъ токъ дѣйствуетъ совершенно, какъ вторичный токъ, такъ какъ пластинки сердечника можно разсматривать, какъ маленькія вторичныя цѣпи.

Начертимъ OC_m — силу намагничивающаго тока; OC_h на 90° отъ нея = силѣ тока гистерезиса; векторъ, представляющій сумму ихъ, OC_0, будетъ выражать силу тока при работѣ безъ нагрузки; она будетъ равна:

$$C_0 = \sqrt{C_h{}^2 + C_m{}^2}$$

Если P—потеря, въ ваттахъ, на явленіе Джоуля въ первичной обмоткѣ, при силѣ тока C_0, то потеря въ вольтахъ будетъ:

$$e = \frac{P}{C_0}$$

и проведя O_e въ фазѣ съ C_0, мы получаемъ OV—напряженіе въ главныхъ проводахъ первичной сѣти, какъ равнодѣйствующее OE, O_e. Мощность поглощаемая трансформаторомъ безъ нагрузки =

$$= V \times C_0 \times Cos\,\varphi.$$

Въ большинствѣ случаевъ, въ отсутствіи нагрузки, величиной e можно пренебречь.

Вычисленіе силы тока при работѣ безъ нагрузки. Сила намагничивающаго тока. Пусть C_m — дѣйствующая величина намагничивающаго тока.

N — максимальный магнитный потокъ въ сердечникѣ.

l — средняя длина магнитной цѣпи, въ сантиметрахъ.

A — дѣйствующее поперечное сѣченіе сердечника, въ квадр. см.

B — наибольшая индукція, выраженная числомъ силовыхъ линій на квадр. см. $= \frac{N}{A}$.

По кривой намагничиванія сорта желѣза, примѣненнаго для даннаго случая, находимъ число амперъ-витковъ на каждый см. длины для индукціи B и тогда

$$C_m = \frac{\text{амп. витки на см.} \times l \times T_1}{1{,}41}$$

Токъ гистерезиса. Токъ, теряющійся на токи Фуко пропорціоналенъ: B^2, квадрату частоты и квадрату толщины отдѣльной пластины. Его величины меньше для нечистаго желѣза, чѣмъ для чистаго, потому что потеря пропорціональна удѣльному сопротивленію, и по этой же самой причинѣ она немного уменьшается при повышеніи температуры. Для пластины въ 0,35 мм. толщины изъ лучшаго желѣза эта величина найдется изъ формулы: Потеря въ ваттахъ на килогр. вѣса =

$$= 0{,}0365 \left(\frac{f}{100} \times \frac{B}{1000}\right)^2 {}^{*)}$$

Для пластины же любой толщины t потеря въ ваттахъ**) на кгр. $= 3{,}1 t^2 f^2 B^2 \times 10^{-9}$.

Потеря на гистерезисъ пропорціональна частотѣ и $B^{1,5}$; величина ея не зависитъ ни отъ толщины пластинъ, ни отъ повышенія температуры въ предѣлахъ, допустимыхъ для работы. Она увеличивается съ теченіемъ времени, при продолжительномъ нагрѣваніи и до нѣкоторой степени — съ увеличеніемъ напряженія. Всякое желѣзо, примѣняемое для трансформатора, должно быть тщательно изслѣдовано на увеличеніе потерь при продолжительной работѣ отъ старости. Для каждаго отдѣльнаго сорта желѣза можно вычертить кривую, показывающую потери ваттовъ въ зависимости отъ величины B при данной частотѣ тока.

Фиг. 9 даютъ подобныя кривыя для пластины лучшаго англійскаго желѣза, 0,35 мм. (0,014 д.) толщиной, при 100 періодахъ въ секунду. Потери при любой величинѣ B при 50 періодахъ, конечно, будутъ въ два раза меньше.

Теперь сложивъ потери ваттовъ на токи Фуко и потери ваттовъ на гистерезисъ — получимъ величину P_h. Зная же P_h, получимъ C_h по формулѣ

$$C_h = \frac{P_h}{V}.$$

Наконецъ, зная C_h, опредѣлимъ величину

$$C_0 = \sqrt{C_h{}^2 \times C_m{}^2}.$$

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія. Пусть P_k = суммѣ потерь въ мѣди въ обѣихъ обмоткахъ при всякой нагрузкѣ, P_h = полная потеря въ желѣзѣ, постоянная для всѣхъ нагрузокъ, $Cos\,\Theta$ = косинусъ угла отставанія фазъ вторичной цѣпи, измѣняющійся отъ 0,6—для двигателей—и до 1—для освѣщенія; тогда коэф. полезнаго дѣйствія =

$$= \frac{E_2 C_2\, Cos\,\Theta}{E_2 C_2\, Cos\,\Theta + P_k + P_h} \times 100$$

Нагрѣваніе трансформатора. Нагрѣва-

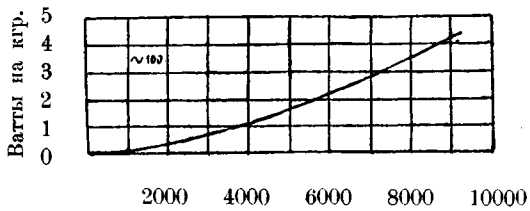
*) на англ. фунтъ $0{,}0004 \left(\frac{f}{100} \times \frac{B}{1000}\right)^2$

**) На англ. фунтъ $= 2\,(t \times f \times B)^2 \times 10^{-10}$.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

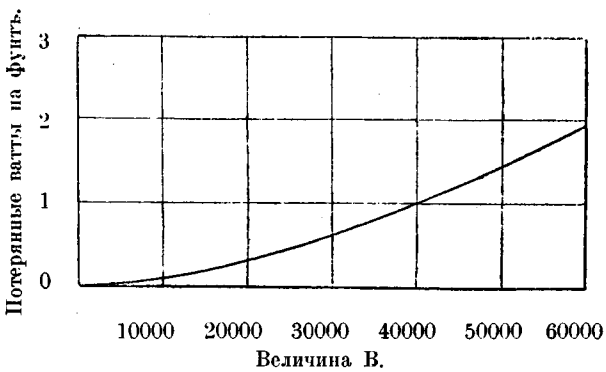
ніе зависитъ отъ: 1) количества ваттъ, потерянныхъ на единицу поверхности охлажденія, 2) условій охлажденія: закрытъ трансформаторъ или не закрытъ; съ масломъ онъ или безъ него; съ механической циркуляціей воды чрезъ трубы въ маслѣ; съ механической тягой воздуха и т. д.

Представимъ себѣ два одинаковые трансформатора, линейные размѣры одного изъ которыхъ въ n разъ превышаютъ линейные размѣры другого, затѣмъ, если величина B у нихъ будетъ одинакова, такъ



Толщина пластины 0,35 мм.

Фиг. 9a.



Толщина пластины 0,014 дюйм.

Потери на гистерезисъ на фунтъ желѣза при 100 період.

Фиг. 9b.

же какъ и мѣсто занимаемое ихъ обмотками, то охлаждающія поверхности ихъ будутъ относиться какъ $n^2:1$, тогда какъ мощности ихъ будутъ относиться какъ $n^3:1$. Отсюда видно, насколько важно въ большихъ трансформаторахъ стараться возможно понизить температуру.

