

ОБЪ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХЪ
ПОСТОЯННАГО ТОКА.



ПО ЛЕКЦІЯМЪ
Преподавателя Миннаго офицерскаго класса
А. С. Попова.

СОСТАВИЛИ

Лейтенанты: **В. ПЕТРОВЪ** и **Д. МАКАРОВЪ.**

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Типографія Морского Министерства, въ Главномъ Адмиралтействѣ
1897.

Печатано по распоряженію Главнаго Морского Штаба.

ЗАМѢЧЕННЫЯ ГЛАВНѢЙШИЯ ОПЕЧАТКИ.

Стран.	Строка сверху.	Напечатано.	Должно быть.
3	28	1885	1895
16	25	магнита	намагничиваемаго стержня
18	3	на длину	на длинѣ
22	27	Такъ	Токъ
23	4	$\phi = i \tau R = A \cdot \text{Sin } \alpha/2.$	$\phi = i \tau R = A \text{ Sin } \alpha/2 \cdot R$
28	26	Кромѣ того, здѣсь имѣетъ мѣсто еще другое явленіе, называемое самоиндукціей	Эти слова вычеркнуть.
29	8	будетъ равна электродвижущей силѣ въ этомъ отрѣзкѣ цѣпи, т. е. $i r \pm e i$	будетъ равна работѣ электродвижущей силы въ этомъ отрѣзкѣ цѣпи, т. е. $i^2 r = e i$ или $i r = e$
29	11	Въ каждой секціи и т. д. до . . . Очевидно, чѣмъ больше . . .	При всякомъ измѣненіи силы тока въ проводникѣ, возбуждающемъ магнитное поле, появляется въ немъ электродвижущая сила самоиндукціи, противодействующая этимъ измѣненіямъ; эта электродвижущая сила, слѣдовательно, должна появиться въ секціи, проходящей подъ щеткой, потому что при переходѣ секціи изъ одной половины явора въ другую токъ въ ней долженъ измѣниться на обратный. Въ моментъ замкнанія секціи подъ щеткой токъ падаетъ до 0 не мгновенно, а въ теченіи нѣкотораго времени вслѣдствіе дѣйствія попутной электродвижущей силы; появленіе тока также не мгновенно: при увеличеніи тока обратная электродвижущая сила задерживаетъ нарастаніе его. Для того, чтобы токъ получилъ за короткій промежутокъ времени прохожденія секціи подъ щеткой полную величину необходимо, чтобы электродвижущая сила, наведенная въ секціи внѣшнимъ магнитнымъ полемъ, была въ состояніи поборотъ дѣйствіе самоиндукціи и довести силу тока въ ней до надлежащей величины, т. е. удовлетворить уравненію

Стран.	Строка сверху.	Напечатано.	Должно быть.
			$i\epsilon$ —индукция— ϵ самоиндук.
			Тогда при замыкании секции между пластинкой, выходящей из под щетки разности потенциалов не будет, а следовательно не будут появляться и искры.
33	28	напримѣръ — якорь Сименса	напримѣръ—якорь старыхъ машинъ Сименса
43	27	въ слабомъ магнитномъ полѣ гистерезисъ	въ слабомъ магнитномъ полѣ работа на гистерезисъ
46	12	гдѣ N есть число оборотовъ въ одну секунду	гдѣ N есть число оборотовъ въ одну минуту
47	21	$K = \frac{d\omega}{dt} =$	$K \times \frac{d\omega}{dt}$
48	8	Полагая, поэтому $a=0$ и называя постоянныя, независящія отъ угловой скорости, черезъ C, а постоянныя, зависящія отъ угловой скорости, черезъ B, имѣемъ:	Полагая, поэтому $a=0$ и, называя постоянныя черезъ C и B, имѣемъ:
		$K \frac{d\omega}{dt} = C - B\omega.$	$K \frac{d\omega}{dt} = C - B\omega$
		Это есть дифференціальное уравненіе кривой.	Это есть дифференціальное уравненіе кривой, выражающей нарастаніе скорости.
52	7	соприкосновеніе	сопротивленіе
58		Въ данномъ случаѣ $N = F(x)$ $N = F'(\Phi n)$	Въ данномъ случаѣ $N = F(x) = F(\Phi n)$
59	17	разность потенциаловъ V	разность потенциаловъ V'
59	19	$V' = Ix + IR$	$V' = Ix + iR_{\Omega}$
59	21	$IR = I_{\Omega} R_{\Omega} + \epsilon$	$iR_{\Omega} = I_{\Omega} R_{\Omega} + \epsilon$
59	26	$i = \frac{I_{\Omega} R_{\Omega} + \Phi n N}{R_{\Omega}}$	$i = \frac{I_{\Omega} R_{\Omega} + \Phi n N}{R_{\Omega}}$
64	25	l_1 — разстояніе	ϵ_1 — разстояніе
65	23	приводить	приравнять
69	2	Источникъ	недостатокъ
71	12	очень тщательной изоляціи	очень тщательной магнитной изоляціи

ПРЕДИСЛОВІЕ.

Минные офицеры, исполняющіе обязанности электротехниковъ и работающіе въ настоящее время на судахъ флота, принадлежать по выпуску изъ миннаго офицерскаго класса къ послѣднимъ 10—12 гг.; между тѣмъ примѣненіе электродвигателей развилось за послѣднее пятилѣтіе. Въ курсахъ миннаго класса электродвигатели не составляли особенно широкаго отдѣла до послѣдняго времени; поэтому было очень полезно, въ помощь занятіямъ каждаго миннаго офицера, сдѣлать обзоръ новѣйшихъ работъ и изслѣдованій главнымъ образомъ по теоріи электродвигателей, такъ какъ практическая сторона для всякаго, владѣющаго основами ученія объ электричествѣ, не представитъ въ каждомъ отдѣльномъ случаѣ особыхъ затрудненій. По этой причинѣ, въ лекціи вошли нѣкоторые отдѣлы, относящіеся къ основному курсу электричества и къ теоріи динамо-машинъ.

При осуществленіи этихъ лекцій я встрѣтилъ поддержку и помощь многихъ лицъ, которымъ и приношу мою искреннюю благодарность. По ходатайству завѣдующаго миннымъ офицерскимъ классомъ, изъ спеціальныхъ суммъ были даны средства для исполненія чертежей и производства нѣкоторыхъ опытовъ на лекціяхъ, помимо приборовъ изъ физическихъ кабинетовъ миннаго класса и техническаго училища Императора Николая I, которыми я пользовался.

Такъ какъ на лекціяхъ могли присутствовать только минные офицеры, находившіеся въ Кронштадтѣ, что составляетъ меньшинство общаго числа минныхъ офицеровъ, а между тѣмъ всеѣмъ приходится пользоваться электродвигателями, то явилась необходимость имѣть эти лекціи въ печати. Для этой цѣли лекціи были записаны и затѣмъ изложены минными офицерами лейтенантами В. А. Петровымъ и Д. С. Макаровымъ.

Лекціи мною просмотрѣны и онѣ не отступаютъ существенно отъ прочитаннаго; болѣе значительныя сокращенія допущены только въ описаніи опытовъ, демонстрированныхъ на лекціяхъ.

Преподаватель Мин. оф. класса и
Тех. учил. Императора Николая I.

А. Поповъ.

ОБЪ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХЪ.

I. Значеніе электродвигателей, какъ посредниковъ при передачѣ механической энергіи.

Прежде чѣмъ приступить къ изученію электродвигателей, пояснимъ предварительно значеніе ихъ, какъ посредниковъ при передачѣ механической энергіи.

Электродвигатели существуютъ давно, они изобрѣтены даже ранѣе электрическихъ машинъ. Въ началѣ, они приводились въ дѣйствіе токомъ отъ гальваническихъ элементовъ, преобразуя ихъ энергію въ механическую работу. Однако, пока источники электричества были слабы, электродвигатели не могли получить практическаго примѣненія. Въ послѣдующее же время, когда были изобрѣтены и усовершенствованы болѣе сильныя источники электричества—динамо-электрическія машины, электродвигатели, какъ посредники при передачѣ механической энергіи, получили громадное практическое значеніе.

Примѣненіе электродвигателей въ широкихъ размѣрахъ, главнымъ образомъ, получило распространеніе за послѣдніе годы. До чего малое распространеніе имѣли электродвигатели 5—6 лѣтъ тому назадъ, можно судить по тому, что составившаяся въ 1890 году компанія эксплуатаціи силъ Ниагарскаго водопада полагала передавать энергію паденія воды помощью сжатого воздуха. Проектъ этотъ выполненъ, однако, не былъ, такъ какъ къ этому времени электродвигатели достигли такого совершенства, что оказалось много выгоднѣе воспользоваться ими для передачи механической энергіи. Особенно важное значеніе въ исторіи электродвигателей имѣла установка передачи энергіи на Франкфуртской выставкѣ, въ 1891 году. Въ Лау-

фенъ работало 300 сильныхъ турбинъ и ихъ работа, помощью электродвигателей, передавалась на разстояніе 160 верстъ. Процентъ переданной черезъ такое большое разстояніе работы турбинъ опредѣлялся около 75%.

При малыхъ разстояніяхъ, электродвигатели не представляютъ непосредственной выгоды сравнительно съ другими способами передачи энергіи — въ смыслѣ коэффициента полезнаго дѣйствія, такъ какъ максимумъ процента работы для нихъ опредѣляется отъ 75 до 80%, тогда какъ передачи канатныя, цѣпныя и ременные возвращаютъ до 95% работы (первоначальной). Очевидно, что при передачѣ энергіи на небольшія разстоянія выгоды, въ смыслѣ полученія бѣльшаго коэффициента полезнаго дѣйствія, пользоваться передачами канатными, цѣпными и ременными. Но, если мы обратимъ вниманіе на то обстоятельство, что при установленной канатной, цѣпной или ременной передачѣ на большое число станковъ, пришлось бы приводить въ движеніе не всѣ станки, то всетаки придется бесполезно тратить работу на движеніе всей передаточной системы. Кроме того, для устройства канатной, цѣпной или ременной передачи, требуется извѣстный порядокъ расположенія станковъ; далѣе, въ случаѣ порчи системы передачи, придется остановить всѣ станки. Всѣ эти обстоятельства заставляютъ предпочитать электродвигатели передъ всѣми другими передаточными механизмами, такъ какъ каждый станокъ можетъ быть приводимъ въ движеніе своимъ отдѣльнымъ электродвигателемъ, установленнымъ, не стѣсняясь мѣстомъ. Кроме всѣхъ только-что перечисленныхъ выгодъ, пользование электродвигателями, какъ передатчиками энергіи, имѣютъ еще то преимущество передъ другими способами, что, помощью очень несложныхъ наблюденій вольтметра и амметра, возможно въ каждый моментъ знать точно работу, производимую электродвигателемъ. Въ настоящее время, этимъ пользуются уже на многихъ фабрикахъ и заводахъ для опредѣленія количества энергіи, потребляемой различными системами станковъ и опредѣленія коэффициента полезнаго дѣйствія различныхъ машинъ (орудій обработки матеріаловъ). Въ этомъ случаѣ, электродвигатели могутъ служить и какъ приборы, измѣряющіе энергію,

потребляемую различными исполнительными механизмами. Какъ примѣръ примѣненія электродвигателей въ морскомъ дѣлѣ съ этою цѣлью, можно указать на возможность удобнаго изслѣдованія законовъ, управляющихъ дѣйствіемъ гребныхъ винтовъ въ водѣ.

На судахъ, гдѣ помѣщеніе очень ограничено, установка канатной, цѣпной и ременной передачъ бываетъ иногда совершенно невозможна. Паровыя же передачи на длинныя разстоянія никогда не могутъ дать того коэффициента полезнаго дѣйствія, какъ электродвигатели. Для военнаго корабля главная выгода, представляемая электродвигателями, заключается, кромѣ вышензложеннаго, еще въ ихъ постоянной и немедленной готовности къ приведенію въ дѣйствіе. Во время боя, въ случаѣ перебитія снарядами проводовъ, цѣлость ихъ можетъ быть немедленно восстановлена, тогда какъ поврежденія паровыхъ трубъ, ведущихъ паръ къ двигателю, не могутъ быть исправлены скоро судовыми средствами; разрывъ паровой трубы ведетъ за собою пораненіе и смерть многихъ людей, находящихся не только у самага двигателя, но и вблизи его — въ одномъ съ нимъ помѣщеніи. Ясно, что на военныхъ судахъ способъ передачи энергіи электродвигателями имѣетъ преимущество передъ всѣми другими.

Вообще, передача энергіи при помощи электродвигателей пріобрѣтаетъ теперь все большее и большее распространеніе, вытѣсняя всѣ другіе способы передачи. Какъ на примѣръ пользованія электродвигателями въ значительныхъ размѣрахъ, можно указать на установку ихъ для передачи энергіи падающей воды Ниагарскаго водопада; въ 1885 году, тамъ уже были установлены 3 турбины въ 5000 силъ каждая, приводяція въ движеніе динамо-машины; работа передается главнымъ образомъ на заводы города Буффало, на разстояніи 32 километровъ, гдѣ и преобразуется въ механическую энергію посредствомъ электродвигателей. Помѣръ надобности прибавляются новыя турбины (зданіе приготовлено на 10 такихъ турбинъ, а сѣченіе сѣти рассчитано на 150000 силъ).

Для полученія электрическаго свѣта и для приведенія въ дѣйствіе электродвигателей, можно пользоваться двумя родами

электрической энергіи: энергіей постояннаго и энергіей переменнаго тока. Пользоваться энергіей переменнаго тока несравненно выгоднѣе, чѣмъ энергіей тока постояннаго—въ смыслѣ простоты устройства и прочности самого электродвигателя. Самыя нѣжныя и наиболѣе подверженныя порчѣ и поломкамъ части, какъ въ динамо-машинахъ, такъ и, въ особенности, въ электродвигателяхъ постояннаго тока—это щетки и собиратель (коллекторъ), которыхъ совершенно нѣтъ въ электродвигателяхъ переменнаго тока; якорь электродвигателей переменнаго тока представляетъ почти сплошное металлическое кольцо, не требующее за собой никакого ухода. Щетки и собиратель въ электродвигателяхъ изнашиваются больше, чѣмъ въ динамо-машинахъ, такъ какъ электродвигателямъ приходится работать при очень непостоянныхъ силахъ тока, отчего въ мѣстѣ прикасанія щетокъ къ собирателю получаютъ большія искры, портящія и щетки и коллекторъ.

Несмотря на всѣ выгоды, представляемыя электродвигателями переменнаго тока, по сравненію съ электродвигателями постояннаго тока, до сихъ поръ еще и въ частной практикѣ, а главнымъ образомъ на военныхъ судахъ, пользуются электродвигателями постояннаго тока. Это явленіе имѣетъ объясненіе въ историческомъ развитіи изученія источниковъ тока. Постоянный токъ и его источники стали извѣстны ранѣе переменнаго тока, а потому всѣ законы, касающіеся постояннаго тока, были открыты и изучены ранѣе таковыхъ же для переменнаго тока. Всѣ приборы, какъ для полученія, такъ и для пользованія постояннымъ токомъ, разработаны ранѣе, чѣмъ были усовершенствованы приборы переменнаго тока, а потому, очевидно, съ постояннымъ токомъ болѣе освоились, чѣмъ съ гораздо позднѣе изученнымъ переменнымъ токомъ. Вслѣдствіе этого, еще до сихъ поръ многія фирмы вырабатываютъ исключительно приборы постояннаго тока.

Однако, несмотря на такое сравнительно недавнее знакомство съ переменнымъ токомъ, въ виду столь очевидныхъ его преимуществъ передъ постояннымъ токомъ, электродвигатели переменнаго тока составляютъ теперь не менѣе 50%.

всѣхъ существующихъ, а въ недалекомъ будущемъ, по всей вѣроятности, и совсѣмъ вытѣснятъ электродвигатели постоянного тока. На судахъ военныхъ, причина пользованія постояннымъ токомъ заключается также и въ желаніи имѣть однообразные источники электрической энергіи, такъ какъ, для цѣлей боевого освѣщенія вольтовой дугой, необходимъ постоянный токъ.

Въ настоящее время, въ англійскомъ флотѣ, уже затронуть вопросъ о введеніи на судахъ и переменнаго тока, такъ какъ, для цѣлей специально боевого освѣщенія, требуется не болѣе $\frac{1}{10}$ всей эксплуатируемой на кораблѣ электрической энергіи; выгоды же, представляемыя электродвигателями переменнаго тока, слишкомъ очевидны. Немаловажное неудобство электродвигателей постоянного тока на судахъ представляетъ и то, что они, будучи помѣщены въ различныхъ частяхъ желѣзнаго корабля, будутъ эти части намагничивать и, благодаря несимметричности ихъ расположенія и непостояннаго ихъ дѣйствія, возможны (разсматривая вопросъ теоретически) такія переменныя въ магнетизмъ самого судна, что можетъ встрѣтиться затрудненіе въ пользованіи судовыми компасами. Этотъ вопросъ весьма важенъ, а потому желательны точныя наблюденія этихъ магнитныхъ возмущеній на судахъ, гдѣ уже установлены электродвигатели постоянного тока. Электродвигатели и динамо-машины, работающіе переменнымъ токомъ, а также и провода, по которымъ проходитъ переменный токъ, какъ бы они ни были расположены, очевидно, никакого вліянія на компасъ не произведутъ.

Такъ какъ на судахъ нашего флота до сихъ поръ употребляются исключительно электродвигатели постоянного тока, то вся послѣдующая часть нашей статьи будетъ содержать изложеніе законовъ и принциповъ, относящихся къ электродвигателямъ постоянного тока.

II. Дѣйствіе магнитоэлектрической машины, какъ электродвигателя. Вычисленіе механической работы, доставляемой электродвигателемъ.

Для уясненія дѣйствія электродвигателей, рассмотримъ здѣсь электрическую машину Грамма, какъ электродвигатель.

Если отъ какого-нибудь источника электричества (например, отъ аккумуляторовъ), отъ одной къ другой щеткѣ пропустимъ токъ, то токѡмъ, проходящимъ по обмоткѣ якоря, желѣзныи сердечникъ его намагнитится (чер. 1), образуя два полукольцевыхъ электромагнита, сложенныхъ одноименными полюсами, такъ что въ точкѣ А будутъ N-ые полюсы, а въ точкѣ B—S-ые полюсы сердечника. По закону взаимодѣйствія полюсовъ, N-ый полюсъ электромагнита динамо-машины будетъ притягивать S полюсъ сердечника и отталкивать N полюсъ его; S-же полюсъ электромагнита будетъ притягивать N полюсъ сердечника и отталкивать S полюсъ его, вслѣдствіе чего получится пара силъ, стремящая вращать якорь, въ данномъ случаѣ, по направленію движенія часовой стрѣлки. Когда подъ щетку, приводящую токъ, подойдетъ слѣдующая пластина коллектора, явленіе повторится въ томъ же порядкѣ и т. д. Такимъ образомъ, получится рядъ слѣдующихъ другъ за другомъ толчковъ, сообщающихъ якорю вращеніе по направленію движенія часовой стрѣлки; такъ какъ обмотка якоря раздѣляется на большое число катушекъ, то эти толчки, непрерывно слѣдующіе одинъ за другимъ, сообщаютъ якорю движеніе, довольно близкое къ равномерному.

Подобное толкованіе, хотя вполне наглядно выясняетъ принципъ дѣйствія электродвигателя постоянного тока, но не совсемъ строго, такъ какъ вращеніе якоря электродвигателя происходитъ вслѣдствіе взаимодѣйствія между полюсами электромагнитовъ и только тѣми оборотами обмотки якоря, которые заключены внутри угловъ a и b (чер. 2). Надо замѣтить при этомъ, что дѣйствуютъ только наружныя части оборотовъ обмотки (при якорѣ расположенномъ внутри электромагнитовъ). Воздушное пространство, заключенное между электромагнитами и сердечникомъ якоря, представляетъ магнитное поле.

Объясненіе причины движенія проводника, по которому проходит токъ въ равномерномъ магнитномъ полѣ, можно наглядно представить такимъ образомъ: вокругъ проводника, по которому идетъ токъ, образуется магнитное поле, направленіе линій силъ котораго можно опредѣлить хотя бы по такъ называемому правилу пробочника.

Если въ равномерное магнитное поле помѣстимъ проводникъ o (чер. 3), по которому идетъ токъ, то вокругъ проводника образуется магнитное поле, направленіе линій силъ котораго будетъ таково, какъ показано на чертежѣ стрѣлками, если по проводнику проходитъ токъ сверху внизъ. Разсматривая чертежъ, мы увидимъ, что направленіе линій силъ магнитнаго поля, образуемаго проводникомъ—то совпадаетъ съ направленіемъ линій силъ магнитнаго поля, въ которое онъ помѣщенъ, то встрѣчается съ нимъ подъ различными углами, то прямо противоположно направленію линій силъ равномернаго магнитнаго поля. Отъ наложенія этихъ двухъ магнитныхъ полей образуется магнитное поле, линіи силъ котораго расположатся, какъ показано на чертежѣ 4. Стремясь укоротиться, линіи силъ этого равнодѣйствующаго магнитнаго поля будутъ стараться двигать проводникъ по направленію, показанному на чертежѣ 3—стрѣлкой, т. е. перпендикулярно направленію линій силъ равномернаго магнитнаго поля. Обороты обмотки, помѣщающіеся внутри угловъ a и b (чер. 2), находятся въ наивыгоднѣйшихъ условіяхъ взаимодѣйствія проводника, по которому идетъ токъ и магнита, такъ какъ направленія этихъ проводниковъ, линій магнитныхъ силъ и движенія проводника, взаимно перпендикулярны. Выгода подобнаго расположенія будетъ ясна изъ послѣдующихъ формулъ.

Пусть Δl (черт. 5) будетъ безконечно малый элементъ проводника, по которому проходитъ токъ силы i , а въ точкѣ A находится нѣкоторое количество положительнаго магнетизма $+m$; разстояніе отъ точки A до элемента проводника $\Delta l—r$. Для уясненія зависимости между этими величинами, воспользуемся формулой Лапласа, по которой сила f , производящая движеніе элемента проводника въ магнитномъ полѣ, будетъ:

$$f = \frac{M. i. m. \sin [r L]}{r^2}.$$

Назовемъ напряженность магнитнаго поля, производимаго количествомъ магнетизма m въ пространствѣ около элемента Δl , равную $\frac{m}{r^2}$, черезъ H . Тогда выраженіе для силы f приметъ видъ:

$$f = \Delta l \cdot i \cdot H \cdot \sin (L H).$$

Если направленіе линій силъ магнитнаго поля будетъ перпендикулярно къ направленію проводника, то уголъ $L H$ будетъ прямой, а \sin его будетъ равенъ 1. Тогда будемъ имѣть

$$f = \Delta l \cdot i \cdot H.$$

Сила же F , дѣйствующая на весь проводникъ длины L , равная $\sum f$ выразится

$$F = L i H,$$

т. е. сила, производящая перемѣщеніе проводника, пропорціональна длинѣ проводника, силѣ тока, по проводнику проходящаго и напряженности магнитнаго поля.

Работа при бесконечно маломъ перемѣщеніи Δs выразится $\Delta W = F \cdot \Delta s$.

Подставляя въ эту формулу ранѣ выведенное выраженіе для F , получимъ

$$\Delta W = L i H \Delta s = (\Delta s L) \cdot H \cdot i.$$

Произведеніе $\Delta s L$, заключенное въ скобкахъ, есть площадь, описанная проводникомъ длины L при его бесконечно маломъ перемѣщеніи Δs . Произведеніе изъ площади, перпендикулярной къ линіямъ магнитныхъ силъ, на величину напряженности магнитнаго поля, называется магнитнымъ потокомъ. Обозначивъ его черезъ $\Delta \Phi$, будемъ имѣть

$$\Delta W = \Delta \Phi \cdot i \dots \dots \dots 1$$

Эта формула выведена въ томъ предположеніи, что магнитное поле, въ которомъ движется проводникъ —равномѣрно. Если же магнитное поле неравномѣрно, то, для бесконечно малого перемѣщенія, эта формула будетъ все-же вѣрна.

Если N —число оборотовъ якоря въ минуту, то $2 \pi r N$ —линейная скорость. Подставивъ ее вмѣсто v , получимъ

$$P = H arl n N 2 i,$$

гдѣ i —сила тока въ каждомъ оборотѣ обмотки якоря; ar —длина дуги, охваченной полюснымъ придаткомъ электромагнита; слѣдовательно, $Harl$ есть магнитный потокъ, а потому можемъ написать:

$$P = \Phi \cdot n \cdot N I,$$

гдѣ I —общая сила тока въ цѣпи $= 2 i$, а Φ —полный магнитный потокъ, проходящій черезъ желѣзо сердечника.

III. Распределение энергии въ электрической цѣпи, въ случаѣ работы электродвигателя.

Было уже показано, что мощность движущагося въ равномерномъ магнитномъ полѣ проводника выражается слѣдующими двумя формулами:

$$p = \frac{\Delta W}{\Delta t} = H l v i$$

$$p = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \cdot i$$

откуда имѣемъ:

$$p = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \cdot i = H l v i$$

Примѣняя къ явленію движенья проводника въ равномерномъ магнитномъ полѣ законъ сохранения энергии, придется придти къ заключенію о необходимости существованія въ движущемся проводникѣ электродвигательной силы индукціи. Въ самомъ дѣлѣ, пусть $E I$ будетъ полная электрическая энергія, доставляемая генераторомъ; $R I^2$ —потеря части ея на нагреваніе (черезъ R обозначено сопротивленіе всей цѣпи). По закону сохранения энергии:

$$E I = P + R I^2.$$

Подставивъ вмѣсто P его величину изъ уравненій 2 и 3, имѣемъ

$$EI = Hl vI + RI^2 = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} I + RI^2.$$

Сокращая на I , получимъ:

$$E = Hlv + RI = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} + RI$$

Въ этомъ уравненіи, E —электродвижущая сила; RI —паде-
ніе потенциала, измѣряемое единицами, тождественными съ
единицами, служащими для измѣренія электродвижущей силы;
слѣдовательно и величины $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ и Hlv суть также выраже-
нія электродвигательной силы.

Назовемъ $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ и равную ей Hlv черезъ e_1 ; тогда изъ преды-
дущаго уравненія будемъ имѣть:

$$E = e_1 + RI,$$

гдѣ e_1 —электродвижущая сила, развиваемая въ проводникѣ
при движеніи его въ равномерномъ магнитномъ полѣ. Если
проводникъ движется съ постоянной скоростью, то работа ге-
нератора въ единицу времени выразится:

$$EI = RI^2 + e_1 I.$$

Если число оборотовъ дѣйствующей обмотки якоря, внутри
каждаго изъ угловъ a и b (чер. 2) будетъ n_1 ; напряженность
поля— H , а скорость вращенія— v , то $n_1 Hlv$ будетъ электро-
движущая сила, развиваемая въ обмоткѣ якоря электродвига-
теля при его вращеніи и по ранѣе доказанному:

$$n_1 Hlv 2i = \Phi n NI = P, \text{ гдѣ } I = 2i.$$

Величины $n_1 Hlv$ и $\Phi n N$ тождественны; онѣ суть выра-
женія электродвижущей силы, развиваемой обмоткой якоря при
вращеніи электродвигателя. Назвавъ эту электродвижущую
силу e , получимъ

$$e I = P.$$

$R_{дв.}$ известно. Поэтому, всегда представляется возможным знать мощность электродвигателя, т. е. величину $P = eI$.

Когда электродвигатель стоит, то, назвав силу тока в цѣпи через I_0 , будемъ имѣть:

$$E = I_0 R_1 + I_0 R_2 + I_0 R_3.$$

Если же якорь электродвигателя вращается, то сила тока в цѣпи будетъ уже другая и для E будемъ имѣть другое выраженіе;

$$E = IR_1 + IR_2 + IR_3 + e.$$

Называя $I_0 R_3$ черезъ V_0 , а $IR_3 + e$ черезъ V , получимъ изъ двухъ послѣднихъ уравненій:

$$V_0 = I_0 R_3 = \frac{E}{\Sigma R} \cdot R_3$$

$$\begin{aligned} V = IR_3 + e &= \frac{E-e}{\Sigma R} \cdot R_3 + e = \frac{E}{\Sigma R} \cdot R_3 - \frac{e}{\Sigma R} \cdot R_3 + e = \\ &= \frac{E}{\Sigma R} \cdot R_3 + e \left(1 - \frac{R_3}{\Sigma R}\right) \end{aligned}$$

$$V = V_0 + e \left(1 - \frac{R_3}{\Sigma R}\right).$$

Такъ какъ $1 - \frac{R_3}{\Sigma R}$ есть всегда величина положительная, то V всегда будетъ больше V_0 , что можно опредѣлить и непосредственнымъ опытомъ, соединивъ зажимы вольтметра съ зажимами электродвигателя.

Что касается до силы тока в цѣпи, то она будетъ всегда больше въ то время, когда электродвигатель стоит, такъ какъ $I_0 = \frac{E}{\Sigma R}$, а $I = \frac{E-e}{\Sigma R}$.

Мы вывели двѣ формулы для выраженія мощности электродвигателя, а именно:

$$P = eI$$

$$P = \Phi_n NI$$

гдѣ e есть электродвижущая сила, развиваемая электродвигателемъ;

n » число шаговъ обмотки;

Φ » магнитный потокъ, проходящій черезъ желѣзо якоря;

N » число оборотовъ якоря электродвигателя въ секунду;

I » сила тока, проходящаго черезъ якорь электродвигателя $= 2i$ (i — сила тока, проходящаго черезъ каждый шагъ обмотки).

Въ этихъ формулахъ, какъ и во всѣхъ предшествующихъ, всѣ величины выражены въ абсолютныхъ единицахъ. Если мы желаемъ вычислить мощность электродвигателя по первой изъ приведенныхъ формулъ, то слѣдуетъ ввести въ цѣпь амметръ, который покажетъ силу тока I , и присоединить къ зажимамъ электродвигателя вольтметръ, посредствомъ котораго узнаемъ разность потенциаловъ V на зажимахъ электродвигателя. Зная I и сопротивление двигателя, легко вычислить e .

Чтобы опредѣлить мощность по второй изъ этихъ формулъ, надо сначала рассмотретьъ отъ чего зависятъ величины ϕ , n , N и I . Величина I зависитъ отъ площади поперечнаго сѣченія проводниковъ, по которымъ проходитъ токъ. Сила тока не должна превосходить той величины, при которой нагрѣваніе проводниковъ становится уже опаснымъ для изоляціи. Величина N ограничена величиной центробѣжной силы. При слишкомъ большомъ числѣ оборотовъ якоря, величина центробѣжной силы можетъ достигнуть предѣла, опаснаго для цѣлости якоря. Обыкновенно величина N заключается въ предѣлахъ отъ 3 до 40. Надобно при этомъ замѣтить, что не слѣдуетъ N дѣлать очень большимъ, такъ какъ трудно будетъ связать электродвигатель, якорь котораго дѣлаетъ очень большое число оборотовъ съ рабочими механизмами, число оборотовъ которыхъ обыкновенно бываетъ невелико. Что касается величинъ ϕ и n , то онѣ выбираются въ связи другъ съ другомъ.

IV. Динамо-электрическія машины, какъ электродвигатели. Принципъ магнитной цѣпи; примѣры и примѣненіе его къ электродвигателямъ.

Наиболѣе экономическимъ приборомъ для превращенія механической энергіи въ электрическую и электрической въ механическую, является магнито-машина. Однако, несмотря на экономичность, практическаго примѣненія магнито-машинъ, вслѣдствіе своей громозкости, не имѣютъ. Обыкновенно употребляютъ въ качествѣ электродвигателей динамо-машины, электромагниты которыхъ возбуждаются токомъ того же источника, электрическая энергія котораго превращается въ механическую.

Электромагниты электродвигателей могутъ быть намагничиваемы слѣдующими двумя типичными способами:

1. Series или послѣдовательно. Въ этомъ случаѣ, въ обмотку электромагнитовъ идетъ весь токъ, получаемый отъ источника электричества (чер. 6).

2. Shunt или параллельно, когда въ обмотку электромагнитовъ отдѣляется лишь небольшая часть (отъ 2%) всего тока, доставляемаго источникомъ электричества (чер. 7).

Величина Φ (магнитнаго потока) зависитъ отъ размѣровъ электромагнитовъ, отъ свойствъ входящихъ въ систему веществъ, отъ числа оборотовъ обмотки и отъ силы проходящаго по ней тока.

Для болѣе нагляднаго представленія этой зависимости, сопоставимъ здѣсь явленія магнитныя и явленія электрическія. Разбирая силы магнитныя и электрическія, мы приходимъ къ заключенію, что онѣ управляются тѣми же законами. Прослѣдимъ аналогію между законами, управляющими магнитными силами и законами, управляющими силами электрическими. Представимъ себѣ равномерное магнитное поле—напряженности H . Выдѣлимъ въ этомъ полѣ мысленно цилиндръ a (чер. 8), площадь поперечнаго сѣченія котораго назовемъ черезъ S . Если производящія этого цилиндра параллельны направленію линий силъ магнитнаго поля, то сѣвось цилиндра

будетъ проходить магнитный потокъ, величина котораго Φ выразится: $\Phi = HS$.