Выразить нагрѣваніе трансформатора для данной величины отношенія

$$\frac{\text{потеря въ ваттахъ}}{\text{поверхность охлажденія}}$$

нѣсколько трудно, такъ какъ трансформаторъ съ плохо расположенной поверхностью охлажденія можетъ подвергаться весьма сильнымъ мѣстнымъ нагрѣваніямъ. Въ силу этого, охлажденіе масломъ имѣетъ за собой большое преимущество, такъ какъ распредѣляетъ нагрѣваніе по всему трансформатору. При примѣненіи одного воздушнаго охлажденія слѣдуетъ обращать особое вниманіе на подраздѣленіе катушекъ и устройство воздушныхъ ходовъ между ними; кромѣ того, необходимо также устраивать отверстія для циркуляціи воздуха въ сердечникѣ.

Если трансформаторъ устраивается съ закрытымъ кожухомъ, то поверхность послѣдняго должна быть не меньше чѣмъ у трансформатора, для чего, напримѣръ, можно снабдить кожухъ волнистой поверхностью. Вообще говоря, трансформаторы съ воздушнымъ охлажденіемъ должны заключаться въ кожуха, допускающіе свободную циркуляцію воздуха, (напр., открытые кожуха). Трансформаторы съ масломъ по необходимости должны быть закрыты. Большіе трансформаторы въ воздушнымъ охлажденіемъ иногда снабжаются небольшимъ вентиляторомъ съ двигателемъ, расходующими отъ 0,25% до 0,1% мощности самаго трансформатора.

При томъ условіи, чтобы отношеніе

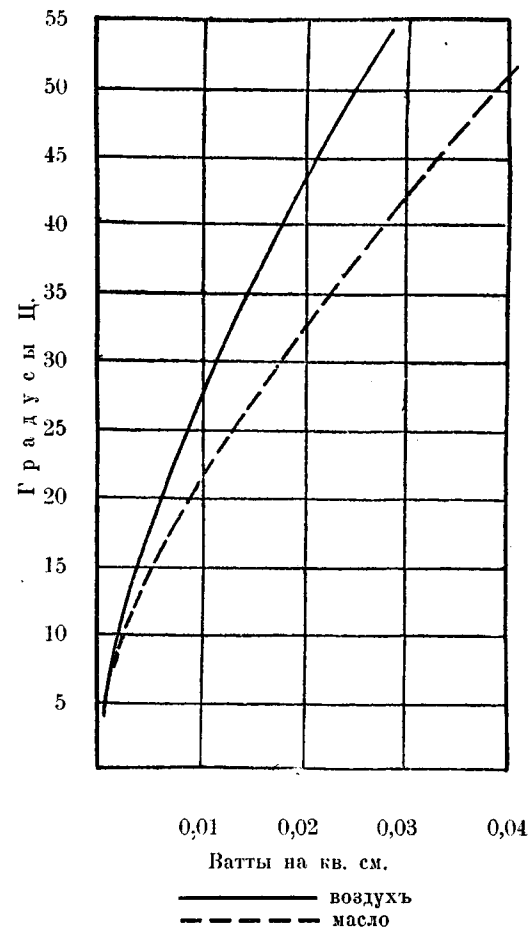
$$m = \frac{\text{полная потеря въ ваттахъ въ трансформаторѣ}}{\text{число квадр. см. охлаждающей поверхности}}$$

не превосходило 0,062 *) слѣдующія данныя будутъ достаточно точны:

Охлажденіе воздухомъ при естественной тягѣ.—Окончательное повышеніе температуры въ градусахъ Цельсія $571\ m^{2/3}$ **).

Охлажденіе масломъ. — Окончательная температура $428\ m^{2/3}$ ***).

Для каждаго подобнаго случая слѣдуетъ вычертить одну изъ кривыхъ, подобныхъ фиг. 10, которой и пользоваться при проектированіи.



Фиг. 10a.

Потеря напряженія.—По мѣрѣ того, какъ увеличивается вторичная сила тока C_2 трансформатора, разность потенціаловъ у зажимовъ V_2 падаетъ, когда сила тока находится въ одной фазѣ или отстаетъ отъ электродвижущей силы.

Если-же сила тока C_2 будетъ опережать электродвижущую силу болѣе чѣмъ на опредѣленный уголъ, эта разность потенціаловъ будетъ возрастать. Такая потеря напряженія зависитъ отъ потерь въ мѣди и

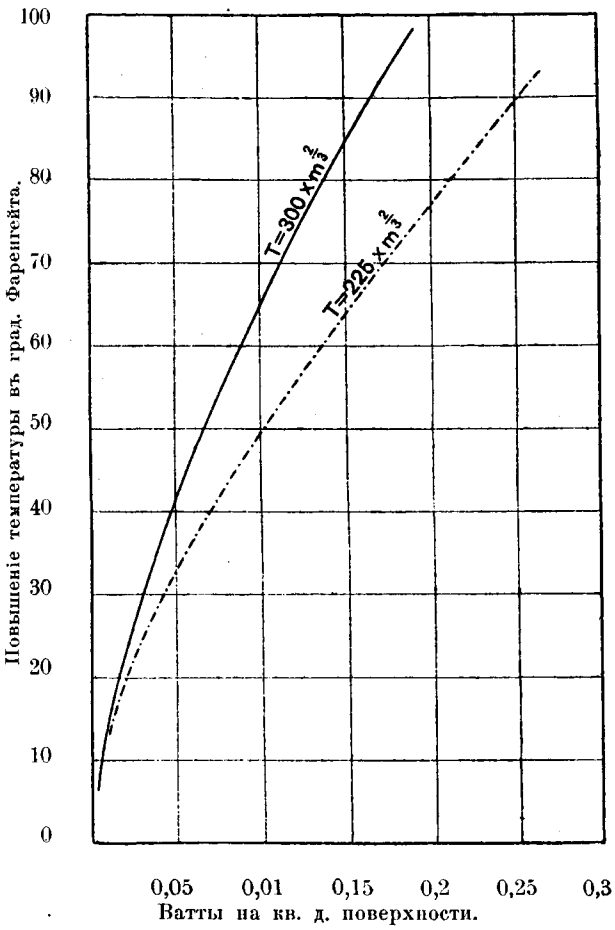
*) На кв. д.—0.4.

**) Фаренгейта $300 \times m^{\frac{2}{3}}$.

***) Фаренгейта $225 \times m^{\frac{2}{3}}$.

Электронная библиотека Российской государственной библиотеки www.booksite.ru

отъ магнитной утечки. Потокъ утечки пересѣкаетъ обмотку въ направленіи, противоположномъ главному потоку, и вызываетъ электродвижущую силу индукціи, отстающую на 90° отъ электродвижущей силы въ



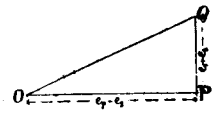
Фиг. 10b.

этой обмоткѣ. Если электродвижущая сила и сила тока въ обмоткѣ находятся въ одной фазѣ, то электродвижущая сила индукціи, отстоитъ на 90° отъ главной электродвижущей силы и стремится уменьшить ея величину. Чѣмъ болѣе отстаетъ сила тока, тѣмъ ближе будутъ обѣ электродвижущихъ силы къ прямой противоположности другъ къ другу. Затѣмъ, когда въ обѣихъ обмоткахъ силы тока находятся при большой разности фазъ, то какъ C_1, такъ и C_2, можно считать въ практическомъ смыслѣ прямо противоположными по фазамъ. Слѣдствіемъ-же является потеря напряженія (e_1, e_2), зависящая отъ омическихъ потерь въ обѣихъ обмоткахъ, а также индуктивная потеря напряженія ($e_p + e_s$), которая отстоитъ на 90° отъ e_1 и e_2.

Это обстоятельство позволяетъ весьма удобно опредѣлять потерю напряженія при помощи діаграммы. Для удобства построенія примемъ отношеніе $\frac{T_1}{T_2}$ за единицу. Каждый трансформаторъ можетъ быть соединенъ такимъ образомъ, что это условіе будетъ соблюдено, причемъ потеря напряженія не измѣняется. Если-же это отношеніе не равно единицѣ, то мы должны принять во вниманіе, что омическая потеря e_1 вольтъ въ первичной обмоткѣ вызоветъ потерю напряженія во вторичной, равную $= e_1 \times \frac{T_2}{T_1}$, вслѣдствіе чего полная омическая потеря, отнесенная ко вторичной обмоткѣ, будетъ равна:

$$\left(e_1 \times \frac{T_2}{T_1} + e_2\right).$$

Построимъ треугольникъ OPQ (фиг. 11), гдѣ $OP =$ полной индуктивной потерѣ въ обѣихъ обмоткахъ,



Фиг. 11.

отнесенной ко вторичной, а $PQ =$ полной омической потерѣ въ обѣихъ обмоткахъ. Тогда OQ, гипотенуза прямоугольнаго треугольника представитъ собой максимальное паденіе или повышеніе вторичной разности потенціаловъ, смотря по тому опаздываетъ или идетъ впередъ вторичный токъ.

Измѣреніе омическихъ потерь e_1 и e_2 весьма просто. Опредѣленіе-же $OP =$ суммѣ электродвижущихъ силъ индукціи, представляетъ болѣе затрудненій. Величина эта зависитъ отъ размѣщенія обмотокъ и длины линій утечки. Если позаботиться о соотвѣтственномъ размѣщеніи катушекъ въ большихъ трансформаторахъ, то во всякомъ случаѣ она не превыситъ болѣе, чѣмъ въ четыре раза омическія потери.

Каппъ даетъ слѣдующее выраженіе для предварительнаго опредѣленія максимальной потери вслѣдствіе самоиндукціи.

Пусть CT—среднее число амперъ-витковъ при полной нагрузкѣ въ первичной и вторичной обмоткахъ;

N—максимальный потокъ $= B \times A$;

a—средняя толщина первичной и вторичной обмотокъ;

b—разстояніе между обмотками первичной и вторичной, отъ мѣди до мѣди;

h—высота катушки (длина пространства, занимаемаго обмоткой);

l—периметръ воздушнаго промежутка между первичной и вторичной обмотками.

(Всѣ размѣры въ сантиметрахъ).

Тогда величина пониженія вторичнаго напряженія будетъ равна:

$$= K\left[\frac{CT}{N} \times \left(\frac{b}{2} + \frac{a}{3}\right) \times \frac{l}{h}\right] \times E_2,$$

гдѣ $K = 2$ для трансформаторовъ сердечниковаго типа съ концентрическими первичными и вторичными обмотками на каждой части.

$= 0{,}5$ для сердечниковыхъ трансформаторовъ съ вторичными обмотками, заключенными между двумя первичными каждой части.

$= 1{,}5$ для трансформаторовъ панцырнаго типа съ одной первичной и одной вторичной обмотками.

$= 0{,}5$ для трансформаторовъ панцырнаго типа съ перемѣшанными катушками *).

Для опредѣленія потери напряженія для любой разности фазъ между силой вторичнаго тока и электродвижущей силой можетъ быть построена діаграмма, указанная на фиг. 12.

Положимъ $\frac{T_1}{T_2} > 1$. Строимъ треугольникъ OPQ, отложивъ:

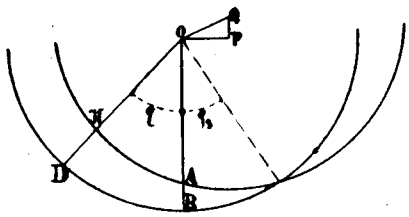
$$PQ = \left(C_1 \times R_1\right) \times \frac{T_2}{T_1} + \left(C_2 \times R_2\right) = \text{омическимъ потерямъ.}$$

$$OP = \left(e_p \times \frac{T_2}{T_1}\right) + e_s = \text{индуктивнымъ потерямъ.}$$

*) Для размѣровъ въ дюймахъ этотъ коэффиціентъ K имѣетъ соотвѣтственно слѣдующія значенія: 5; 1,25; 2,5; 1,25.

Тамбовская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Взявъ за радіусъ величину E_2, вторичную электродвижущую силу безъ нагрузки, вычертимъ два круга съ центрами O и Q. Возставимъ OB перпендикулярно къ OP, тогда AB будетъ выражать полную потерю вторичнаго напряженія при не индуктивной нагрузкѣ. Если сила вторичнаго тока сдвинута назадъ на уголъ φ, то отложимъ уголъ φ и проведемъ



Фиг. 12.

линію OD, часть ея DH будетъ соотвѣтствовать потерѣ напряженія. Отсюда видно, что максимумъ потери напряженія будетъ тогда, когда уголъ разности фазъ будетъ равенъ OQP, и что когда сила тока будетъ сдвинута впередъ на уголъ φ_2, то потеря напряженія будетъ равна нулю. Большая-же величина его поведетъ за собой увеличеніе вторичнаго напряженія.

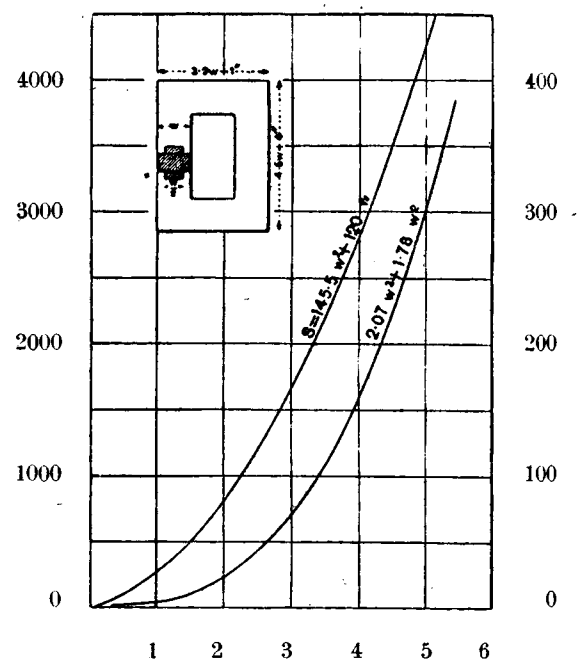
Общій ходъ расчета. — Трудъ вычисленій весьма уменьшается, если вычертить слѣдующія кривыя: 1) кривыя, показывающія связь повышенія температуры съ количествомъ ваттовъ, потерянныхъ на каждую единицу поверхности (m) для каждаго отдѣльнаго случая охлажденія; 2) кривую величинъ B и ваттъ, потерянныхъ на гистерезисъ на каждый килограммъ или фунтъ желѣза при данной частотѣ тока; 3) кривую соединяющую w—линейные размѣры сердечника (см. эту главу) съ приблизительными величинами поверхности охлажденія и здѣсь-же кривую, соединяющую w и чистый вѣсъ сердечника.