Помѣстимъ теперь въ это равномерное магнитное поле длинный желѣзный цилиндръ a' (чер. 9). Цилиндръ этотъ намагнитится и линіи силъ, или, правильнѣе говоря, линіи магнитной индукціи, въ средней его части, будутъ идти параллельно другъ другу и производящимъ желѣзнаго цилиндра a' , а у полюсовъ направленія ихъ будутъ имѣть видъ расходящихся пучковъ, какъ показано на черт. 9. Отбросимъ мысленно тѣ части цилиндра a' , гдѣ линіи силъ имѣютъ видъ расходящихся пучковъ и рассмотримъ только среднюю его часть, гдѣ линіи силъ параллельны одна другой. Въ этой части цилиндра, линіи магнитныхъ силъ расположатся равномерно; магнитный потокъ ϕ , идущій черезъ поперечное сѣченіе S , будетъ непремѣнно больше Φ и выразится: $\phi = BS$.

Величина B называется магнитной индукціей желѣза. Магнитную индукцію можно представить въ видѣ произведенія μH , гдѣ μ —магнитная проницаемость, а H —напряженность магнитнаго поля; получимъ $B = \mu H$.

Подставивъ вмѣсто B равную величину μH въ выраженіе магнитнаго потока, проходящаго черезъ желѣзо поперечнаго сѣченія S , получимъ $\Phi = \mu HS$.

Эта формула совершенно аналогична съ закономъ Ома.

Въ самомъ дѣлѣ, если выдѣлимъ два отрѣзка длины l и поперечнаго сѣченія S : одинъ изъ средней части магнита, гдѣ линіи магнитныхъ силъ расположены параллельно оси магнитнаго стержня, а другой изъ проводника, по которому проходитъ токъ силы I , то будемъ имѣть:

Для магнита.

$$\Phi = \mu HS.$$

Для проводника.

$$I = KHS.$$

Назвавъ черезъ W работу перемѣщенія единицы магнетизма на разстояніе l , а черезъ V — работу перемѣщенія единицы количества электричества на длинѣ l , получимъ:

$$Hl = W$$

$$Hl = V$$

$$H = \frac{W}{l}$$

$$H = \frac{V}{l}$$

Подставивъ вмѣсто H ихъ величины въ выраженіе магнитнаго потока и силы тока, будемъ имѣть:

$$\Phi = \mu \frac{W}{l} S \qquad I = K \frac{V}{l} \cdot S$$

$$\Phi = \frac{W}{\frac{l}{\mu} \cdot \frac{l}{S}} \qquad I = \frac{V}{\frac{1}{K} \cdot \frac{l}{S}}$$

μ — магнитная проницаемость (удѣльная), а K — электропроводимость (удѣльная); слѣдовательно, $\frac{1}{\mu}$ есть удѣльное магнитное сопротивление, а $\frac{1}{K}$ удѣльное сопротивление проводника. Величина $\frac{1}{K} \cdot \frac{l}{S}$ есть магнитное сопротивление стержня длины l и площади поперечнаго сѣченія S , а $\frac{1}{K} \cdot \frac{l}{S}$ — сопротивление проводника той же длины и того же сѣченія. Назвавъ магнитное сопротивление стержня черезъ R_m , а сопротивление проводника черезъ $R_{эл.}$, будемъ имѣть:

$$\Phi = \frac{W}{R_m} \qquad I = \frac{V}{R_{эл.}}$$

Отсюда ясно видна аналогія между законами магнитныхъ и электрическихъ силъ.

Для замкнутой цѣпи формула Ома выражается:

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + R_3 + \dots}$$

$$E = IR_1 + IR_2 + IR_3 + \dots$$

$$E = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

гдѣ V_1 , V_2 , V_3 и т. д. суть выраженія работы перемѣщенія единицы количества электричества:

$$\begin{array}{ll} V_1 & \text{--- для части цѣпи сопротивленія } R_1 \\ V_2 & \text{--- } > > > > & R_2 \\ V_3 & \text{--- } > > > > & R_3 \text{ и т. д.} \end{array}$$

Такимъ образомъ E (электродвижущая сила) представляетъ собою работу перемѣщенія единицы количества электричества на длину всего замкнутого контура.

По аналогіи между магнитными и электрическими силами, для замкнутого магнитнаго контура будемъ имѣть:

$$\Phi = \frac{\text{магнитодвижущая сила}}{\sum \text{магнитныхъ сопротивленій}},$$

гдѣ магнитодвижущая сила будетъ представлять работу, необходимую для перемѣщенія единицы магнетизма по длинѣ всего замкнутого контура.

Выведемъ теперь выраженіе для магнитнаго потока въ зависимости отъ силы тока въ проводникѣ и числа оборотовъ проводника. Возьмемъ безконечно длинный проводникъ, по которому проходитъ токъ силы i . Пусть въ точкѣ A (чер. 10) будетъ находиться единица положительнаго магнетизма, тогда по закону Лапласа:

$$h = \frac{\Delta l \cdot i \sin(lr)}{r^2}$$

величину $\Delta l \sin(lr)$ для элемента проводника можно принять равной дугѣ круга, описаннаго радіусомъ r . Тогда будемъ имѣть:

$$h = \frac{i \Delta x \cdot r}{r^2} = i \frac{\Delta x}{r}.$$

Поле, производимое въ точкѣ A безконечно длиннымъ проводникомъ, составитися отъ дѣйствія всѣхъ его элементовъ; слѣдовательно:

$$H = \sum h = 2 \sum_{\alpha=0}^{\frac{\pi}{2}} i \frac{\Delta x \cos \alpha}{r_0} = 2 \sum_0^r \frac{i}{r_0^2} \Delta x$$

$$H = \frac{2i r_0}{r_0^2} = \frac{2i}{r_0}$$

Пользуясь этимъ, вычислимъ магнитный потокъ, который будетъ возбужденъ въ круговомъ больцѣ C (чер. 11) изъ магнитнаго вещества безконечно длиннымъ прямолинейнымъ проводникомъ, по которому проходитъ токъ силы i . Если радіусъ

этого кольца будетъ r , то магнитодвижущая сила, дѣйствующая вдоль этого контура, будетъ:

$$W = HL = H \cdot 2\pi r,$$

но, по предыдущему выводу, $H = \frac{2i}{r}$; слѣдовательно

$$W = 4\pi i,$$

а магнитный потокъ $\Phi = \frac{4\pi i}{\frac{1}{\mu} \cdot \frac{L}{S}}$,

гдѣ $L = 2\pi r$, $\frac{1}{\mu}$ — удѣльное магнитное сопротивление кольца S , а S — поперечное сѣчение его.

Если кольцо изъ магнитнаго вещества будетъ неправильной формы, то магнитодвижущая сила всетаки сохранитъ прежнюю величину. Въ самомъ дѣлѣ, разбивъ контуръ (чер. 12) на безконечно малые элементы, мы найдемъ

$$\Delta W = H \cdot \Delta \sigma \cos (H\Delta\sigma) = Hr \Delta\alpha,$$

или

$$\Delta W = \frac{2i}{r} r \Delta\alpha = 2i \Delta\alpha.$$

Магнитодвижущая сила, вызванная прямолинейнымъ проводникомъ на всей длинѣ какого-угодно замкнутого кольца будетъ:

$$W = \sum 2i \Delta\alpha = 2i 2\pi = 4\pi i.$$

Если сквозь магнитный контуръ проходить m прямолинейныхъ проводниковъ безконечной длины, по каждому изъ которыхъ проходить токъ силы i , то магнитодвижущая сила, дѣйствующая на этотъ контуръ, очевидно будетъ: $4\pi mi$.

Чтобы перейти къ болѣе общимъ случаямъ намагничиванія, вычислимъ еще магнитодвижущую силу, которая будетъ дѣйствовать на безконечно длинный, тонкій магнитный стержень, проходящій черезъ центръ круговаго проводника, радіуса r_0 . Для этого выразимъ элементарную работу перемѣщенія 1 количества магнетизма вдоль оси проводника. Если по проводнику

проходить токъ силы i , то поле на оси кругового проводника въ точкѣ В (чер. 13) выразится такъ:

$$H = \frac{2\pi r_0^3 i}{r^3}$$

элементарная работа перемѣщенія единицы количества магнетизма:

$$\Delta W = H \cdot dx = \frac{2\pi r_0^3 i}{r^3} \cdot \frac{r \, dx}{\cos \alpha}$$

$$\Delta W = 2\pi \cos \alpha \, d\alpha \, i.$$

Полная работа перемѣщенія единицы количества магнетизма изъ безконечности черезъ центръ кругового проводника въ безконечность по прямой линіи будетъ:

$$W = \sum \Delta W = 2 \sum 2\pi i \cos \alpha \cdot d\alpha = 4\pi i \sum_{\alpha=0}^{\alpha=\frac{\pi}{2}} \cos \alpha \, d\alpha.$$

Разсуждая также, какъ и ранѣе получимъ, что $W = 4\pi i$, а для круговыхъ проводниковъ: $W = 4\pi mi$.

Въ этихъ двухъ разобранныхъ примѣрахъ, мы имѣемъ предѣльные случаи обыкновеннаго расположенія замкнутыхъ контуровъ проводниковъ тока и магнитной цѣпи. Въ первомъ случаѣ, проводникъ не замкнутъ и замкнута магнитная цѣпь; во второмъ случаѣ — замкнутый проводникъ и разомкнутая магнитная цѣпь.

Выраженіе для магнитодвижущей силы, въ видѣ $4\pi mi$, будетъ справедливо и для промежуточнаго случая, когда магнитная цѣпь охватывается замкнутымъ проводникомъ тока (чер. 14). Точное доказательство этой теоремы, въ общемъ случаѣ, будетъ затруднительно.

Опредѣливъ зависимость между магнитодвижущей силой, силой тока и числомъ оборотовъ проводника, обратимся теперь къ опредѣленію магнитнаго потока Φ . Возьмемъ, на примѣръ, динамо-машину типа II. Назовемъ магнитную проницаемость жельза электромагнитовъ и связывающей ихъ подушки черезъ μ , (обыкновенно магнитная проницаемость ихъ одинакова, такъ какъ эти части динамо-машины отливаются вмѣстѣ изъ

одного металла); магнитную проницаемость желѣза якоря черезъ μ_2 ; среднюю длину основъ электромагнитовъ и подушки черезъ L_1 ; черезъ s_1 —поперечное ихъ сѣченіе; толщину кольца якоря черезъ b ; средній радіусъ желѣза якоря черезъ a ; толщину воздушнаго промежутка между сердечникомъ якоря и сердечниками электромагнитовъ черезъ d ; ширину сердечника якоря, а слѣдовательно и воздушнаго промежутка—черезъ l ; уголь, подъ которымъ полюсный придатокъ захватываетъ якорь, черезъ α . Магнитный потокъ тогда выразится:

$$\Phi = \frac{4 \pi n i}{\frac{1}{\mu_1} \frac{L_1}{s_1} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\mu_2} \frac{\pi a}{b l} + \frac{2 d}{l \cdot \alpha}}$$

Въ этомъ уравненіи всѣ величины, кромѣ μ_1 μ_2 , могутъ быть измѣрены извѣстными намъ способами.

V. Методы опредѣленія магнитной проницаемости.

Покажемъ теперь, какимъ образомъ можно опредѣлить магнитную проницаемость, т. е. μ .

Для опредѣленія величины магнитной проницаемости различныхъ тѣлъ служатъ приборы, называемые пермеаметрами. Принциповъ, на которыхъ они основаны, существуетъ очень много; мы же здѣсь разсмотримъ только устройство нѣкоторыхъ, наиболѣе типичныхъ пермеаметровъ.

Пермеаметръ Гопкинсона состоитъ изъ массивной прямоугольной рамы, сдѣланной изъ самаго лучшаго мягкаго желѣза (рама прибора, демонстрированнаго на лекціи, приготовлена на Путиловскомъ заводѣ). Рамы для пермеаметровъ обыкновенно дѣлаются изъ обрѣзковъ мягкаго желѣза, спрессованныхъ подъ большимъ давленіемъ. Внутри рамы помѣщены симметрично (по продольной ея оси) двѣ катушки изъ толстой изолированной проволоки. Въ рамѣ, по ея продольной оси, высверлено цилиндрическое отверстіе, въ которое вставляется съ двухъ противоположныхъ сторонъ разрѣзанный на двѣ части цилиндрической же стержень испытуемаго вещества. Внутренніе концы стержней должны быть тщательно пришлифованы

другъ къ другу, а наружная поверхность стержней — къ цилиндрическому отверстию въ рамѣ.

Измѣреніе магнитной проницаемости какого-либо вещества производится слѣдующимъ образомъ. Изъ испытуемаго вещества готовится, какъ сказано выше, стержень. Между двумя катушками толстой изолированной проволоки, помещенными внутри рамы пермеаметра, вставляется маленькая катушка, обмотка которой состоитъ изъ большого числа оборотовъ тонкой изолированной проволоки. Въ этой катушкѣ имѣется отверстіе, въ которое долженъ плотно входить стержень изъ испытуемаго вещества. Малая катушка привѣшивается на резиновой лентѣ, которая своей упругостью (лента бываетъ растянута, когда малая катушка вставлена въ приборъ) стремится поднять ее вверхъ. Вставивъ на мѣсто малую катушку и стержень изъ испытуемаго вещества такъ, чтобы онъ проходилъ черезъ отверстіе малой катушки, пропускаютъ токъ черезъ катушки съ толстыми обмотками отъ какого-либо источника электричества; въ цѣпь катушекъ толстыми обмотками вводится амметръ, а въ цѣпь катушки съ тонкой обмоткой чувствительный баллистическій гальванометръ. Если быстро выдернуть стержень изъ испытуемаго вещества, то малая катушка, подвѣшенная на резиновой лентѣ, упругостью послѣдней будетъ выдернута изъ рамы и въ ней индуктируется мгновенный токъ, который заставитъ стрѣлку баллистическаго гальванометра отклониться на нѣкоторый уголъ. Назовемъ уголъ отклоненія стрѣлки баллистическаго гальванометра черезъ α . Такъ въ катушкѣ будетъ индуцироваться подъ вліяніемъ нѣ котораго магнитнаго потока Φ .

$$i = \frac{\Phi}{R},$$

гдѣ R полное сопротивленіе всей цѣпи, въ которую введена катушка съ тонкой обмоткой, а τ промежутокъ времени, потребный на выскакиваніе катушки. Изъ этой формулы получимъ:

$$\Phi = i \tau R.$$

Назвавъ черезъ α уголъ отклоненія стрѣлки баллистическаго гальванометра, а черезъ A — его постоянную, можно написать:

$$\Phi = i \tau R = A \cdot \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Изъ этого уравненія, зная величины A и α , можно вычислить величину магнитнаго потока Φ .

Сдѣлавъ такія наблюденія, магнитную проницаемость стержня можно вычислить по формулѣ:

$$\Phi = \frac{4 \pi m i}{\frac{1}{2} \frac{1}{\mu} \frac{L}{S} + \frac{1}{\chi} \frac{l}{s_1}},$$

гдѣ Φ — магнитный потокъ; m — число шлаговъ обмотки толстыхъ катушекъ; i — сила проходящаго по нимъ тока; μ — магнитная проницаемость желѣза рамы; L — длина пути потока по рамѣ; S — поперечное сѣченіе этого пути; l — длина стержня между наружными плоскостями катушекъ съ толстой обмоткой; s_1 — поперечное сѣченіе стержня, и χ — магнитная проницаемость стержня. Въ этой формулѣ всѣ величины, за исключеніемъ χ , извѣстны; слѣдовательно, изъ нея можетъ быть вычислена магнитная проницаемость стержня. На практикѣ, при вычисленіи магнитной проницаемости, сопротивленіемъ рамы пермеаметра можно и пренебречь.

Пермеаметръ Сильвануса Томпсона основанъ на опредѣленіи силы, потребной для отрыванія стержня изъ испытываемаго вещества отъ рамы пермеаметра, подобно той, какая имѣется въ пермеаметрѣ Гопкинсона. Внутри рамы помѣщена только одна катушка съ обмоткой изъ толстой изолированной проволоки. Сквозь катушку и цилиндрическое отверстіе въ одномъ изъ боковъ рамы вставляется стержень изъ испытываемаго вещества. Конецъ стержня долженъ быть плотно пришлифованъ къ рамѣ пермеаметра. Усиліе отрыванія стержня отъ рамы, когда по катушкѣ пропущенъ токъ извѣстной силы, измѣряется посредствомъ динамометра. Изъ закона Кулона можно найти силу F въ динахъ:

$$F \text{ (въ динахъ)} = \frac{B^2 S}{8 \pi},$$

гдѣ В магнитная индукція, а S площадь поперечнаго сѣченія стержня изъ испытываемаго вещества.

$$F \text{ (въ килограммахъ)} = \frac{B^2 S}{8 \pi 10^6} \cdot \frac{1}{982} .$$

Въ этомъ уравненіи всѣ величины, кромѣ В — извѣстны и значить изъ него можно опредѣлить величину В. Зная величину В, опредѣлимъ по ранѣе указаннымъ формуламъ и магнитную проницаемость μ .

Такимъ образомъ мы видимъ, что магнитная проницаемость можетъ быть опредѣлена однимъ изъ описанныхъ способовъ. Кромѣ указанныхъ, для опредѣленія магнитной проницаемости существуетъ еще нѣсколько способовъ, но на нихъ останавливаться мы не будемъ.

VI. Измѣненія главнаго магнитнаго потока подѣ вліяніемъ тока, проходящаго по обмоткѣ якоря электродвигателя. Приложимость формулы для вычисленія мощности въ этомъ случаѣ.

Обратимся теперь къ изслѣдованію расположенія линій силъ магнитнаго поля, въ которомъ вращается якорь динамо-машины и электродвигателя.

Чертежъ 15—представляетъ расположеніе силъ магнитнаго поля въ томъ случаѣ, когда оно производится одними электромагнитами, т. е. когда по обмоткѣ якоря не проходитъ тока.

Чер. 16 — представляетъ расположеніе линій силъ магнитнаго поля, производимаго однимъ якоремъ, т. е. когда по обмоткамъ электромагнитовъ токъ не пущенъ.

Чер. 17 — представляетъ результатъ сложения дѣйствій того и другого поля, т. е. магнитное поле въ томъ случаѣ, когда токъ проходитъ—какъ по обмоткѣ якоря, такъ и по обмоткамъ электромагнитовъ.

Подобное расположеніе линій силъ объясняется тѣмъ, что при наложеніи магнитнаго поля, изображеннаго на чер. 16, на магнитное поле, изображенное на чер. 15, нѣкоторыя изъ линій силъ обонхъ полей пойдуть по одному направленію и,

соединяясь вмѣстѣ, усиливаютъ напряженность поля; нѣкоторыя изъ линій силъ обоихъ полей пойдутъ подъ углами другъ къ другу и будутъ мѣнять свое направленіе по закону сложения силъ; нѣкоторыя же изъ линій силъ обоихъ полей пойдутъ по направленіямъ, прямо противоположнымъ и въ этомъ мѣстѣ напряженность поля будетъ ослабляться.

Ясно, что около угловъ полюсныхъ наконечниковъ *a* и *b* (чер. 17) будетъ усиленіе магнитнаго поля, а около угловъ *e* и *z* полюсныхъ наконечниковъ — ослабленіе его, такъ что шлагаи обмотки якоря будутъ вращаться въ неравнобѣрномъ уже магнитномъ полѣ и направленіе движенія ихъ не будетъ перпендикулярно къ направленію линій магнитныхъ силъ. Покажемъ, что выведенныя нами формулы—въ предположеніи равнобѣрности магнитнаго поля и перпендикулярности движенія къ линіямъ магнитнымъ силъ. Формулы:

$$P = \Phi n N I \text{ и } \phi = \frac{\text{Магнитодвижущая сила}}{\Sigma \text{ магнитныхъ сопротивленій}}$$

будутъ вѣрны какъ для динамо-машинъ, такъ и для электро-двигателей, гдѣ якорь вращался въ неравнобѣрномъ магнитномъ полѣ, линіи силъ котораго не перпендикулярны къ направленію движенія проводниковъ. Для доказательства, пусть имѣемъ проводникъ длины *l*, по которому проходитъ токъ силой *i* и который помѣщенъ въ равнобѣрномъ магнитномъ полѣ напряженности *H*. Сила *f* (чер. 18), дѣйствующая на проводникъ, будетъ $F = Hl$.

Если проводникъ изъ положенія *A* перемѣстится въ положеніе *B*, то работа перемѣщенія ΔW выразится:

$$\Delta W = f \cdot \Delta s \cdot \text{Cos} (f, \Delta s),$$

гдѣ Δs есть величина перемѣщенія. Подставивъ въ это выраженіе вмѣсто *f* равную ей величину Hl , получимъ:

$$\Delta W = Hli \cdot \Delta s \cdot \text{Cos} (f, \Delta s).$$

Но величина $l \cdot \Delta s$ есть величина площади пересѣченія магнитнаго потока проводникомъ при перемѣщеніи на разстояніи

Δs , а $l \cdot \Delta s \cos(f, \Delta s)$ проекція этой площади на плоскости, перпендикулярной къ направлению линий силъ магнитнаго поля. Произведеніе изъ проекціи площади, описанной проводникомъ при своемъ перемѣщеніи, на плоскости перпендикулярной къ направлению линий силъ магнитнаго поля и напряженности магнитнаго поля H , есть магнитный потокъ $\Delta\Phi$.

$$\Delta\Phi = Hl \Delta s \cos(f, \Delta s).$$

Подставивъ $\Delta\Phi$ вмѣсто равной ему величину въ предыдущую формулу, будемъ имѣть $\Delta W = \Delta\Phi \cdot i$, а мощность p , т. е. работа въ единицу времени будетъ

$$p = \frac{\Delta\Phi \cdot i}{\Delta t}.$$

Шаги обмотки якоря расположены въ магнитномъ полѣ симметрично въ смыслѣ направленія линий силъ, а потому, если опредѣлимъ p для одной половины магнитнаго поля, то найти P , для полнаго оборота проводника, будетъ очень легко: стоитъ лишь помножить полученное выраженіе на 2.

Для одной половины магнитнаго поля:

$$p_1 = \Sigma \frac{i}{\Delta t} \cdot \Delta\Phi = \frac{i}{\Delta t} \Sigma \Delta\phi,$$

$$\text{а } P = 2p_1 = \frac{2i}{\Delta t} \Sigma \Delta\phi.$$

Въ этой формулѣ всѣ величины постоянны, за исключеніемъ $\Delta\phi$. Полагая малое перемѣщеніе на величину діаметра проводника, можно эту часть поля принимать за равномерное магнитное поле.

Время одного оборота $\Delta t = \frac{1}{Nn}$, гдѣ N — число оборотовъ якоря въ секунду, а n — число шаговъ обмотки якоря.

Подставивъ вмѣсто Δt равную ему величину $\frac{1}{Nn}$, а вмѣсто $2i$ — I , получимъ слѣдующее выраженіе для мощности:

$$P = \frac{I}{Nn} \Sigma \Delta\phi = I \cdot Nn \cdot \phi.,$$

т. е. выражение мощности для проводника, движущагося въ неравнобѣрномъ магнитномъ полѣ не перпендикулярно къ направленію линій силъ, будетъ тоже самое, что и для проводника, движущагося въ равнобѣрномъ магнитномъ полѣ перпендикулярно къ направленію линій силъ магнитнаго поля.

VII. Направленіе вращенія электродвигателей съ различными способами намагниченія по сравненію съ динамо-машинами.

Разсмотримъ теперь направленіе вращенія электродвигателей съ различными способами намагниченія электромагнитовъ. Пусть имѣемъ динамо-машину съ послѣдовательнымъ намагниченіемъ (series). Если пропустимъ токъ черезъ нее (чер. 19), соединивъ зажимъ $+$ ея съ плюсовымъ зажимомъ источника электричества (чер. 20), то черезъ обмотки электромагнитовъ и якоря ея пройдетъ токъ въ обратномъ направленіи, чѣмъ тогда, когда ею пользовались, какъ динамо-машиной; слѣдовательно, вращеніе якоря будетъ противъ щетокъ. Если теперь зажимъ—динамо-машины соединить съ плюсовымъ зажимомъ источника электричества (чер. 21), то направленіе тока и въ обмоткѣ якоря и въ обмоткѣ электромагнитовъ перемѣнится; очевидно, что направленіе вращенія якоря при этомъ не измѣнится, т. е. онъ будетъ вращаться тоже противъ щетокъ. Во всѣхъ этихъ случаяхъ, сторона вращенія якоря опредѣляется взаимодействіемъ полюсовъ электромагнитовъ и полюсовъ, образуемыхъ въ сердечникѣ якоря токомъ, проходящимъ по его обмоткѣ.

Если въ качествѣ электродвигателя пользуются динамо-машиной съ отвѣтвленнымъ намагниченіемъ (shunt), то (черт. 22) соединивъ зажимъ $+$ ея съ плюсовымъ зажимомъ источника электричества (черт. 23), мы пропустили токъ черезъ обмотки электромагнитовъ въ томъ же направленіи, какъ и тогда, когда она работала какъ динамо-машина; токъ же въ обмоткѣ якоря будетъ идти въ обратномъ направленіи, вслѣдствіе чего якорь электродвигателя начнетъ вращаться по щеткамъ. Измѣнивъ направленіе тока, проходящаго черезъ электродвигатель (чер. 24), мы одновременно измѣнимъ направле-

ніе тока, какъ въ обмоткахъ электромагнитовъ, такъ и въ обмоткѣ якоря; вслѣдствіе чего направленіе вращенія якоря электродвигателя не измѣнится, т. е. якорь по прежнему будетъ вращаться по щеткамъ. Чертежи 22, 23 и 24 наглядно выясняютъ сказанное объ электродвигателяхъ shunt.

VIII. Коммутация тока на коллекторѣ.

Разсмотримъ теперь явленіе перехода щетокъ съ одной пластины коллектора на другую. Въ тотъ моментъ, когда щетка одновременно касается двухъ смежныхъ пластинъ коллектора, секція, начало которой присоединено къ одной изъ этихъ пластинъ, а конецъ къ другой, черезъ щетку замыкается сама на себя. Когда одна изъ этихъ пластинъ выйдетъ изъ подъ щетки, секція размыкается и по ней стремится пройти весь токъ, циркулирующій въ одной половинѣ обмотки якоря. Если коммутация происходитъ въ безразличной полосѣ, то при размыканіи секціи получается искра. Искры быстро приводятъ въ негодность щетки и коллекторъ, поэтому слѣдуетъ устанавливать щетки на коллекторѣ такъ, чтобы при переходѣ щетки съ одной пластины коллектора на другую—искры не появлялось. Опытъ показываетъ, что это достигается тогда, когда секція въ моментъ размыканія будетъ находиться въ той части магнитнаго поля, гдѣ въ ней индуктируется электродвижущая сила, способная образовать въ ней токъ такой силы и такого направленія, какой встрѣтитъ взятая секція, вступая тотчасъ послѣ размыканія въ другую половину обмотки якоря. Кромѣ того, здѣсь имѣетъ мѣсто еще другое явленіе, называемое самоиндукціей.

Если на концахъ проводника, по которому идетъ токъ силой i и сопротивление котораго r , разность потенциаловъ V , то работа въ проводникѣ будетъ Vi . Если въ проводникѣ появится обратная электродвижущая сила e , то, очевидно, по закону сохранения энергіи будемъ имѣть:

$$Vi = i^2r + ei$$

$$Vi = ir + e.$$

Если же въ проводникѣ будетъ попутная электродвижущая сила, то по тому-же закону:

$$Vi + ei = i^2r$$

$$V + e = ir$$

$$V = ir - e.$$

Разность потенціаловъ на концахъ проводника сопротивленія r будетъ равна 0, если работа, затраченная на его нагрѣваніе, будетъ равна электродвижущей силѣ въ этомъ отръзкѣ цѣпи, т. е.

$$ir = \pm e.$$

Въ каждой секціи, при размыканіи и замыканіи ея черезъ щетку, появляется электродвижущая сила самоиндукціи, которая происходитъ отъ образованія магнитнаго потока, исходящаго изъ полюсовъ кольца якоря. Наибольшая электродвижущая сила самоиндукціи образуется въ секціяхъ, проходящихъ близъ безразличной линіи, потому что здѣсь происходитъ перемѣна направленія электродвижущей силы индуктированной въ секціи и электродвижущая сила самоиндукціи составляется изъ двухъ частей: одной, полученной при уменьшеніи индуктируемой электродвижущей силы, и другой, полученной при появленіи индуктируемой электродвижущей силы обратнаго направленія, т. е. въ этомъ случаѣ:

$$ir = e + e_1 + e_2$$

$$e = ir - (e_1 + e_2).$$

Электродвижущая сила самоиндукціи, имѣя обратное направленіе съ индуктируемой электродвижущей силой, препятствуетъ быстрой перемѣнѣ направленія тока въ секціи, переходящей безразличную линію и такимъ образомъ увеличиваетъ величину искры. Очевидно, чѣмъ больше электродвижущая сила самоиндукціи, тѣмъ на большій уголъ придется смѣщать щетки, чтобы въ секціи индуктировалась большая электродви-

жающая сила, способная нейтрализовать дѣйствіе самоиндукціи и образовать въ секціи токъ такой же силы и направленія, какъ и въ цѣпи, въ которую включается она послѣ размыканія черезъ щетку.

Явленія самоиндукціи очень похожи на явленія инерціи. Если имѣемъ кусокъ желѣза, обмотанный проволокой, сопротивленіе которой R и на концахъ которой имѣется разность потенциаловъ V , то выраженіе $i = \frac{V}{R}$ будетъ для данного случая вѣрно только послѣ нѣкотораго промежутка времени, достаточнаго для того, чтобы желѣзо довести до извѣстной степени намагниченія, соотвѣтствующей установившейся силѣ тока; первое время часть тока будетъ тратиться на образованіе магнитнаго потока и только когда желѣзо будетъ намагничено до извѣстной степени, соотвѣтствующей постоянной силѣ тока, токъ по обмоткѣ будетъ проходить уже постоянной силы и формула: $i = \frac{V}{R}$, будетъ вѣрна.

На лекціяхъ былъ показанъ опытъ, весьма наглядно поясняющій сказанное явленіе. Въ одну цѣпь батарей (изъ достаточнаго числа вторичныхъ элементовъ) введенъ былъ электромагнитъ съ толстымъ желѣзнымъ сердечникомъ, а въ другую цѣпь — реостатъ, сопротивленіе котораго равно сопротивленію обмотки электромагнита; въ обѣ эти параллельныя цѣпи были введены лампы накаливанія. При замыканіи цѣпей, токъ, проходя одновременно въ обѣ цѣпи одинаковой силы, накаливаетъ лампы, введенныя въ цѣпь реостата, почти мгновенно, тогда какъ въ цѣпи электромагнита накаливаніе лампъ запаздываетъ на нѣсколько секундъ. Когда послѣ этого токъ въ цѣпяхъ пропускали по обратному направленію, запаздываніе было гораздо больше, такъ какъ току приходилось уничтожить въ желѣзѣ электромагнита образовавшійся уже потокъ и довести потокъ направленія обратнаго до извѣстной величины.

Слѣдующій опытъ былъ показанъ для объясненія появленія электродвижущей силы самоиндукціи. Въ цѣпь достаточнаго числа вторичныхъ элементовъ введенъ электромагнитъ съ толстымъ желѣзнымъ сердечникомъ, а параллельно ему лампа накаливанія. При разрывѣ цѣпи, вслѣдствіе самоиндукціи

появляется электродвижущая сила и токъ, способные даже пережечь лампочку.

Опытомъ было показано, что самоиндукція увеличивается съ увеличеніемъ проходящаго черезъ желѣзо потока Φ , числа оборотовъ n и толщины желѣза, т. е. сопротивленія сердечника, на который намотана проволока. Только что разсмотрѣнное явленіе происходитъ и въ якорѣ динамо-машины или электродвигателя, вращающихся въ магнитномъ полѣ. То, что было сказано о кускѣ желѣза, обмотаннаго изолированной проволокой, всецѣло относится и до каждаго элемента вращающагося сердечника якоря.

Такъ какъ въ моментъ прохожденія секціи обмотки якоря динамо-машины или электродвигателя черезъ безразличную линію, электродвижущая сила индукціи въ ней почти равна нулю, а электродвижущая сила самоиндукціи при размыканіи секціи будетъ имѣть нѣкоторую величину, то стремленіе и направлено къ тому, чтобы уничтожить эту появляющуюся силу самоиндукціи. Разсмотримъ, отъ какихъ величинъ зависятъ самоиндукція:

$$e_{\text{самоинд.}} = F \left[\left(\frac{n}{k} \right)^2, R, r, t \right]$$

гдѣ n — число всѣхъ шаговъ обмотки якоря;

k — число пластинъ коллектора;

$\frac{n}{k}$ — число шаговъ обмотки въ каждой секціи;

R — магнитное сопротивленіе потоку;

r — сопротивленіе секціи;

t — время;

$$e_{\text{индук.}} = [B' - B''] \left(\frac{n}{k} \right) lv.$$

гдѣ B' — плотность потока, исходящаго изъ полюса электромагнита;

B'' — плотность потока, исходящаго изъ полюса сердечника;

l — длина всей обмотки;

v — скорость движенія.

Изъ разсмотрѣнія этихъ двухъ формулъ явствуетъ, чтобы возможно меньше былъ уголъ смѣщенія щетокъ, надо: e самоиндукціи была бы возможно меньше, а e индукціи—возможно больше. Для уменьшенія e самоиндукціи надо: число шлаговъ обмотки въ каждой секціи $\frac{n}{k}$ было бы возможно меньше; наивыгоднѣйшая для $\frac{n}{k}$ величина—единица; R должно быть возможно больше, а r —меньше. Для увеличенія e индукціи надо, чтобы V' была возможно больше, V'' —возможно меньше; т. е. возможно усилить потокъ, производимый электромагнитами и ослабить потокъ, производимый желѣзомъ якоря; $\frac{n}{k}$ сдѣлать возможно больше и l и c —возможно больше.