При вычисленіи полной поверхности охлажденія трансформатора съ сердечникомъ, за приблизительную величину ея можно принимать сумму слѣдующихъ величинъ: внутренняя поверхность наименьшей катушки на каждой части+та наружная поверхность наибольшей катушки на каждой части, которая можетъ быть использована+поверхности концовъ катушекъ. При панцырномъ трансформаторѣ слѣдуетъ принять во вниманіе полную наружную поверхность сердечника и ту часть поверхности наибольшей катушки, которая можетъ быть использована, т. е. ту, которая лежитъ внѣ сердечника, считая, что катушка имѣетъ полукруглые концы. За вѣсъ сердечника для предыдущей кривой должно считать чистый вѣсъ желѣза. При пластинахъ въ 0,35 мм. (14 тысячныхъ дюйма) отъ 10 до 15% объема занято изоляціей. Напримѣръ, при сердечникѣ, размѣры котораго указаны на фиг. 13, охлаждающая поверхность приблизительно будетъ $= 145{,}5w^2 + 350w$ кв. мм. ($= 145{,}5w^2 + 120w$ квадр. дюймовъ), а чистый вѣсъ желѣза $0{,}058w^3 + 0{,}125w^2$ ($2{,}07w^3 + 1{,}78w^2$). Въ панцырномъ трансформаторѣ (размѣры—фиг. 14) эти величины будутъ:

Охлаждающая поверхность $= 12{,}5w^2$ см^2 ($72{,}5w^2$ к. д.)

Вѣсъ желѣза $= 0{,}152w^3$ кгр. ($5{,}34w^3$ фунтовъ).

Вычертивъ эти кривыя, слѣдуетъ поступать далѣе слѣдующимъ образомъ: По заданнымъ величинамъ мощности и коэф. пол. дѣйствія находимъ полную величину потерь въ желѣзѣ и въ мѣди. Если трансформаторъ работаетъ на освѣщеніе, то потери въ мѣди при полной нагрузкѣ должны быть больше, чѣмъ потери въ желѣзѣ. При работѣ же на двигатели потери въ мѣди должны быть равны или быть меньше потерь въ желѣзѣ. Такимъ образомъ, родъ нагрузки (или заданныя коэф. п. д. при освѣщеніи) рѣшаетъ, какую часть всѣхъ потерь можно допустить въ видѣ потерь въ желѣзѣ. Эти потери вызываются во-первыхъ, гистерезисомъ, и во-вторыхъ, токами Фуко. Въ видѣ перваго приближенія, отводимъ 3% или нѣсколько больше на токи Фуко, и получаемъ такимъ образомъ потери на гистерезисъ.



Сердечниковый трансформаторъ. (Данныя для дюймовъ).

Фиг. 13.

Затѣмъ, изъ кривой повышенія температуры находимъ величину m для заданной величины повышенія температуры, а раздѣливъ полную потерю въ ваттахъ на m, получимъ полную требуемую поверхность охлажденія.

Затѣмъ, кривая охлаждающихъ поверхностей и величинъ сердечника даетъ намъ величину w, соотвѣтствующую найденной поверхности охлажденія, а также чистый вѣсъ сердечника. Затѣмъ, потеря на гистерезисъ въ ваттахъ, раздѣленная на вѣсъ желѣза, даетъ потерю въ ваттахъ на кгр. или на фунтъ, которая въ свою очередь по кривой гистерезиса даетъ максимальную величину B. На практикѣ величины B измѣняются отъ 2300—6200 на кв. см. (15000 - 40000 на квадр. дюймъ). Если подобный расчетъ даетъ слишкомъ малую величину B, то нужно увеличить охлаждающую поверхность, не увеличивая при этомъ вѣса желѣза.

Зная B и размѣры сердечника, вычисляемъ N, откуда мы можемъ получить величины T_1 и T_2. Число вторичныхъ витковъ T_2 иногда приходится увеличивать для того, чтобы уравновѣсить потерю напряженія въ зависимости отъ величины и назначенія трансформатора. Затѣмъ, принявъ плотность тока въ 0,7—0,8 амп. на кв. мм. (500 амперъ на кв. дюймъ), вычисляемъ обмотки, тщательно обращая вниманіе при этомъ на изоляцію слоевъ въ зависимости отъ напряженія тока.

Для легкости обматыванія, сплошнымъ проводамъ слѣдуетъ предпочесть мѣдныя полосы, свернутыя вмѣстѣ. При этомъ мѣдный листъ раскатывается до толщины, соотвѣтствующей діаметру проволоки, и затѣмъ разрѣзается на полосы нужной ширины.

Наконецъ, слѣдуетъ тщательно подсчитать: 1) полныя потери; 2) нагрѣваніе; 3) потерю напряженія. Если онѣ находятся въ допустимыхъ предѣлахъ, то слѣдуетъ посмотрѣть не улучшатъ ли ихъ небольшія измѣненія расчета. Чертежъ разрабатывается по указанному выше способу и конечныя вычисленія, само

Свердловская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

собой разумѣется, напримѣръ, хотя бы охлаждающей поверхности, должны быть всегда провѣряемы по окончательнымъ чертежамъ.

Примѣръ расчета трансформатора съ сердечникомъ.

Заданіе. Расчитать трансформаторъ по слѣдующимъ даннымъ:

Мощность 10 килов., сила тока 100 амперъ, при 100 вольтахъ напряженія и частотѣ въ 100 періодовъ въ секунду. Охлажденіе масломъ. Максимальное повышеніе температуры не должно превосходить 33° Ц. (60° Ф.) Коэф. п. д. при полной нагрузкѣ 97%. Максимальная потеря напряженія 3%; показатель мощности первичной цѣпи = 0,9.

Распредѣленіе потерь. При к. п. д. въ 97%, полное количество потерянныхъ ваттъ = 300. Положимъ изъ нихъ 150 ваттъ на потерю въ мѣди и 150 ваттъ на потерю въ желѣзѣ. Изъ этихъ 150 ваттъ въ свою очередь, предположимъ, на гистерезисъ теряется 100 ваттъ.

2) Величина сердечника. Величина m, соотвѣтствующая повышенію температуры на 33° Ц. (60° Ф.) по кривой, фиг. 10, равно приблиз 0,0217 (0,14). Слѣдовательно, поверхность охлажденія требуется = $= \frac{300}{0{,}0217} = 13800$ кв. см. $\left(\frac{300}{0{,}14} = 2140\right.$ кв. дюйм.$\left.\right)$ Это соотвѣтствуетъ величинѣ $w = 89$ мм. (3,5 д.) (см. фиг. 13) и размѣры сердечника будутъ: наружная длина $4{,}6w + 10$ см. = 51 см. ($4{,}6w + 4$ д. = 20,1 д.). Наружная ширина = $3{,}2w + 2{,}5$ см. = 31 см ($3{,}2w + 1$ д = 12,2 д.) и, наконецъ, чистый вѣсъ желѣза 50 кгр. (= 110 фунтамъ). Очевидно, что всѣ числа могутъ быть округляемы до цѣлыхъ чиселъ.

3. Величина B Количество ваттъ, потерянныхъ на гистерезисъ на кгр. желѣза при 100 періодахъ $\frac{100}{50} = 2$ $\left(\text{на фунтъ } \frac{100}{110} = 0{,}909\right)$, что соотвѣтствуетъ (см. фиг. 9) величинѣ $B = 5900$ на кв. мм. (38000—на квадратный дюймъ).