Отсюда ясно, что нужно принимать во вниманіе при конструированіи машинъ, чтобы уменьшить уголъ смѣщенія щетокъ.

IX. Способы для уменьшенія угла смѣщенія щетокъ. Условія наименьшаго искробразованія.

Уменьшить повозможности уголъ смѣщенія щетокъ важно еще и въ томъ отношеніи, что всѣ тѣ обороты обмотки якоря, которые находятся въ углу, образуемомъ линіей, по которой установлены щетки и линіей ей симметричной—по другую сторону безразличной линіи, намагничивая желѣзо якоря, стремятся противодѣйствовать теченію главнаго магнитнаго потока въ сердечникѣ, чѣмъ уменьшается величина электродвижущей силы, развиваемой динамо-машиною.

Наиболѣе практикуемые способы для уменьшенія угла смѣщенія щетокъ суть слѣдующіе:

Въ углу A электромагнита (чер. 25), отдѣльной обмоткой C возбуждаютъ сѣверное намагниченіе, усиливая уже имѣемое тамъ; того же достигаютъ помѣщеніемъ отдѣльнаго индуктора (чер. 26). Разрѣзываютъ сердечники электромагнитовъ вдоль оси ихъ (чер. 27). Такое устройство сердечниковъ электромагнитовъ не препятствуетъ главному магнитному потоку замыкаться черезъ обѣ половины, но въ сильной сте-

пени уменьшаетъ величину магнитнаго потока внутренняго, такъ какъ этотъ послѣдній на пути своемъ встрѣчаетъ воздушное пространство.

Кромѣ этихъ способовъ, существуетъ еще способъ двойной обмотки якоря, гдѣ вторая обмотка, положенная въ обратномъ направленіи, имѣетъ значеніе только при коммутациі, уменьшая самоиндукцію въ секціяхъ. Американскіе техники дѣлаютъ соединеніе якоря съ валомъ гибкимъ, а коллекторъ соединяютъ съ валомъ неизмѣнно, чѣмъ достигается смѣщеніе якоря, а не щетокъ.

Мы видѣли уже, чтобы на коллекторѣ не получалось искръ, надо поставить щетки въ такое положеніе, чтобы черезъ нихъ замыкались секціи, въ которыхъ появлялся бы токъ той же силы и того же направленія, какъ и въ той половинѣ обмотки якоря, куда вступаетъ секція тотчасъ же послѣ размыканія, а это возможно лишь въ томъ случаѣ, если въ секціи будетъ индуктироваться электродвижущая сила, способная нейтрализовать электродвижущую силу самоиндукціи и образовать въ ней токъ такой силы и такого направленія, какъ и въ той половинѣ обмотки якоря, куда эта секція вступаетъ послѣ размыканія черезъ щетку. Положимъ, что мы поставили щетки въ такое положеніе, что въ какой-нибудь секціи дѣйствительно не получается искры въ моментъ ея размыканія черезъ щетку. Если имѣемъ якорь, вся обмотка котораго положена въ одинъ слой и всѣ секціи ея одинаковой длины и одинаковаго сопротивленія, то понятно, что, при размыканіи и другихъ секцій, искръ получаться не будетъ; но, если возьмемъ якорь, гдѣ обмотка положена въ нѣсколько слоевъ, напримѣръ—якорь Сименса, то въ немъ длина, а слѣдовательно и сопротивленіе отдѣльныхъ секцій, будутъ различны, также какъ и разстоянія ихъ отъ полюсныхъ наконечниковъ, вслѣдствіе чего величины электродвижущихъ силъ индукціи и самоиндукціи въ нихъ будутъ различны. Равенство

$$e_{\text{инд.}} = ir + e_{\text{самоинд.}}$$

для нѣкоторыхъ секцій удовлетворено не будетъ и, при размыканіи ихъ, непременно будутъ получаться искры.

Итакъ, для того, чтобы не получалось совсѣмъ искръ на коллекторѣ, необходимо при конструированіи динамо-машинъ и электродвигателей соблюдать слѣдующія условія:

1) Симметричность расположенія секцій.

2) Обмотка якоря должна быть раздѣлена по возможности на большое число секцій.

3) Сопротивленіе и длина секцій должны быть одинаковы (избѣгать сrostковъ и спаекъ, измѣняющихъ сопротивленіе секцій).

4) Коллекторъ долженъ быть тщательно обточенъ и концы щетокъ пришлифованы къ нему.

Въ динамо-машинахъ и электродвигателяхъ, работающих при различныхъ нагрузкахъ, слѣдуетъ устанавливать щетки въ такомъ положеніи, чтобы при полной нагрузкѣ не получалось искръ; тогда, при уменьшеніи нагрузки, хотя и будутъ получаться искры, но незначительной уже величины. Если же щетки установить для неполной нагрузки, то, при увеличеніи ея, искры будутъ настолько велики, что сожгутъ какъ щетки, такъ и коллекторъ.

Обмотка Сименса до сихъ поръ еще употребляется на практикѣ, въ особенности въ сильныхъ машинахъ, но съ соблюденіемъ равенства длины и симметричности расположенія секцій. Преимущество якорей съ обмоткой Сименса передъ якорями Грамма заключается въ томъ, что индукція въ нихъ совершеннѣе, такъ какъ вся обмотка положена снаружи сердечника, самоиндукція меньше, а слѣдовательно и уголъ смѣщенія щетокъ меньше.

Обратимъ здѣсь вниманіе на динамо-машину компаніи «Allgemeine Gesellschaft», въ которой якорь вращается внутри желѣзнаго цилиндра, по внѣшней окружности котораго расположены индукторы. Между каждыми двумя смежными индукторами сдѣланы въ тѣлѣ цилиндра прорѣзы, для увеличенія сопротивленія утечекъ. Ранѣе было показано, что, для уменьшенія угла смѣщенія щетокъ, надо было уменьшить по возможности уголъ обхвата якоря полюсными придатками; тогда какъ въ этой динамо-машинѣ, хотя якорь весь охваченъ желѣзомъ электромагнитовъ, уголъ смѣщенія щетокъ весьма не-

значителенъ. Объясняется это близостью обмотки индукторовъ къ сердечнику, благодаря чему искаженіе магнитнаго потока получается небольшое, и малой реакціи якоря системы Сименса, обыкновенно употребляемаго этой фирмой.

Х. Вліяніе смѣщенія щетокъ на величину магнитнаго потока въ электродвигателѣ.

Мы видѣли, что въ электродвигателяхъ приходится смѣщать щетки противъ направленія вращенія якоря. Очевидно, что въ электродвигателяхъ, работающих на передній и задній ходъ, неудобно каждый разъ смѣщать щетки въ должную сторону; поэтому, лучше оставлять ихъ на безразличной линіи.

Разсмотримъ теперь количественное вліяніе смѣщенія щетокъ на магнитный потокъ въ электродвигателяхъ и динамо-машинахъ. Мы имѣли:

$$\Phi = \frac{\text{магнитодвижущая сила}}{\Sigma \text{магнитныхъ сопротивленій}} .$$

Ранѣе мы проводили аналогію между магнитною цѣпью динамо-машины или электродвигателя съ электрической цѣпью безъ отвѣтвленій. На самомъ же дѣлѣ магнитная цѣпь въ динамо-машинахъ и электродвигателяхъ имѣетъ развѣтвленія, поэтому и сравнивать ее надо съ электрической цѣпью, имѣющей развѣтвленія. Магнитный потокъ, образуемый электромагнитами, имѣетъ два пути: одинъ черезъ желѣзо якоря, а другой помимо его. Такимъ образомъ, магнитный потокъ въ электродвигателѣ можно сравнивать съ электрической цѣпью, имѣющей два развѣтвленія.

Назовемъ магнитное сопротивленіе желѣза якоря черезъ R , а сопротивленіе, представляемое теченію другой части магнитнаго потока (такъ называемой магнитной утечкѣ) черезъ r . Такъ какъ плаги обмотки якоря, лежащія въ двойномъ углѣ смѣщенія щетокъ, образуютъ магнитодвижущую силу, направленную въ сторону, противоположную съ магнитодвижущей силой, образуемой электромагнитами, то магнитную цѣпь электродвигателя нужно сравнивать съ электрической цѣпью

съ двумя отвѣтвленіями, въ одномъ изъ которыхъ имѣется своя обратная электродвижущая сила (чер. 28). Когда имѣемъ дѣло съ электрической цѣпью съ отвѣтвленіями, то проще пользоваться закономъ Киргофа. По этому закону для отвѣтвленія, имѣющаго обратную электродвижущую силу e , имѣемъ:

$$E - e = \Sigma i R.$$

Сообразно съ этимъ, для магнитной цѣпи электродвигателя имѣемъ:

$$4 \pi m i - 4 \pi n' \frac{I}{2} = \Phi_{як.} (R_{як.} + R_{воз.}) + \gamma \Phi_{як.} R_{маг.}$$

гдѣ m — число оборотовъ обмотки электромагнитовъ;

i — сила тока, проходящаго по обмоткѣ электромагнитовъ;

n' — число плавовъ обмотки явора, заключенныхъ въ двойномъ углѣ смѣщенія щетокъ (обыкновенно отъ $\frac{1}{10}$ до $\frac{1}{12}$ всего числа плавовъ обмотки явора и въ исключительныхъ случаяхъ $\frac{1}{7}$);

$\frac{I}{2}$ — сила тока въ обмоткѣ явора;

$\gamma = \frac{\Phi_{полн.}}{\Phi_{як.}}$ коэффициентъ, большій единицы, обыкновенно отъ 1,3 до 2 (значить процентъ потери полного потока доходитъ до 50).

Для опредѣленія работы электродвигателя, воспользуемся приведенной формулой. Если назовемъ двойной уголъ смѣщенія щетокъ черезъ α , то

$$n' = \frac{\alpha}{\pi} \cdot n$$

$$\Phi = \frac{4 \pi m i - 4 \alpha n \frac{I}{2}}{R_{я} + R_{воз.} + \gamma R_{маг.}}$$

Въ этой формулѣ члены $R_{я}$, $R_{воз.}$, $\gamma R_{маг.}$ — величины, мало измѣняющіяся въ условіяхъ нормальной работы электродвигателей; принимая ихъ за постоянныя, получимъ формулу:

$$\Phi_{я} = A m i - C n I \alpha.$$

Для данного двигателя величины m , n и α также можно принять за постоянные, тогда формула приметъ видъ:

$$\Phi_a = A' i - C' I.$$

Изъ этой формулы видно, что если второй членъ (т. е. магнитный потокъ отъ полюсовъ сердечника якоря) будетъ сильнѣе главнаго магнитнаго потока (отъ электромагнитовъ), то вращеніе должно идти въ обратномъ направленіи, что и было на лекціи показано на небольшомъ электродвигателѣ, въ которомъ, при размыканіи обмотки электромагнитовъ, якорь начиналъ вращаться въ обратную сторону.

Подобное явленіе дало идею устраивать электродвигатели совсѣмъ безъ электромагнитовъ. На практикѣ, однако, подобные электродвигатели примѣненія не имѣли, благодаря своей малой экономичности.

XI. Измѣненіе направленія вращенія якоря электродвигателя.

Было уже показано, что измѣнить направленіе вращенія якоря электродвигателя можно двумя способами:

- 1) Перемѣнивъ направленіе тока въ обмоткѣ якоря.
- 2) Перемѣнивъ направленіе тока въ обмоткѣ электромагнитовъ.

На практикѣ пользуются всегда первымъ способомъ, такъ какъ самоиндукція, препятствующая быстрой перемѣнѣ направленія тока, меньше въ обмоткѣ якоря, чѣмъ въ обмоткахъ электромагнитовъ. Кромѣ того, перемѣна намагниченія электромагнитовъ требуетъ болѣе продолжительный промежутокъ времени и при размыканіи цѣпи электромагнитовъ, въ обмоткѣ ихъ появляется экстра токъ большой силы, опасный для цѣлости изолировки ся.

Для предупрежденія отъ пробитія изолировки проводниковъ при появленіи экстра токовъ, на практикѣ употребляютъ особые приборы, называемые предохранителями отъ большой разности потенциаловъ. Устройство ихъ основано на слѣдующемъ: параллельно съ обмоткой электромагнитовъ, въ цѣпь вводятся два угольные кружка А и В (черт. 29), со слюдяной между

ними прокладкой С. Съ боковъ на угольные кружки давятъ пружинки D и E, черезъ которыя токъ проходитъ въ кружки. При прохожденіи тока по обмоткамъ электромагнитовъ, токъ между кружками проходить не будетъ; при размыканіи же цѣпи электромагнитовъ, появляющійся экстратокъ (напряженность котораго можетъ быть очень велика) пройдетъ по верху слюдяной прокладки С отъ одного угольнаго кружка къ другому, минуя такимъ образомъ путь черезъ изолировку проводниковъ.

На лекціи былъ показанъ опытъ появленія искры при размыканіи цѣпи электромагнита. Въ цѣпь достаточнаго числа вторичныхъ элементовъ былъ введенъ электромагнитъ съ толстымъ желѣзнымъ сердечникомъ и обмоткой, состоящей изъ большого числа оборотовъ изолированной проволоки. Параллельно обмоткѣ электромагнита была введена свѣча Яблочкова, изъ которой былъ вынутъ изолирующій слой. При размыканіи цѣпи электромагнита, въ свѣчѣ Яблочкова получалась искра.

ХII. Распределеніе электрической энергіи въ цѣпи электродвигателей *series* и *shunt*.

Обратимся теперь къ вопросу о распределеніи въ цѣпи электродвигателя электрической энергіи, полученной отъ какаго-нибудь источника электричества. Если возьмемъ электродвигатель съ обмоткой *series*, то электрическая цѣпь его будетъ состоять изъ обмотки электромагнитовъ и обмотки якоря, раздѣленной на двѣ равныя параллельныя вѣтви (черт. 30). Здѣсь не лишнимъ будетъ замѣтить, что выгоднѣе устраивать электродвигатели *series* такъ, чтобы токъ сначала проходилъ черезъ обмотки всѣхъ электромагнитовъ электродвигателя, а затѣмъ уже вступалъ въ обмотку якоря его, такъ какъ при этомъ изолировка обмотки электромагнитовъ подвергается дѣйствию меньшей разности потенціаловъ, чѣмъ въ томъ случаѣ, когда электродвигатель устроенъ такъ, что токъ обходитъ сначала обмотку одного электромагнита, затѣмъ обмотку якоря и, наконецъ, обмотку второго электромагнита.

Назвавъ черезъ V разность потенциаловъ на зажимахъ электродвигателя, а черезъ I силу тока въ цѣпи, получимъ:

$$VI = [R_m + R_\alpha] I^2 + P,$$

гдѣ VI — полная энергія, полученная электродвигателемъ;

R_m — сопротивление обмотки электромагнитовъ;

R_α — сопротивление якоря;

P — количество электрической энергіи, превращенной электродвигателемъ въ механическую.

Мы уже знаемъ, что $P = eI$, гдѣ e есть обратная электродвижущая сила, развиваемая якоремъ электродвигателя при своемъ вращеніи. Подставивъ вмѣсто P равную ему величину, будемъ имѣть:

$$VI = [R_m + R_\alpha] I^2 + eI.$$

Если имѣемъ электродвигатель съ обмоткой shunt, то (какъ видно на чертежѣ 31) токъ, получаемый отъ источника электричества раздѣляется на двѣ части: большая идетъ черезъ обмотку якоря, раздѣленную на двѣ параллельныя цѣпи, а меньшая черезъ обмотку электромагнитовъ. Назвавъ черезъ I силу тока въ якорѣ, а черезъ i — силу тока въ обмоткѣ электромагнитовъ, будемъ имѣть:

$$V(I + i) = R_m i^2 + R_\alpha I^2 + P$$

$$P = eI$$

$$V(I + i) = R_m i^2 + R_\alpha I^2 + eI.$$

XIII. Энергія, потраченная на побочныя явленія при работѣ электродвигателя.

Мы обозначали величину энергіи, превращенной электродвигателемъ въ механическую, черезъ $P = eI$.

Но раньше имѣли $P = \Phi n N \cdot I$;

значитъ $\Phi n N \cdot I = eI = P$.

Величину P можно представить въ видѣ суммы работъ:

вредной и полезной. Вредная работа есть та, которая тратится на преодоление вредных механических сопротивлений — энергию такъ называемых паразитных токовъ (токовъ Фуко) и на гистерезисъ. Итакъ:

$P = eI =$ полезная работа + работа вредных механических сопротивлений + работа паразитных токовъ + работа на гистерезисъ.

Работа вредных механических сопротивлений обуславливается трениемъ и сопротивлениемъ воздуха. Кроме известныхъ причинъ, увеличивающихъ механическое трение (вѣсъ, скорость движенія, родъ металловъ и др.), въ электродвигателяхъ на величину трения оказываютъ влияние несимметричность расположения якоря въ магнитномъ полѣ и несимметричность самого магнитнаго поля. Несимметричнымъ расположениемъ якоря относительно полюсныхъ придатковъ электромагнитовъ на практикѣ иногда пользуются для уменьшенія влияния вѣса якоря. Въ зависимости отъ быстроты вращения, работа вредных механическихъ сопротивлений выразится черезъ fN , гдѣ f есть постоянный коэффициентъ, а N число оборотовъ якоря въ 1 секунду.