Полезная площадь сѣченія сердечника будетъ 50,5 кв. см. $\left(\frac{3}{4}(3{,}5)^2 \times 0{,}85 = 7{,}8\right.$ кв. дюйма$\left.\right)$ и поэтому полный потокъ $N = 50{,}5 \times 5{,}900$ ($38000 \times 7{,}8$).

4. Расчетъ T_1 и T_2.

$$T_1 = \frac{E_1 \times 10^8}{4{,}45 \times f \times N} = \frac{1000 \times 10^8}{4{,}45 \times 100 \times 50{,}5 \times 5{,}900} = 758.$$

Для удобства примемъ 760 витковъ; тогда $T_2 = \frac{100\ T_1}{1000} = 76$, но если мы желаемъ уравновѣсить потерю напряженія при полной нагрузкѣ, то мы должны увеличить T_2, напримѣръ, до 78 витковъ.

5. Вычисленіе C_1 и C_2.

$$C_1 = \frac{\text{мощность}}{E_1 \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{10000}{1000 \cdot 0{,}97 \cdot 0{,}9} =$$

= 11,5 ампера.

$$C_2 = \frac{10000}{100} = 100 \text{ амперъ.}$$

6. Расчетъ обмотокъ. Примемъ плотность тока около 0,77 амп. на кв. мм. (500 амперъ на квадр. дюймъ); затѣмъ поперечное сѣченіе первичнаго проводника 14.8 кв. мм. (= 0,023 квадр. д.), а вторичнаго 130 кв. мм. (= 0,200 кв д.). Будетъ болѣе экономично обмотать вторичные провода внутри каждой части, и для полученія равныхъ потерь въ первичной и вторичной обмоткахъ, въ послѣдней можно допустить большую плотность тока.

Вычертимъ сердечникъ и измѣримъ пространство, которымъ мы располагаемъ для обмотки.

Такъ какъ мы въ первичной обмоткѣ имѣемъ большое число витковъ, то выгоднѣе расположить ихъ въ двѣ секціи и уменьшить, такимъ образомъ, разность потенціаловъ между слоями.

Примемъ толщину первичной катушки, напримѣръ, 5 мм. (0,2 дюйма), толщину вторичной тоже 5 мм. (0,2 д.), толщину наконечниковъ 5 мм. (0,2 д.) и, наконецъ, величину воздушнаго промежутка между первичной и вторичной катушкой 3.8 мм. (0,15 дюйма).

Изъ чертежа находимъ, что наименьшій діаметръ вторичной катушки = 10 см. (4 дюйм.) наибольшій же діаметръ первичной, допуская между ними нѣкоторое пространство, напримѣръ, будетъ 21,6 см. (8,53 д.).

Полная толщина обмотки $\frac{21{,}6 - 10}{2} = 5{,}8$ см. $\left(\frac{8{,}53 - 4}{2} = 2{,}26\right.$ дюйма$\left.\right)$, принимая во вниманіе толщину катушекъ и воздушные промежутки. Полезная толщина обмотки 5,8 — 1,2 = 4,6 см. (2,26 — — 0,45 = 1,81 д.). Полная длина обмотки 33 см. (13 д.). Чистая длина обмотки: первичной 31,5 см. (12,4 д.); вторичной 32 см. (12,6 д.).

Первичная обмотка—380 витковъ въ каждой части; располагаемъ въ пять слоевъ по 75 витковъ и примѣняемъ прямоугольный проводникъ съ двойной бумажной обмоткой или обмотанный лентой. Допустимая ширина изолированнаго провода = $= \frac{\text{длина обмотки}}{\text{число витковъ} + 1} = \frac{33}{77} = 0{,}43$ см. $\left(= \frac{12{,}4}{77} = 0{,}1619.\right)$

Вычитая изоляцію (0,03 д.), получаемъ ширину полосы — 0,33 см. (0,13 д.); и толщину ея $\frac{148}{3.3} = 4{,}5$ мм. $\left(= \frac{0{,}023}{0{,}13} = 0{,}177 \text{ д.}\right)$

Принимаемъ двѣ полосы мѣди по 2,3 мм. (0,092 д.); тогда первичный проводникъ будетъ $3{,}3 \times 4{,}6$ = прибл. 15,2 кв. мм. (0,13 д. × 0,184 д. = площадь (0,0239 кв. дюймовъ) а съ изоляціей $4{,}1 \times 5{,}4$ кв. мм. (0,16 д. × × 0,214 д.) Между каждымъ слоемъ располагаемъ по одному слою промасленнаго полотна, каждое 0,25 мм. (0,01 д.) толщины.

Общая толщина первичной обмотки будетъ:

$$(5 \times 5{,}4) + (5 \times 0{,}25) = 28{,}25 \text{ мм.} \left(\begin{matrix} 5 \times 0{,}214 \text{ д.} \\ 5 \times 0{,}01 \text{ д.} \end{matrix}\right) =$$

$= 1{,}12$ дюйма$\Big)$.

Вторичная обмотка—39 витковъ на каждой части, располагаемъ одинъ слой въ 20 витковъ и другой—въ 19. Поступая по предыдущему, мы находимъ, что проводникъ долженъ быть составленъ изъ трехъ полосъ по 2,33 мм. толщиной и 14,5 (0,57 д.) шириной, что даетъ полезное сѣченіе $2{,}33 \times 14{,}5 \times$ $\times 3$ = прибл. 100 кв. мм. ($0{,}57 \times 3 \times 0{,}092 = 0{,}157$ квадр. дюймовъ). Размѣры съ изоляціей $15{,}2 \times 7{,}8$ мм. (0,6 д. × 0,306 д.). Толщина вторичной обмотки $2 \times 7{,}8$ = 15,6 мм. = ($2 \times 0{,}306 = 0{,}612$). Полная толщина обмотки $28{,}25 + 15{,}6 = 43{,}85$ мм. = ($1{,}12 + 0{,}612 = 1{,}732$ дюйма), что хорошо подходитъ подъ находящееся въ распоряженіи пространство.

7. Сопротивленіе обмотокъ.

Изъ чертежа получаемъ: средняя длина первичнаго витка $\pi \times 18{,}5$ см. = ($7{,}45$ д. $\times \pi$); вторичнаго = $= \pi \times 16{,}3$ см. = ($5{,}0$ д. $\times \pi$).

Полная длина первичной цѣпи $\pi \times 18{,}9 \times 760 =$ $= 450$ м. $\left(= \frac{7{,}45 \times \pi}{12} \times 760 = 1480 \text{ футъ.}\right)$

Полная длина вторичной цѣпи $\pi \times 16{,}3 \times 78 = 40$ м. $\left(= \frac{5 \times \pi}{12} \times 78 = 131 \text{ футъ}\right)$.

Сопротивленіе будетъ вычислено по формулѣ:

$$R = \frac{8{,}2 \times \text{длину въ футахъ}}{10^6 \times \text{площадь въ квадр. дюйм.}}$$

но для окончательныхъ вычисленій приходится примѣнять болѣе точную формулу, въ которой принята во вниманіе температура.

Сопротивленіе первичной цѣпи $= \frac{8{,}2 \times 1480}{0{,}0239 \times 10^6} =$ $= 0{,}51$ ома приблизительно,

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Сопротивленіе вторичной — $= \frac{8{,}2 \times 131}{0{,}157 \times 10^6} = 0{,}007$ ома.