Паразитные токи, иначе называемые токами Фуко, образуются въ металлическихъ массахъ при перемѣщеніи ихъ въ магнитномъ полѣ. Энергія этихъ токовъ пропорціональна N^2 . Въ самомъ дѣлѣ, въ замкнутомъ контурѣ работа (законъ Джауля) пропорціональна E^2 , а E пропорціональна скорости; значить, энергія паразитныхъ токовъ можетъ быть выражена черезъ gN^2 , гдѣ g есть коэффициентъ пропорціональности магнитному потоку.

Для того, чтобы уменьшить потерю энергии на паразитные токи, сердечники якорей дѣлаются несплошными, а изъ сложенныхъ стопой тонкихъ листовъ мягкаго желѣза, изолированныхъ другъ отъ друга бумагой или слоемъ шелка.

Токи Фуко получаютъ не только въ сердечникѣ якоря, но и во всѣхъ металлическихъ частяхъ его и металлическомъ валѣ якоря, такъ какъ этотъ послѣдній тоже вращается въ воздушномъ пространствѣ, въ которомъ проходитъ магнитный потокъ. Въ зубчатыхъ якоряхъ (Пачинотти) токи Фуко по-

являются и въ полюсныхъ придаткахъ, что сказывается ихъ разогрѣваніемъ. Возбужденіе паразитныхъ токовъ въ полюсныхъ придаткахъ возможно еще вслѣдствіе того, что листы желѣза якоря неплоски или не совсѣмъ точно помѣщены, т. е. плоскости ихъ неперпендикулярны къ оси, а въ дурно собранныхъ машинахъ и не совсѣмъ центральны. Въ хорошихъ машинахъ, общая потеря на паразитные токи не превышаетъ 3%. Для уменьшенія токовъ Фуко въ многоамперныхъ машинахъ, гдѣ площадь сѣченія проводника обмотки якоря должна быть значительна, обмотка дѣлается не изъ сплошной проволоки, а изъ проводника, состоящаго изъ нѣсколькихъ проволокъ. Обмотка якорей кладется, для уменьшенія паразитныхъ токовъ, по одному изъ слѣдующихъ четырехъ способовъ (какъ показано на чертежахъ 32, 33, 34 и 35).

На чер. 32 показана обмотка, положенная въ пространствѣ между выступами сердечника; поверхъ положенной такимъ образомъ обмотки наматывается толстая желѣзная проволока.

На черт. 33 обмотка показана положенной въ пространствѣ между выступами сердечника, но выступы эти въ верхней части расширены настолько, что между ними только проходить проволока обмотки.

На чер. 34 показанъ способъ, при которомъ проводникъ обмотки протягивается сквозь сквозныя отверстія, сдѣланныя въ сердечникѣ якоря—вдоль его производящихъ.

На чер. 35 показанъ способъ, при которомъ обмотка кладется прямо поверхъ желѣзнаго сердечника.

Разсмотримъ теперь явленіе, называемое гистерезисомъ. Намагниченіе желѣза и другихъ сильно магнитныхъ тѣлъ зависитъ отъ предшествовавшихъ магнитныхъ состояній тѣла, такъ что, при одинаковыхъ остальныхъ условіяхъ, намагниченіе болѣе въ случаѣ убыванія магнетизма (когда предшествующія намагниченія были сильнѣе), чѣмъ въ случаѣ его возрастанія (когда предшествующія намагниченія были слабѣе). Это отставаніе измѣненія намагниченія отъ намагничивающей силы и называется гистерезисомъ.

Если будемъ измѣнять величину намагничивающей силы H отъ нуля до нѣкоторой величины OF (чер. 36), то возрастаніе

намагниченія желѣзнаго стержня, намагничиваемаго впервые, выразится кривой OA , которая показываетъ, что намагниченіе возрастаетъ непропорціонально намагничивающей силѣ: сначала оно возрастаетъ быстрѣе, а затѣмъ медленнѣе, нежели намагничивающая сила. При обратномъ измѣненіи намагничивающей силы отъ OF до нуля, при тѣхъ же величинахъ намагничивающей силы, получаютъ большія намагниченія, такъ что измѣненіе намагниченія стержня выразится кривой $A'DA$, лежащей выше кривой OA , и когда намагничивающая сила уменьшится до нуля, то намагниченіе стержня будетъ не нуль, а нѣкоторая величина OA' , представляющая напряженность остаточнаго магнетизма. Если затѣмъ снова увеличивать намагничивающую силу отъ нуля до OF , то возрастаніе намагниченія стержня представится кривой ACA' , лежащей между кривыми OA и ADA' . При дальнѣйшемъ попеременномъ измѣненіи намагничивающей силы отъ OF до нуля и обратно, соотвѣтствующія измѣненія намагниченія будутъ изображаться тѣми же кривыми ADA' и $A'CA$.

Если измѣнять непрерывно намагничивающую силу сначала отъ нуля до $+H$, а затѣмъ попеременно отъ $+H$ до $-H$ и обратно отъ $-H$ до $+H$, то ходъ намагниченія желѣзнаго стержня изобразится:

При первоначальномъ измѣненіи намагничивающей силы отъ нуля до $+H$ — кривой OA (чер. 37); при измѣненіи намагничивающей силы отъ $+H$ до $-H$ — кривой ADA' ; наконецъ, при измѣненіи намагничивающей силы отъ $-H$ до $+H$ — кривой $A'CA$.

Работа, производимая магнитодвижущей силой, пропорціональна количеству произведеннаго магнетизма и магнитодвижущей силѣ. Такимъ образомъ, при увеличеніи намагниченія стержня на величину ΔB , работу для каждаго кубическаго сантиметра его можно выразить въ видѣ произведенія $H \cdot c \cdot \Delta B$, гдѣ H есть напряженность магнитнаго поля, c — коэффициентъ пропорціональности, а B — магнитный потокъ, проходящій черезъ квадратный сантиметръ стержня (т. е. плотность магнитнаго потока). Произведеніе изъ H на ΔB есть нѣкоторая площадь, заключенная между частью кривой на-

магнитнаго $a b A$ (чер. 38), осью ординатъ и двумя прямыми, параллельными оси абсциссъ, проведенными через точки a и b кривой намагнитнаго.

Такимъ образомъ, элементарная работа намагнитнаго ΔW для каждаго кубическаго сантиметра вещества стержня выразится:

$$W = \sum \Delta W = \sum H c . \Delta B = c \sum H . \Delta B = c \times \text{площадь, заключенную между кривой намагнитнаго и осью ординатъ.}$$

Подобное же выраженіе получимъ и для работы при размагнитнаго стержня.

Вычтя изъ работы намагнитнаго, работу размагнитнаго, мы получимъ работу, потраченную для каждаго кубическаго сантиметра стержня. Но разность работы намагнитнаго и работы размагнитнаго выразится площадью, заключенною между кривыми $A' C A$ и $A' D A$ (чер. 37), т. е. между кривыми намагнитнаго и размагнитнаго. Въ якорѣ электродвигателя, при работѣ его, каждая частица сердечника подвергается полному циклу намагнитнаго, причемъ магнитная индукція измѣняется отъ нѣкоторой величины $+ B$ до $- B$. Работа, потраченная для всякаго сердечника, будетъ пропорціональна его объему и числу цикловъ, а значитъ и числу оборотовъ; поэтому энергію, потраченную на гистерезисъ, можно выразить въ видѣ произведенія $h N$, гдѣ N есть число оборотовъ якоря въ секунду, h —коэффициентъ. Энергія, потраченная благодаря гистерезису, также, какъ и работа паразитныхъ токовъ, превращается въ тепло. Опытомъ опредѣлено, что въ слабомъ магнитномъ полѣ гистерезисъ для стали меньше, чѣмъ для желѣза, а въ сильномъ магнитномъ полѣ гистерезисъ значительнѣе для стали, чѣмъ для желѣза. Въ динамо-машинахъ и электродвигателяхъ, гдѣ напряженность магнитнаго поля велика, очевидно, выгоднѣе, въ смыслѣ уменьшенія работы, потраченной на гистерезисъ, употреблять мягкое желѣзо.

Согласно вышесказанному, вмѣсто выраженія:

$$P = e I = \Phi n N I = P \text{ полезная} + P \text{ вредныхъ сопротивленій,}$$

можно написать: $P = e I + \Phi n N I = P \text{ полезная} + f N + g N^2 + h N.$

Итакъ, механическая энергія электродвигателя распределяется на производство полезной работы и преодоленіе вредныхъ сопротивленій, какъ то: механическаго тренія, паразитныхъ токовъ и гистерезиса.

XIV. Моментъ пары силъ, доставляемый электродвигателемъ. Моментъ вредныхъ сопротивленій.

Работа всякаго механическаго двигателя характеризуется двумя величинами: моментомъ его и угловою скоростью. Если двигатель дѣлаетъ въ одну секунду N оборотовъ (черт. 39), а по окружности дѣйствуютъ двѣ силы, изъ которыхъ каждая равна f , то работа такого двигателя выразится черезъ $2f \times 2\pi rf$, гдѣ произведеніе $2rf$ называется моментомъ пары силъ f .

Вообще же, для выраженія работы всякаго механическаго двигателя можетъ быть написано выраженіе:

$P = M \times 2\pi N$, гдѣ черезъ M названъ моментъ его.

Подобнымъ же образомъ и мощность электродвигателя можетъ быть выражена произведеніемъ его момента и угловой скорости.

Здѣсь не лишнее замѣтить, что пригодность двигателя для известной цѣли не можетъ быть обусловливаема исключительно величиной развиваемой имъ мощности. Кромѣ величины развиваемой имъ мощности, необходимо еще, чтобы и форма самой энергіи подходила къ формѣ той энергіи, которую приходится преодолевать двигателю. Напримѣръ, аккумуляторъ, дающій два вольта разности потенціаловъ на зажимахъ и токъ, силой 30 амперъ, т. е. способный развить энергію 60 уаттовъ, не въ силахъ зажечь 60-уаттовой лампочки накаливанія, такъ какъ такая лампочка обыкновенно для зажиганія требуетъ ббльшей разности потенціаловъ, чѣмъ въ состояніи развить взятый аккумуляторъ. Вотъ по этой-то причинѣ, въ ббльшей части случаевъ приходится мощность электродвигателя трансформировать посредствомъ зубчатыхъ колесъ, ремней и другими способами, измѣняя величину его момента. Итакъ, кромѣ величины мощности электродвигателя, необходимо знать моментъ

его, чтобы судить о работѣ, которую онъ въ состояніи произвести.

Въ формулѣ, выражающей мощность двигателя:

$$P = 2\pi N \cdot M \dots \dots \dots (\gamma)$$

всѣ величины выражены въ абсолютныхъ единицахъ. Чтобы выразить мощность электродвигателя въ зависимости отъ его электрическихъ данныхъ, т. е. отъ разности потенціаловъ на зажимахъ и силы тока, обратимся къ ранѣ выведенной формулѣ:

$$P = \Phi \cdot n \cdot N \cdot I = eI = P_{\text{пол.}} + P_{\text{вредн. сопр.}}$$

Вредныя сопротивленія въ хорошихъ современныхъ машинахъ не превышаютъ 10% отъ общей энергіи. Мы уже имѣли:

$$P = P_{\text{пол.}} + fN + gN^2 + hN \dots \dots \dots (a)$$

Изъ формулы (γ):

$$M = \frac{P}{2\pi N}$$

Подставляя въ это выраженіе для М, вмѣсто Р, значеніе его изъ формулы (a), получимъ:

$$M = \frac{P_{\text{пол.}}}{2\pi N} + \frac{f+h}{2\pi} + \frac{gN}{2\pi}$$

Если вмѣсто Р подставимъ его выраженіе въ зависимости отъ магнитнаго потока, то получимъ:

$$M = \frac{\Phi \cdot n \cdot I}{2\pi} = M_{\text{пол.}} + \frac{f+h}{2\pi} + \frac{gN}{2\pi}$$

отсюда:
$$M_{\text{пол.}} = \frac{\Phi \cdot n \cdot I}{2\pi} - \frac{f+h}{2\pi} - \frac{gN}{2\pi}$$

или
$$M_{\text{пол.}} = \frac{eI}{2\pi N} - \frac{f+h}{2\pi} - \frac{g}{2\pi} N$$

М есть моментъ, данный якорю со стороны электро-динамическихъ силъ. М_{пол.} — моментъ той пары силъ, которая производитъ полезную работу.

Всѣ величины этой послѣдней формулы выражены въ абсолютныхъ единицахъ. Если желательно величину момента выразить въ электрическихъ мѣрахъ, то слѣдуетъ ввести коэффициентъ 10^{-7} , тогда:

$$M = \frac{eI}{2\pi N} 10^{-7} \text{ уаттовъ.}$$

Если желательно имѣть реальное представление о работѣ, производимой электродвигателемъ, то величину M должно выразить въ килограммо-метрахъ:

$$M_{\text{к.-м.}} = \frac{l \text{ (въ вольтахъ)} \times I \text{ (въ амперахъ)}}{2\pi N \times 9.81}.$$

Отсюда мощность P , въ уаттахъ, равная $eI =$

$$P = M_{\text{к.-м.}} \times 2\pi \frac{N}{60} \times 9.81,$$

гдѣ N есть число оборотовъ въ одну секунду.

XV. Неустойчивый режимъ. Дѣйствіе электродвигателя при пусканіи въ ходъ.

Всѣ только что выведенныя формулы справедливы для того состоянія электродвигателя, когда скорость его уже установилась; такое состояніе называется устойчивымъ режимомъ. Когда же электродвигатель только-что пускается въ ходъ, скорость его будетъ мѣняться и выведенныя нами формулы не могутъ имѣть мѣста. Раньше мы имѣли для случая, когда электродвигатель приводится въ дѣйствіе:

$$e = 0$$

$$I_0 \text{ (series)} = \frac{V}{R_3 + R_A}$$

$$I_0 \text{ (shunt)} = \frac{V^0}{R_A}.$$

Помѣръ достиженія нормальной скорости, сила тока I , будетъ уменьшаться отъ наибольшей до нѣкоторой силы I и затѣмъ уже наступитъ устойчивый режимъ.

Разбирать въ подробности всѣ явленія, происходящія при неустойчивомъ режимѣ, мы не будемъ, такъ какъ зависимость ихъ выражается слишкомъ сложными формулами; но, совершенно игнорировать ихъ также нельзя, ибо въ нѣкоторыхъ случаяхъ, на примѣръ, при вращеніи башенъ, приходится пользоваться работой электродвигателя на такое короткое время, что онъ не успѣваетъ дойти до устойчиваго режима и вся работа произведена будетъ только при неустойчивомъ режимѣ.

Въ выведенныхъ формулахъ для выраженія мощности электродвигателя, совершенно не входитъ инерція, тогда какъ на работу электродвигателя, при неустойчивомъ режимѣ, инерція оказываетъ громадное вліяніе. Въ общемъ случаѣ, моменты, преодолѣваемые электродвигателемъ, можно выразить суммой членовъ, изъ которыхъ одни совсѣмъ не зависятъ отъ скорости, другіе пропорціональны скорости въ первой степени, а нѣкоторые пропорціональны квадрату скорости; для такого случая, общее уравненіе движенія будетъ:

$$K = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\Phi \cdot n \cdot I}{2\pi} - c - b\omega - a\omega^2 \quad . \quad . \quad . \quad (\delta)$$

гдѣ K есть моментъ инерціи всей системы;

$\frac{d\omega}{dt}$ — угловое ускореніе;

$\frac{\Phi \cdot n \cdot I}{2\pi}$ — движущій моментъ.

На примѣръ, моменты тренія и гистерезиса не зависятъ отъ скорости; моменты, вызываемые паразитными токами, пропорціональны скорости; моменты сопротивленія, встрѣчаемые судовымъ винтомъ, пропорціональны квадрату скорости.

Въ формулѣ (δ), замѣняя I его величиной изъ уравненія $I = \frac{V - \Phi n N}{R}$,

$$\begin{aligned} \text{получимъ } K \frac{d\omega}{dt} &= \frac{\Phi n}{2\pi} \frac{(V - \Phi n N)}{R} - c - b\omega - a\omega^2 = \\ &= \frac{\Phi n I_0}{2\pi} - \frac{1}{R} \left(\frac{\Phi n}{2\pi} \right)^2 \omega - c - b\omega - a\omega^2. \end{aligned}$$

Когда a не равенъ нулю (случай движенія судового винта), устойчивый режимъ наступаетъ очень быстро, а потому практически совершенно достаточно разсмотрѣть только тѣ случаи, когда члены, пропорціональные квадрату скорости, совсѣмъ не входятъ. Полагая, поэтому $a = 0$ и называя постоянныя, независящія отъ угловой скорости, черезъ C , а постоянныя, зависящія отъ угловой скорости черезъ B , имѣемъ:

$$K \frac{d\omega}{dt} = C - B\omega.$$

Это есть дифференціальное уравненіе кривой. Рѣшая его относительно ω , получимъ:

$$\omega = \frac{C}{B} \left(1 - e^{-\frac{B}{K} t} \right) \dots \dots \dots (b)$$

гдѣ e есть основаніе Неперовыхъ логариемъ. Называя черезъ β уголъ, составляемый касательной къ кривой съ осью абсциссъ, имѣемъ:

$$\text{tg } \beta = \frac{C}{K} e^{-\frac{B}{K} t}.$$

Построивъ уравненіе, получимъ кривую, изображенную на черт. 40.