8. Вычисленіе потерь. Потери въ мѣди. — Первичная цѣпь $C^2R\,(11{,}5)^2 \times 0{,}51 = 67{,}5$
Вторичная — $100^2 \times 0{,}007 = 70$
Всего 137,5 ваттъ.

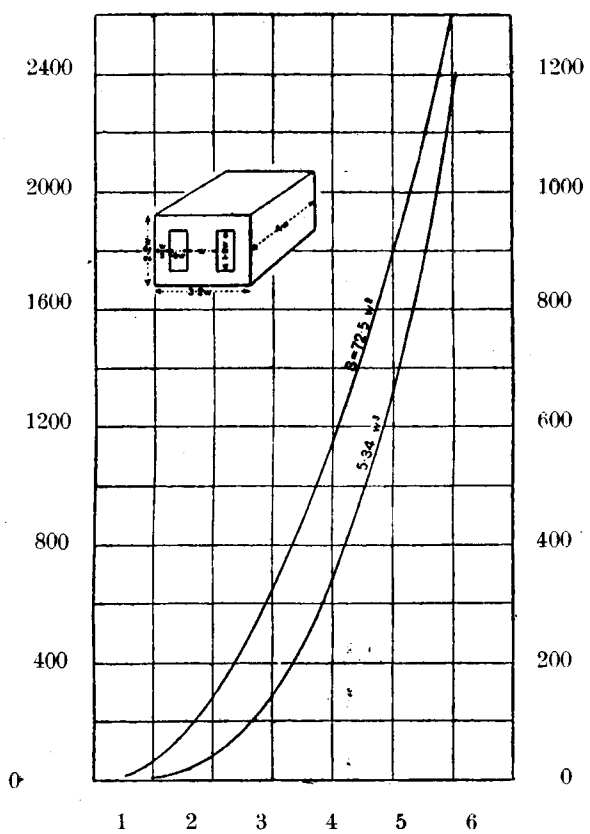
Потери въ желѣзѣ.

Потери на токи Фуко $=$ Вѣсъ $\times\ 0{,}0004 \left(\frac{f}{100} \times \frac{B}{1000}\right)^2 =$
$= 110 \times 0{,}0004 \left(\frac{100}{100} \times \frac{38000}{1000}\right)^2 = 63{,}5$ ватта.

Потери на гистерезисъ $= 100$; полная потеря въ желѣзѣ $= 163{,}5$ ватта. Полная величина потерь $= 137{,}5 + 163{,}5 = 301$ ваттъ.

9. Токъ при работѣ трансформатора безъ нагрузки.

Намагничивающій токъ можетъ быть вычисленъ или по вышеприведенной формулѣ, или изъ выраженія съ магнитной проницаемостью (μ), полученной по кривой испытанія даннаго желѣза.



Панцырный трансформаторъ. (Данныя для дюйм.).

Фиг. 14.

$C_m = \frac{B \times l}{1{,}78\,T_1\,\mu}$ для см. $C_m = \frac{B \times l}{4{,}5 \times T_1 \times \mu}$ для дюймовъ, гдѣ $l =$ средняя длина магнитной цѣпи, въ нашемъ случаѣ равная 128 см. (50,5 д.). При $B = 5900$ (для дюймовъ $B = 38000$), $\mu = 2600$ для даннаго сорта желѣза имѣемъ $C_m = \frac{5900 \times 12{,}8}{1{,}78 \times 760 \times 2600} = 0{,}216$ амп.

для д. $C_m = \frac{38000 \times 50{,}5}{4{,}5 \times 760 \times 2600} = 0{,}216$ ампера

$$C_h = \frac{P_h}{V} = \frac{163{,}5}{1000} = 0{,}163 \text{ амп.}$$

и

$$C_0 = \sqrt{(0{,}163)^2 \times (0{,}216)^2} = 0{,}27 \text{ ампера.}$$

10. Потеря напряженія. Омическая потеря.

Вторичная $= 0{,}007 \times 100$ вольта; — первичная $= 0{,}51 \times 11{,}5 = 5{,}87$ вольта. Полная омическая потеря, отнесенная ко вторичной цѣпи $= 0{,}7 + \frac{\times 5{,}87 \times 78}{760} = 1{,}3$ вольта, беремъ прибл. 1.5 вольта.

Индуктивная потеря.

Примѣняя формулу Каппа, получаемъ:

$$e = k\left\{\frac{CT}{N}\left(\frac{b}{2} + \frac{a}{3}\right)\frac{l}{h}\,E_2\right\},$$

$$CT = \frac{(11{,}5 \times 760) + (100 \times 78)}{2} = 8270,$$

$N = BA = 5900 \times 50{,}5$ для см.; $N = BA = 38000 \times 7{,}8$ для дюймовъ

$a = 2{,}2$ см. (0,866 д.)
$b = 0{,}89$ (0,35)
$l = \pi \times 14{,}6$ ($\pi \times 5{,}78$ д.)
$h = 32$ (12,6)

откуда:

$$\text{(для см.)}\ e = \frac{2 \times 8270.\ 1{,}18.\ \pi.\ 14{,}6.\ 100}{5900 \times 50{,}5 \times 32.}$$

$$= \text{(для дюйм.)}\ e = \frac{5 \times 8270 \times 0{,}46 \times \pi\ 5{,}78 \times 100}{38000 \times 7{,}8 \times 12{,}6}$$

$= 9$ вольт.

Вычертимъ теперь діаграмму векторовъ для опредѣленія потери напряженія для различныхъ величинъ $\cos\varphi$, принявъ за радіусъ

$$E_2 = \frac{78 \times 1000}{760} = 102{,}5 \text{ вольта.}$$

(вольты при открытой цѣпи), напримѣръ, въ масштабѣ 10 вольтъ въ 25 см. (1 дюймъ). При вторичномъ токѣ въ одной фазѣ съ электродвижущей силой, потеря напряженія при полной нагрузкѣ будетъ 2 вольта. Максикальная потеря на индуктивную нагрузку, однако, достигаетъ 10 вольтъ и нашъ трансформаторъ поэтому не будетъ годиться для работы двигателей, если катушки въ немъ не будутъ перемѣшаны.

11) Вѣсъ мѣди и желѣза.

Первичная цѣпь $= 3{,}85 \times 1{,}480 \times 0{,}0239 = 137$ фунт. (62 кгр.)
Вторичная цѣпь $= 3{,}85 \times 131 \times 0{,}157 = 79$ фунт. (36 кгр.)
Полный вѣсъ мѣди $= 216$ фунт. 98 кгр.; полный вѣсъ желѣза $= 110$ фунтовъ. (50 кгр.).

(„The Electrician".)

Электрическая тяга на линіяхъ итальянскаго общества Средиземноморскихъ желѣзныхъ дорогъ.

Компанія Средиземноморскихъ желѣзныхъ дорогъ въ Италіи недавно окончила устройство электрической тяги на линіяхъ нормальной колеи, идущихъ отъ Милана къ берегамъ озеръ, посѣщаемыхъ большимъ количествомъ туристовъ.

Линіи состоятъ изъ общаго двухколейнаго участка отъ Милана до Галларатэ, длиною въ 40,3 км. съ максимальнымъ уклономъ въ 0,006 и среднимъ уклономъ въ 0,002, при минимальныхъ радіусахъ въ 800 метровъ.