Когда кривая, распрямившись, пойдетъ параллельно оси абсциссъ, это будетъ означать, что ω сдѣлалась величиной постоянной, а это укажетъ на наступленіе устойчиваго режима. Изъ уравненія (b) видно, что чѣмъ больше величина $\frac{B}{K}$, тѣмъ меньше будетъ промежутокъ времени; для того же, чтобы величина $\frac{B}{K}$ была наибольшая, надо, чтобы B было наибольшее, а K наименьшее, т. е., чтобы потокъ дѣйствующій

$$\left[B = \frac{1}{R} \left(\frac{\Phi n}{2\pi} \right) c \right]$$

былъ наибольшій, а инерція К—наименьшая. На лекціи были показаны опыты, объясняющіе вліяніе инерціи тѣлъ на измѣненіе промежутка времени для наступленія устойчиваго режима. Маленькій электродвигатель (типа Манчестеръ) приводилъ въ движеніе модель судового винта, вращающагося въ водѣ; когда электродвигатель пускался въ ходъ, то сила тока въ цѣпи быстро падала и число оборотовъ быстро возрастало до нормальнаго. Когда тотъ же электродвигатель приводилъ во вращеніе тяжелый свинцовый цилиндръ, то токъ въ цѣпи падалъ гораздо медленнѣе и время для наступленія устойчиваго режима требовалось гораздо продолжительнѣе.

XVI. Неустойчивый режимъ при остановкѣ электродвигателя.

Когда электродвигатель останавливаютъ, то также приходится имѣть дѣло съ неустойчивымъ режимомъ. Если бы электродвигатель преодолевалъ только работу тренія, то движеніе при остановкѣ получилось бы равномернo ускорительное и изобразилось бы прямой АВ, показанной на черт. 41. Въ томъ случаѣ, когда существуютъ моменты, зависящіе отъ скорости, то движеніе при остановкѣ изобразится кривой А'В'. Если въ моментъ остановки электродвигателя не размыкать цѣпи электромагнитовъ, а цѣпь якоря замкнуть короткимъ проводникомъ, то живая сила, преобразованная въ электрическую энергію, переходитъ въ тепло и кривая движенія изобразится линіей А"В". Если приведена въ движеніе система тѣлъ, вращающихся съ различными скоростями, то, для полученія момента инерціи всей системы, придется суммировать моменты инерціи отдѣльныхъ частей, вращающихся съ различными скоростями. Напримѣръ, если электродвигатель дѣлаетъ N оборотовъ въ секунду и поднимаетъ нѣкоторый грузъ массы m посредствомъ шкива радіуса r, дѣлающаго N' оборотовъ въ секунду, то ускореніе будетъ $\frac{dv}{dt}$, а $r \left(\frac{N'}{N} \right) \omega$ будетъ скорость:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{r N'}{N} \frac{d\omega}{dt}$$

сила $m \frac{dv}{dt} = m \frac{r N'}{N} \frac{d\omega}{dt}$, а моментъ ея

равенъ $m r^2 \frac{N'}{N} \frac{d\omega}{dt}$.

Моментъ инерціи всей системы выразится суммой моментовъ инерціи отдѣльныхъ частей этой системы, т. е.

$$K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_r \frac{N'}{N} \frac{d\omega}{dt} + m r^2 \frac{d\omega}{dt} \frac{N'}{N}.$$

XVII. Пусканіе въ ходъ электродвигателя. Реостаты.

При пусканіи въ ходъ электродвигателя, въ первые моменты число оборотовъ и обратная электродвижущая сила, развиваемая якоремъ его, будутъ весьма малы, вслѣдствіе чего сила тока, проходящаго по обмоткѣ якоря, можетъ достигнуть такой значительной величины, что токъ сдѣлается опаснымъ для щетокъ, коллектора, а также для обмотки якоря электродвигателя. Сила тока въ якорѣ нѣкоторыхъ электродвигателей при пусканіи ихъ въ ходъ превосходить въ десять разъ силу тока при устойчивомъ режимѣ; нагрѣваніе въ этомъ случаѣ увеличится во сто разъ. Въ тѣхъ случаяхъ, когда устойчивый режимъ наступаетъ весьма быстро (напримѣръ, при вращеніи помощью электродвигателя винта въ водѣ, вентилятора въ воздухѣ и т. п.), можно пускать въ ходъ электродвигатель, не пользуясь никакими предохранительными приспособленіями. Въ тѣхъ же случаяхъ, когда неустойчивый режимъ продолжается значительное время, приходится пользоваться приспособленіями, уменьшающими силу тока въ первые моменты работы электродвигателя. Къ такимъ приспособленіямъ относятся реостаты, вводимые въ цѣпь электродвигателя при пусканіи его въ ходъ; введенное на реостатахъ сопротивленіе уменьшается по мѣрѣ возрастанія числа оборотовъ электродвигателя.

Для электродвигателя series будемъ имѣть

$$I_0 = \frac{V}{R_2 + R_A + x},$$

а для электродвигателя shunt

$$I_0 = \frac{V}{R_{я} + x},$$

гдѣ x есть сопротивление, введенное на реостатѣ. Приведенныя формулы показываютъ, что введеніе добавочнаго сопротивленія въ особенности важно для электродвигателя shunt.

Реостаты часто дѣлаются изъ желѣза, представляя то удобство, что съ увеличеніемъ нагрѣванія ихъ значительно также увеличивается и сопротивление. Для размыканія и замыканія цѣпи электродвигателя, употребляются коммутаторы съ реостатами, показанные на черт. 42 и 43. Коммутаторъ съ реостатомъ для электродвигателя shunt устроенъ такъ, что сначала токъ входитъ въ обмотку электромагнитовъ, а затѣмъ уже въ цѣпь якоря. Въ случаѣ внезапной остановки электродвигателя, вслѣдствіе какихъ-либо поврежденій, сила тока въ обмоткѣ якоря его можетъ достигнуть опасныхъ для электродвигателя размѣровъ. Для предохраненія обмотокъ электродвигателя, въ подобныхъ случаяхъ, въ цѣпь вводятся различнаго устройства автоматическіе максимальные размыкатели, основанные на дѣйствіи электромагнитовъ.

Вмѣсто реостатовъ и максимальнаго размыкателя, Сименсъ часто употребляетъ приборъ слѣдующаго устройства (черт. 44). Въ соленоидъ входитъ желѣзный стержень съ угольнымъ наконечникомъ, подъ которымъ помѣщенъ угольный стержень. Когда токъ не проходитъ по обмоткѣ соленоида, верхній угольный стержень подъ дѣйствіемъ тяжести соприкасается съ нижнимъ углемъ. При пропусканіи черезъ соленоидъ сильнаго тока, желѣзный стержень втягивается въ него, между углами образуется перерывъ, слѣдствіемъ чего получается вольтова дуга, увеличивающая сопротивление цѣпи (поглащаетъ отъ 40 до 50 вольтъ). Помѣръ нарастанія скорости и обратной электродвижущей силы якоря электродвигателя, сила тока въ цѣпи, а слѣдовательно и втягивающая сила соленоида уменьшаются; при наступленіи устойчиваго режима, оба угла снова сблизятся до соприкосновенія.

Иногда употребляют жидкіе реостаты, которые, какъ постоянные, непригодны, вслѣдствіе электролиза и испаренія жидкости. Устраиваются эти реостаты слѣдующимъ образомъ: въ днѣ сосуда укрѣпленъ рядъ вертикальныхъ металлическихъ пластинъ (черт. 45). Въ сосудъ наливается жидкость и сверху вставляется гребенка изъ угольныхъ пластинъ. Помѣръ опусканія гребенки, соприкосновеніе будетъ уменьшаться и когда она коснется дна, то оно будетъ весьма незначительно.

Включать въ цѣль такой реостатъ слѣдуетъ такъ, чтобы на угляхъ выдѣлялся кислородъ, во избѣжаніе быстрого разрушенія металлическихъ пластинъ. Въ Америкѣ на электрическихъ желѣзныхъ дорогахъ часто употребляютъ реостаты изъ согнутой зигзагами металлической ленты, между шлагами которой проложенъ асбестъ и которая затѣмъ спрессована. Такіе реостаты весьма компактны и позволяютъ пропускать черезъ себя токи большой силы, безъ вреда для себя.

XVIII. Условія работы электродвигателя при постоянной разности потенциаловъ и переменной нагрузкѣ.

Разсмотримъ теперь условія движенія электродвигателя при переменной нагрузкѣ и постоянной разности потенциаловъ. Если условимся считать магнитный потокъ въ электродвигателѣ за величину постоянную, т. е. если не будетъ приниматься во вниманіе реакція якоря, то при измѣненіи нагрузки будетъ мѣняться только моментъ вращенія $2 \pi NM$. Мы уже имѣли:

$$2 \pi NM = e I = e \left(\frac{V - e}{R} \right) = \Phi n N \left(\frac{V - \Phi n N}{R} \right)$$

$$2 \pi RM = \Phi n V - (\Phi n)^2 N$$

назвавъ постоянныя, входящія въ послѣднее уравненіе, черезъ a , b и c , получимъ $a M = c - b N$.

Послѣднее выраженіе есть уравненіе прямой линіи, отнесенное къ прямоугольнымъ осямъ координатъ; видъ кривой

изображенъ на черт. 46. На самомъ дѣлѣ, однако, величина магнитнаго потока Φ не есть величина постоянная. Выразить математически зависимость числа оборотовъ отъ переменнѣйшей силы тока очень сложно и придется имѣть съ уравненіями 3-й степени. Наглядно же вопросъ этотъ можетъ быть уясненъ такъ:

мы имѣли для электродвигателя series

$$e = V - IR = \Phi n N$$

отсюда:

$$N = \frac{v - IR}{\Phi n} = \frac{V - IR}{QI},$$

гдѣ Q есть коэффициентъ пропорціональности. Изъ этого выраженія видно, что, если электромагниты ненасыщены, то скорость съ увеличеніемъ силы тока убываетъ быстрѣе, чѣмъ въ томъ случаѣ, если магнитный потокъ былъ бы величиной постоянной. Для электродвигателя series, это свойство характеризуется кривой, показанной на черт. 47. Для электродвигателя shunt мы имѣли:

$$N = \frac{V - IR}{n (A m i - C n, I \alpha)}$$

гдѣ A и C суть постоянныя;

$A m i$ — величина главнаго магнитнаго потока; $C n, I \alpha$ — реакція якоря.

Изъ этой формулы видно, что, при уменьшеніи силы тока, уменьшается и числитель и знаменатель, вслѣдствіе чего N измѣняется медленнѣе и кривая, характеризующая это измѣненіе, будетъ имѣть видъ, показанный на черт. 48.

Отсюда видно, что реакція якоря способствуетъ болѣе незначительному измѣненію числа оборотовъ при измѣненіи нагрузки. Если на электромагниты положить добавочную обмотку, намагничивающую ихъ въ обратномъ направленіи, то будемъ имѣть:

$$N = \frac{V - IR}{n (A m i - C' I)}$$

гдѣ $C' I$ есть сумма реакціи якоря и обратнаго магнитнаго потока, производимаго добавочной обмоткой. Обмотку эту можно подогнать такимъ образомъ, что, при измѣненіи числителя, будетъ соотвѣтственно измѣняться и знаменатель, а число оборотовъ будетъ оставаться неизмѣннымъ. Пуская въ ходъ такой электродвигатель, добавочную обмотку не слѣдуетъ вводить въ цѣпь или даже слѣдуетъ пропускать по ней токъ въ обратномъ направленіи тому, какое онъ имѣетъ при работѣ электродвигателя.

XIX. Вліяніе измѣненія разности потенціаловъ на условія работы электродвигателя.

До сихъ поръ, при всѣхъ разсмотрѣніяхъ, мы предполагали, что разность потенціаловъ на зажимахъ электродвигателя есть величина постоянная. На самомъ же дѣлѣ могутъ быть такіе случаи, когда разность потенціаловъ на зажимахъ электродвигателя можетъ измѣняться, какъ на примѣръ, на электрическихъ шлюпкахъ, гдѣ число аккумуляторовъ, вводимыхъ въ цѣпь, можетъ быть измѣняемо. Хотя, въ большинствѣ случаевъ, разность потенціаловъ на зажимахъ электродвигателя почти всегда величина постоянная, но разсмотрѣть работу электродвигателя, при измѣняющейся разности потенціаловъ, интересно и полезно въ томъ отношеніи, что приэтомъ выясняются многія свойства электродвигателей.

Начнемъ съ простѣйшаго случая, когда магнитный потокъ въ якорѣ будетъ величина постоянная и полезный моментъ не зависитъ отъ числа оборотовъ.

Мы имѣли:

$$M_{\text{пол.}} + \frac{f+h}{2\pi} + \frac{gN}{2\pi} = \frac{\Phi n I}{2\pi} = \frac{\Phi n}{2\pi} \left[\frac{V - \Phi n N}{R} \right].$$

Такъ какъ величина $M_{\text{пол.}}$, по предположенію, не зависитъ отъ скорости вращенія, то, съ измѣненіемъ числа оборотовъ, измѣняться будутъ только члены $\frac{gN}{2\pi}$ и $\frac{\Phi n^2 N}{2\pi R}$.

Въ этихъ обоихъ членахъ величина N входитъ въ первой степени; слѣдовательно, это выраженіе представляетъ уравненіе прямой линіи. Откладывая по оси абсциссъ величины V , а по оси ординатъ величины N , получимъ прямую AB , показанную на черт. 49. Разсматривая эту прямую, видимъ — во первыхъ, что для начала движенія необходима нѣкоторая предѣльная разность потенциаловъ, и во вторыхъ, помѣръ увеличенія разности потенциаловъ, увеличивается и число оборотовъ. Изъ формулы явствуетъ, что, если пренебречь членомъ $\frac{gN}{2\pi}$, величина котораго обыкновенно бываетъ незначительная, то въ первой части уравненія останутся члены, независящіе отъ числа оборотовъ, а это значитъ, что и сила тока I , для даннаго случая, будетъ величина постоянная. Такъ оно и бываетъ на самомъ дѣлѣ въ электродвигателяхъ: сила тока мѣняется только на нѣсколько процентовъ.

Все сказанное, конечно, будетъ вѣрно для магнито-электрическихъ двигателей и для электродвигателей съ обмоткой shunt, когда электромагниты доведены до достаточной степени намагничиванія и когда магнитный потокъ можетъ считаться постояннымъ.

Для электродвигателя series будемъ имѣть:

$$\Phi n = QI;$$

$$I = \frac{V - QIN}{R_3 + R_A}; \quad I = \frac{V}{R_3 + R_A + QN}$$

$$M_{\text{пол.}} + \frac{f+h}{2\pi} + \frac{gN}{2\pi} = \frac{QI^2}{2\pi} = \frac{Q}{2\pi} \left[\frac{V}{R_3 + R_A + QN} \right]^2.$$

Если возможно пренебречь членомъ $\frac{gN}{2\pi}$ (что возможно сдѣлать при большихъ нагрузкахъ), тогда сила тока будетъ величина постоянная.

Разсмотримъ теперь работу электродвигателя shunt въ томъ случаѣ, когда магнитный потокъ въ немъ нельзя считать за величину постоянную. Мы имѣли:

$$M_{\text{пол.}} = \frac{f+h}{2\pi} + \frac{gN}{2\pi} + \frac{\Phi n}{2\pi} \left(\frac{V - \Phi n N}{R} \right) = \frac{KV}{2\pi} \left(\frac{V - KVN}{R} \right) t,$$

гдѣ K есть коэффициентъ пропорціональности.

Въ это выраженіе переменная V входитъ во второй степени и помножается еще на переменную N , т. е. это будетъ уравненіе кривой линіи третьяго порядка. Часть ея, соотвѣтствующая нашему явленію, представится въ видѣ линіи ABC (черт. 50). Скорость приэтомъ стремится къ постоянной величинѣ, но дѣйствительности отвѣчаетъ только часть кривой AB , такъ какъ, при увеличеніи V , только въ началѣ существуетъ пропорціональность V и Φ ; далѣе будетъ уже почти постоянное Φ и будетъ вѣрно соотношеніе, найденное выше для магнито-электрической машины. Въ началѣ періода, сила тока—величина переменная. Итакъ, съ возрастаніемъ разности потенциаловъ, возрастаетъ и число оборотовъ электродвигателя; на этомъ основаніи, иногда пользуются измѣненіемъ разности потенциаловъ для регулированія числа оборотовъ электродвигателя. Все вышеизложенное было доказано на лекціи опытами.