Въ Галларатэ отвѣтвляются три линіи, идущія въ мѣстечки Арона, Лавэно (на берегу Лаго Маджорэ), и въ Порто-Серэзіо (на берегу озера Лугано).

Эти три линіи одноколейныя и имѣютъ длины 26, 31 и 33 километра при максимальныхъ уклонахъ

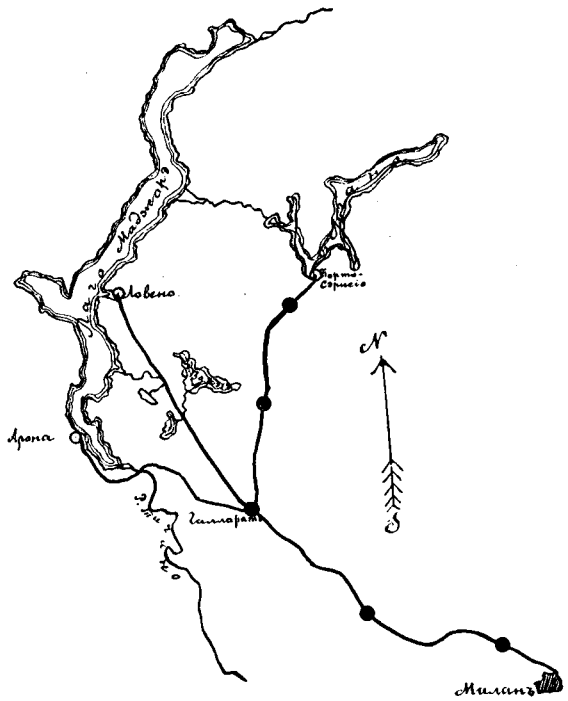
Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

отъ 0,008 до 0,020 и минимальнымъ радіусахъ закругленій въ 300 метровъ.

Участокъ Миланъ-Галларатэ обслуживаетъ весьма населенную и промышленную мѣстность и движеніе по нему весьма дѣятельно круглый годъ. Отвѣтвленія изъ Галларатэ зимой работаютъ плохо, но зато лѣтомъ по нимъ проѣзжаетъ большое количество туристовъ.

Послѣ продолжительнаго изученія вопроса общество Средиземноморской желѣзной дороги остановилось на системѣ тяги постояннымъ токомъ, передаваемымъ по третьему рельсу. Постоянный токъ въ 650 вольтъ доставляется подстанціями, получающими трехфазный токъ высокаго напряженія отъ центральной станціи.

Центральная станція, расположенная на берегу рѣки Тичино, состоитъ изъ восьми комплектовъ альтернаторовъ въ 742 киловатта и турбинъ въ 1120 л. с. Двѣ малыя турбины вращаютъ динамо, служащія для



● Подстанціи. ——— Желѣзная дорога.

Фиг. 15.

возбужденія. Напряженіе тока, даваемаго станціей—12000 вольтъ.

Въ настоящее время эта установка еще не вполнѣ готова и энергія доставляется паровой станціей, гдѣ находятся три комплекта паровыхъ машинъ тандемъ компаундъ въ 1400 л. с. и альтернаторовъ въ 750 к.-в., дающихъ токъ въ 13500 вольтъ, при 25 періодахъ. Впослѣдствіи, эта станція будетъ запасной.

Трехфазный токъ въ 12000 вольтъ передается въ Галларатэ по шести проводамъ, діаметромъ въ 7,8 м.м. Здѣсь часть энергіи трансформируется въ постоянный токъ, напряженіемъ въ 650 вольтъ, а часть передается на 2 подстанціи для участка Галларатэ-Порто Сэрэзіо и на 2 подстанціи для участка Миланъ-Галларатэ. Пока только эти линіи оборудываются электрически.

Среднее разстояніе между подстанціями—16 километровъ. Діаметры, 7, 8 и 4 мм., соединяющихъ ихъ мѣдныхъ проводовъ разсчитаны такъ, чтобы потеря въ нихъ была около 8%. Подвѣшены провода на фарфоровыхъ изоляторахъ, поддерживаемыхъ деревянными столбами, разставленными на разстояніи 50 метровъ. Столбы снабжены громоотводами.

Неподвижные трансформаторы, находящіеся на подстанціяхъ понижаютъ напряженіе съ 11000 до 420 вольтъ; этотъ токъ служитъ для питанія вращающихся трансформаторовъ.

Подстанціи, обслуживающія участокъ Миланъ-Галларатэ (всего 3) имѣютъ по два вращающихся трансформатора, мощностью по 500 к.-в., а на двухъ подстанціяхъ участка Галларатэ-П. Сэрэзіо поставлены трансформаторы по 250 к.-в.

Постоянный токъ съ подстанцій поступаетъ въ третій рельсъ, уложенный на глиняныхъ изоляторахъ, разстояніе между которыми 4 метра. Длина отдѣльныхъ рельсовъ 12 метровъ, вѣсъ 45,5 кгр. на погон. метр. Рельсы механически соединены одиночными накладками, а электрически—гибкими кабелями.

Возвратъ тока—черезъ рельсы колеи, электрическое соединеніе которыхъ обезпечено такъ же какъ и для третьяго рельса. Черезъ каждые 100 метровъ рельсы колеи соединены поперечнымъ голымъ мѣднымъ проводомъ въ 11 мм. діаметрамъ и 1,8 метра длиной. На двухколейномъ участкѣ рельсы разныхъ колей соединены между собою такимъ же образомъ.

Вагоны-двигатели – американскаго типа, на двухъ телѣжкахъ. Длина кузова 17,89 м., высота 4,145 м., наружная ширина 2,96 м. въ серединѣ и 2,40 м. по концамъ. Вѣсъ вагона-двигателя—37 тоннъ. Вмѣщаетъ онъ 75 пассажировъ, изъ которыхъ сидѣть могутъ 63. Въ прицѣпныхъ вагонахъ могутъ помѣститься 90 пассажировъ, изъ которыхъ сидѣть могутъ 63.

Вагоны внутри и снаружи освѣщены электричествомъ. Скорость движенія — до 90 километровъ въ часъ. Телѣжки вагоновъ на двухъ осяхъ. У вагоновъ-двигателей всѣ оси—ведущія. Двигатели имѣютъ нормальную мощность 70—75 л. с. и максимальную въ 160 л. с. Вѣсъ каждаго двигателя около 2500 килограммъ.

Два двигателя одной и той-же телѣжки все время остаются соединенными параллельно и измѣненіе скорости достигается послѣдовательнымъ и параллельнымъ включеніемъ двухъ группъ двигателей.

Тормаженіе производится или ручнымъ тормазомъ, или тормазомъ Вестингауза, для котораго приспособленъ резервуаръ сжатаго воздуха съ электрическимъ компрессоромъ. Изъ этого же резервуара пользуются сжатымъ воздухомъ для свистка.

А. Е. Б.

БИБЛІОГРАФІЯ.

Die neuesten Fortschritte auf dem Gebiete der Funkentelegraphie, von **A. Slaby.** Berlin. Julius Springer. 1901. 30 p. mit einer Tafel. Preis 80 pf.

Новые успѣхи въ области телеграфіи безъ проводовъ. А. Слаби. Берлинъ. Цѣна 80 пфениговъ.

Дружная работа изобрѣтателей различныхъ странъ дѣлаетъ все новыя и новыя завоеванія въ области телеграфіи безъ проводовъ. Наиболѣе важнымъ изъ послѣднихъ изобрѣтеній, безспорно, является открытіе синхроническаго телеграфированія. Профессору Слаби и Маркони почти одновременно удалось рѣшить эту задачу *).

Въ брошюрѣ проф. Слаби мы находимъ прекрасное описаніе тѣхъ физическихъ явленій, на которыхъ основано это открытіе. Изложеніе проф. Слаби отличается популярностью и прекраснымъ языкомъ. Авторъ, пользуясь аналогіями съ акустическими явленіями, даетъ читателю опредѣленную кар-

*) См. Электричество т. г., № 17—18, стр. 244.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

тину явленій происходящихъ въ проволокахъ, подверженныхъ электрическимъ колебаніямъ.

Отвлеченія автора въ область общаго вопроса,—облегченія сношеній между людьми, равно какъ и нѣкоторыя историческія замѣчанія обличаютъ въ авторѣ человѣка съ широкимъ кругозоромъ. Къ брошюрѣ приложена цинкографія, изображающая тѣ чудовищные электрическіе разряды, которые удалось получить Н. Тесла.

А. А.

Agenda aide memoire de l'Electricien 1901—1902. Paris. J. Loubat C-ie, Editeurs.

Записная книжка электротехника со справочникомъ. Парижъ. Цѣна 0,75 франка.

Фирма Луба издала записную книжку, довольно удобнаго формата, съ мѣстами для записи на каждый день,—начиная съ 1 іюля, снабженную справочнымъ отдѣломъ. Справочный отдѣлъ, занимающій не болѣе полуторыхъ печатныхъ листовъ, состоитъ изъ практическихъ указаній и заключаетъ слѣдующіе отдѣлы: электрическія единицы, измѣрительные приборы, включеніе приборовъ въ сѣть, электрическая установка, монтировка лампъ, расчетъ сѣти, расчетъ сопротивленія вѣтру воздушныхъ проводовъ, и столбовъ, и, наконецъ, руководство для завѣдующаго станціей. Къ этому нужно еще прибавить краткія теоретическія свѣдѣнія, которыя помѣщены въ различныхъ мѣстахъ. Едва ли такія краткія указанія, при томъ самыя обыкновенныя извѣстныя всякому практически занимающемуся электротехникой, могутъ принести существенную пользу.

Книжка составлена какъ-бы спеціально для диллетантовъ, интересующихся различнаго рода примѣненіями электричества, любящихъ самостоятельно устраивать у себя электрическое освѣщеніе.

А. А.

Отъ Постояннаго Комитета Всероссійскихъ Электротехническихъ Съѣздовъ.

На Первомъ Всероссійскомъ Электротехническомъ Съѣздѣ 1899—1900 г. въ С.-Петербургѣ былъ образованъ Постоянный Комитетъ Всероссійскихъ Электротехническихъ Съѣздовъ, въ составъ котораго Общимъ Собраніемъ Съѣзда были избраны слѣдующія лица: П. К. Войводъ, П. Д. Войнаровскій, Н. Н. Георгіевскій, А. Г. Коганъ, П. С. Осадчій, Н. П. Петровъ, Н. В. Поповъ, Э. В. фонъ-Рибенъ, Ч. К. Скржинскій, А. И. Смирновъ, Н. М. Сокольскій, В. А. Тюринъ и запасными—Г. Ф. Бѣлопольскій, А. А. Вороновъ и Я. И. Ковальскій. Образованному такимъ образомъ Постоянному Комитету было поручено Съѣздомъ разработать положеніе о Всероссійскихъ Электротехническихъ Съѣздахъ, исходатайствовать утвержденіе этого положенія и испросить разрѣшеніе на созывъ Втораго Всероссійскаго Электротехническаго Съѣзда въ Москвѣ на декабрь 1901 года—январь 1902 года, причемъ Съѣздомъ было выражено желаніе, чтобы Второй Съѣздъ въ Москвѣ не совпадалъ со Съѣздомъ Естествоиспытателей и Врачей въ С.-Петербургѣ 1901 года. Въ виду того, что послѣдній Съѣздъ, созывъ котораго ранѣе предполагался также на конецъ декабря 1901 года и начало января 1902 г., былъ впослѣдствіи перенесенъ на періодъ времени съ 20-го по 30-е декабря 1901 года, Постоянный Комитетъ призналъ возможнымъ Второй Электротехническій Съѣздъ въ Москвѣ назначить на періодъ времени съ 28 декабря 1901 года по 5 января 1902 года.

Въ настоящее время положеніе *) о Всероссійскихъ Электротехническихъ Съѣздахъ утверждено г. Министромъ Внутреннихъ Дѣлъ и вмѣстѣ съ тѣмъ получено разрѣшеніе на созывъ Втораго Всероссійскаго Электротехническаго Съѣзда въ Москвѣ на періодъ времени съ 28 декабря 1901 г. по 5 января 1902 года.

Согласно положенію о Съѣздахъ гг. членами Постояннаго Комитета Съѣздовъ избраны: Предсѣдателемъ Н. П. Петровъ, Товарищемъ Предсѣдателя А. И. Смирновъ, замѣстителемъ Товарища Предсѣдателя Н. В. Поповъ, Секретаремъ Н. Н. Георгіевскій и Казначеемъ П. К. Войводъ.

Согласно тому же положенію образовано мѣстное бюро для веденія дѣлъ по мѣстной организаціи Съѣзда въ г. Москвѣ въ составѣ А. Г. Бессона, М. Я. Кульчицкаго, Н. М. Рубановича, А А. Спицына и кандидатовъ въ члены бюро—Н М Бухтѣева, Б. А. Петерсъ и И А. Федорова. Комитетомъ постановлено просить князя В. М. Голицина принять на себя предсѣдательство на Съѣздѣ и въ мѣстномъ бюро. Товарищемъ Предсѣдателя Съѣзда Комитетомъ избранъ А. И. Смирновъ, а Секретаремъ Съѣзда—Н. Н. Георгіевскій.

Въ настоящее время Комитетомъ Съѣзда приступлено къ разсылкѣ приглашеній на Съѣздъ. До настоящаго времени уже заявлено болѣе 30 докладовъ и сообщеній и между ними нѣсколько докладовъ отъ имени непремѣнныхъ членовъ VI Отдѣла Императорскаго Русскаго Техническаго Общества.

На время занятія Съѣзда предполагается устройство Электро ехнической Выставки.

Лица, желающія получить болѣе подробныя свѣдѣнія, благоволятъ обращаться въ Постоянный Комитетъ Всероссійскихъ Электротехническихъ Съѣздовъ (С.-Петербургъ, Пантелеймоновская, 2)

Вмѣстѣ съ симъ Комитетъ обращается къ г.г. членамъ Перваго Съѣзда, не получившимъ еще Трудовъ Съѣзда, сообщить свои адреса въ ред. журнала «Электричество» для немедленной высылки таковыхъ.

---

*) Проектъ положенія былъ разосланъ при № 13—16 журнала „Электричество" за т. г. Онъ утвержденъ безъ существенныхъ измѣненій. *При настоящемъ номерѣ разсылаются Положеніе о Съѣздахъ, Правила Втораго Съѣзда и примѣрный списокъ вопросовъ для докладовъ.*

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Редакторъ А. И. Смирновъ.