Если электродвигатель работаетъ въ тѣхъ условіяхъ, когда полезный моментъ зависитъ отъ скорости вращенія, напримеръ, если онъ приводитъ въ движеніе судовой винтъ въ водѣ, то имѣемъ:

$$\frac{a N^2}{2 \pi} + \frac{f+h}{2 \pi} + \frac{g N}{2 \pi} = \frac{\Phi n}{2 \pi} \left(\frac{V - \Phi n N}{R} \right)$$

$$a N^2 + b N + c = \left(\frac{\Phi n}{R} \right) V$$

гдѣ a , b и c — величины постоянныя, независящія отъ скорости. Полученное уравненіе есть уравненіе параболы. Вычертивъ ее, (черт. 51) увидимъ, что скорость будетъ возрастать медленно, чѣмъ въ томъ случаѣ, когда моментъ не зависѣлъ отъ скорости. Умноживъ все уравненіе на 2π , получимъ:

$$a N^2 + (f + h) + g N = \Phi \cdot n I.$$

Послѣднее выраженіе есть уравненіе кривой второго порядка (черт. 52). Разсмотрѣвъ ее, увидимъ, что, при увеличеніи скорости, сила тока увеличивается.

XX. Вліяніє различныхъ способовъ введенія сопротивленій при работѣ электродвигателей.

Разсмотримъ теперь, какое вліяніє оказываетъ измѣненіе сопротивленія, введеннаго въ цѣпь электродвигателя. Введемъ сопротивление въ цѣпь обмотки якоря; тогда намагничиваніе электромагнитовъ будетъ величина почти постоянная.

$$M_{\text{пол.}} + \frac{f+h}{2\pi} + \frac{gN}{2\pi} = \frac{\Phi n}{2\pi} \left(\frac{V - \Phi n I}{R+x} \right)$$

x есть введенное сопротивление. Въ это выраженіе входят двѣ переменныя величины N и x . Если двигатель нагруженъ, то величина $\frac{gN}{2\pi}$ будетъ мала и ею можно пренебречь; въ этомъ случаѣ, получится уравненіе прямой (черт. 53). Изслѣдуя эту прямую увидимъ, что съ увеличеніемъ сопротивленія уменьшается число оборотовъ. Если же двигатель не нагруженъ, тогда величиною $\frac{gN}{2\pi}$ пренебречь уже нельзя и для этого случая получится гипербола, которая показываетъ, что съ увеличеніемъ сопротивленія число оборотовъ падаетъ еще быстрѣе. При значительной нагрузкѣ, величину $\frac{gN}{2\pi}$ можно принять за постоянную (пренебрегая измѣненіемъ ея); тогда въ лѣвой части равенства всѣ величины будутъ постоянныя, а слѣдовательно и величина $\frac{V - \Phi n I}{R+x}$, равная силѣ тока въ якорѣ I_a , будетъ также величина постоянная.

Если имѣемъ электродвигатель series, то мы уже знаемъ, что

$$M = \frac{\Phi n I}{2\pi} = \frac{QI^2}{2\pi} = \frac{Q}{2\pi} \left(\frac{V}{R+x+QN} \right)^2$$

Отсюда видно, что уменьшеніе числа оборотовъ, съ увеличеніемъ сопротивленія, введеннаго въ цѣпь электродвигателя, будетъ происходить по нѣкоторой кривой и что сила тока $I = \frac{V}{R+x+QN}$ будетъ оставаться величиной почти постоянной.

Въ рассмотрѣнныхъ случаяхъ мы принимали магнитный потокъ за величину постоянную. Разсмотримъ теперь вліяніе

вводимого сопротивления, если магнитный поток при этомъ будетъ измѣняться.

$$M_{\text{пол.}} + \frac{f+h}{2\pi} + \frac{gN}{2\pi} = \frac{\Phi n}{2\pi} \left(\frac{V - \Phi n N}{R} \right).$$

Въ данномъ случаѣ $N = F(x)$

$$N = F'(\Phi n).$$

Это есть функція сложная. Измѣненіе N , при измѣненіи x , будетъ происходить по кривой, показанной на черт. 54. Съ уменьшеніемъ магнитнаго потока, N сначала убываетъ до minimum, а затѣмъ снова начинаетъ возрастать. Такъ что, если въ тонкую обмотку электродвигателя shunt введемъ реостатъ и начнемъ на немъ вводить сопротивление, то число оборотовъ сначала будетъ уменьшаться, а затѣмъ снова возрастать. Для работы электродвигателя при обыкновенныхъ условіяхъ измѣненія числа оборотовъ, при измѣненіи величины введеннаго сопротивления, а слѣдовательно и величины магнитнаго потока, происходятъ по части кривой, находящейся по правую сторону minimum'a. Чтобы найти условіе minimum'a, надо взять первую производную и приравнять ее нулю, т.-е.

$$\frac{dN}{dx} = \frac{gN}{2\pi} - \frac{\Phi n (M_0 - 2 M_{\text{пол.}})}{[(\Phi n)^2 + gR]^2}$$

гдѣ M_0 есть начальный моментъ электродвигателя (т. е. когда электродвигатель только что пускается въ ходъ).

$$\frac{gN}{2\pi} \text{ есть вообще величина малая.}$$

Если начальный моментъ M_0 будетъ больше, чѣмъ $2 M_{\text{пол.}}$, то величина второго члена будетъ отрицательная и вся производная будетъ также величина отрицательная, а это значить, что, при увеличеніи x , число оборотовъ будетъ убывать.

Если же величины подобрать такъ, чтобы $(M_0 - 2 M_{\text{пол.}})$ была величина отрицательная, то вся производная будетъ величиной положительной, а слѣдовательно, съ увеличеніемъ

x и N будетъ увеличиваться, т. е. изменение числа оборотовъ будетъ происходить по правой половинѣ кривой.

Величину магнитнаго потока, а слѣдовательно и число оборотовъ, можно изменять не только введеніемъ реостата въ цѣпь электродвигателя, но и изменяя уголъ смѣщенія щетокъ, что ясно изъ ранѣе выведенной формулы для выраженія зависимости величины магнитнаго потока Φ отъ угла смѣщенія щетокъ α

$$\Phi = A m i - C n \alpha I.$$

Посмотримъ, какъ отзывается на электродвигательѣ shunt введеніе реостата въ общую цѣпь его (черт. 55). Этотъ случай имѣетъ, главнымъ образомъ, теоретическое значеніе, такъ какъ на практикѣ реостатъ такимъ образомъ никогда не вводится и если сопротивление проводниковъ, соединяющихъ генераторъ съ электродвигателемъ, велико, то употребляютъ и генераторъ и электродвигатель series.

Предположивъ, что разность потенциаловъ V въ точкахъ A и B есть величина постоянная, будемъ имѣть:

$$V' = Ix + IR; \quad V' = Ix + V.$$

$$V' = Ix + I_A R_A + e;$$

$$IR = I_A R_A + e;$$

Если будемъ увеличивать нагрузку, то число оборотовъ и величина e будутъ уменьшаться; величина же $I_A R_A$ вообще очень малая, поэтому и величина i будетъ уменьшаться:

$$I_A = \frac{V' - Ix - \Phi n N}{R_A}$$

$$i = \frac{I_A R_A + \Phi n N}{R_A}.$$

Изъ формулъ явствуетъ, что намагничивающій токъ уменьшается, если величины Φ и N уменьшаются.

Въ выраженіи момента:

$$M_{\text{пол.}} = \frac{\Phi_A n I_A}{2\pi} - M_{\text{вр. сопр.}}$$

входитъ величина Φ . Если увеличить нагрузку, то величина Φ сильно уменьшится и $M_{пол.}$ будетъ настолько малъ, что электродвигатель остановится, такъ какъ I_a увеличится весьма мало. Если электродвигатель и не остановится, то это можно объяснить только тѣмъ, что съ уменьшеніемъ числа оборотовъ и моментъ вредныхъ сопротивленій уменьшится.

Когда динамо-машина работаетъ на одинъ электродвигатель и получается нѣчто подобное, т. е. неустойчивое равновѣсіе и малое измѣненіе нагрузки въ сильной степени измѣняетъ число оборотовъ якоря электродвигателя и генератора. Это можетъ быть уничтожено тѣмъ, что на электромагниты электродвигателя кладется вторая обмотка, но не дифференціальная и за генераторъ берется динамо-машина компаундъ. Уменьшеніе величины магнитнаго потока въ электродвигателяхъ невыгодно еще въ томъ отношеніи, что коэффициентъ полезнаго дѣйствія электродвигателя, какъ увидимъ ниже, уменьшается приэтомъ.

XXI. Различныя комбинаціи генераторовъ и электродвигателей series, shunt и смѣшаннаго.

Разсмотримъ случаи, въ которыхъ электродвигатель series оказывается наиболѣе пригоднымъ. Электродвигатель shunt становится весьма чувствительнымъ къ измѣненію нагрузки въ слѣдующихъ случаяхъ:

- 1) если генераторъ такой величины, что работаетъ на него одного;
- 2) при значительныхъ разстояніяхъ между генераторомъ и электродвигателемъ.

Если для этихъ случаевъ генераторомъ и электродвигателемъ служатъ динамо-машины series, то саморегулированіе возможно (черт. 56). Обыкновенно для такихъ случаевъ выбираютъ и генераторъ и электродвигатель одинаковой мощности.

Чтобы найти соотношеніе между нагрузкой и числомъ обо-

ротовъ, выведемъ зависимость числа оборотовъ отъ электрическихъ величинъ. Мы имѣли $I = \frac{E - e}{R}$; $e = E - IR$; $e = \Phi \cdot n \cdot N$.

Когда въ электродвигателѣ series магниты не доведены до насыщенія, то можно принять, что магнитный потокъ есть функція силы тока, т. е.

$$\Phi = F(I),$$

поэтому $e = c F(I) n N$.

Если генераторъ разнится отъ электродвигателя только по величинѣ, то для него будемъ имѣть подобное же выраженіе:

$$E = c_1 F(I) n_1 N_1$$

гдѣ c и c_1 суть коэффициенты, зависящіе отъ размѣровъ взятыхъ машинъ и качествъ желѣза.

По предыдущему:

$$c F(I) n N = c_1 F_1(I) n_1 N_1 - IR,$$

отсюда $c n N = c_1 n_1 N_1 - \frac{I}{F(I)} R$.

Величины c_1 , n_1 и R суть постоянныя. N_1 можетъ быть сдѣлано также постояннымъ помощью парового регулятора, а потому измѣненіе N будетъ зависѣть отъ измѣненія I и $F(I)$, но такъ какъ I и $F(I)$ измѣняется въ одномъ направленіи, значитъ величина $\frac{I}{F(I)}$ будетъ вообще измѣняться мало и саморегулированіе возможно. Такая система употребляется иногда при передачѣ энергіи на большія разстоянія. Подобное же происходитъ и въ томъ случаѣ, если употребляется и электродвигатель shunt.

Называя черезъ V разность потенціаловъ на зажимахъ электродвигателя, имѣемъ:

$$V = E - I(R_{12} + R_{14} + x),$$

гдѣ x есть сопротивленіе длинныхъ проводниковъ. Если I будетъ увеличиваться, то будетъ увеличиваться и E ; слѣдо-

вательно, V может оставаться постояннымъ, т. е. будетъ происходить до нѣкоторой степени саморегулированіе. Разсмотримъ теперь, какимъ образомъ дѣйствуютъ совмѣстно и генераторъ и электродвигатель (или shunt, или series). Если возьмемъ въ качествѣ генератора большую динамо-машину shunt или компаундъ, такъ что разность потенціаловъ на зажимахъ ихъ можно считать за постоянную величину, то оказывается, что электродвигатель series неудобенъ, такъ какъ съ измѣненіемъ нагрузки чувствительно измѣняется и число оборотовъ. Электродвигатель shunt, при маломъ разстояніи отъ генератора, болѣе пригоденъ, такъ какъ въ немъ съ измѣненіемъ нагрузки число оборотовъ измѣняется не въ такой значительной степени. Если же поставлено задачей, чтобы число оборотовъ съ измѣненіемъ нагрузки не измѣнялось совершенно, то слѣдуетъ брать электродвигатель съ дифференціальной обмоткой.

Въ томъ случаѣ, когда разстояніе отъ генератора до электродвигателя велико, то обѣ системы электродвигателей, какъ shunt, такъ и series, будутъ почти одинаково непригодны, такъ какъ оба они съ измѣненіемъ нагрузки будутъ значительно измѣнять число оборотовъ. Если желательно, чтобы съ измѣненіемъ нагрузки, при этихъ условіяхъ, число оборотовъ не измѣнялось, то придется пользоваться электродвигателемъ съ двойной обмоткой, токи въ которыхъ должны идти въ одномъ направленіи. Если въ качествѣ генератора взята динамо-машина series, то лучше употреблять и электродвигатель series, хотя и shunt въ нѣкоторыхъ случаяхъ можетъ давать довольно удовлетворительные результаты. Въ практикѣ, въ большинствѣ случаевъ, употребляютъ и генераторъ и электродвигатель shunt и тогда распредѣленіе энергіи происходитъ всегда при постоянной разности потенціаловъ.

Въ тѣхъ случаяхъ, когда является опасеніе, что генераторъ можетъ быть перегруженъ (напримѣръ, на желѣзныхъ дорогахъ), тамъ генераторъ shunt не будетъ удовлетворителенъ, такъ какъ разность потенціаловъ на зажимахъ генератора можетъ сразу сильно понизиться при совмѣстномъ дѣйствіи всѣхъ электродвигателей. Поэтому, въ такихъ установкахъ за гене-

раторъ берется динамо-машина съ двойной обмоткой; такія машины нельзя назвать въ полномъ смыслѣ слова компаундъ, такъ какъ толстая обмотка состоитъ всего изъ нѣсколькихъ шлаговъ, которые при нормальной силѣ тока не оказываютъ вліянія на намагничиваніе электромагнитовъ.

XXII. Измѣненіе мощности электродвигателей.

Въ практикѣ можетъ понадобиться иногда измѣнять мощность электродвигателя; это можетъ быть достигнуто измѣненіемъ величины разности потенциаловъ на зажимахъ электродвигателя. Мы уже говорили объ этомъ, когда рассматривали работу электродвигателя при вращеніи гребного винта на шлюпкѣ; тамъ разность потенциаловъ измѣнялась съ измѣненіемъ числа аккумуляторовъ, вводимыхъ послѣдовательно. На желѣзныхъ дорогахъ, когда приходится работать при постоянной разности потенциаловъ на зажимахъ генератора, тамъ самое простое средство измѣнять разность потенциаловъ есть введеніе реостата передъ электродвигателемъ. Способъ этотъ, однако, не экономиченъ; при немъ уменьшается коэффициентъ полезнаго дѣйствія. Съ этой же цѣлью, на американскихъ желѣзныхъ дорогахъ устанавливается по два электродвигателя, совершенно самостоятельныхъ; соединяя обмотки послѣдовательно, уменьшаютъ разность потенциаловъ на зажимахъ вдвое; однако и при этомъ способѣ приходится пользоваться реостатами.

Если работаетъ электродвигатель *series*, то для измѣненія его мощности пользуются слѣдующимъ приспособленіемъ: навиваютъ на электромагниты двѣ обмотки, которыя въ моментъ пуска электродвигателя соединяются послѣдовательно, чѣмъ достигается очень сильное намагничиваніе электромагнитовъ; когда же наступитъ устойчивый режимъ, обмотки соединяются параллельно.

XXIII. Полезное дѣйствіе электродвигателей; испытаніе ихъ нажимомъ Прони.

Положимъ, что нажимъ Прони движется со скоростью N оборотовъ въ секунду вокругъ вала машины и для сообщенія ему этого движенія въ нѣкоторой точкѣ на его окружности приложена къ нему сила F . Работа этой силы въ секунду выразится:

$$P = F \cdot 2\pi r \cdot N.$$

Для сообщеніе нажиму той-же скорости вращенія, можно воспользоваться и меньшей силой, напр. f , но только надо приложить ее къ рычагу l такой длины, чтобы удовлетворялось равенство:

$$\frac{F}{f} = \frac{l}{r}.$$

Понятно, что величина работы P останется той же, если нажимъ будетъ укрѣпленъ неподвижно, а вращаться будетъ валъ со скоростью N оборотовъ въ секунду. Работа силы f выразится:

$$P = fl 2\pi N = 2\pi N \cdot M.$$

fl называется моментомъ.

Если муфта несимметрична, то вѣсъ самого нажима будетъ оказывать вліяніе на скорость вращенія. Моментъ его можетъ быть опредѣленъ по формулѣ:

$$M = K l_1 + q l,$$

гдѣ K есть вѣсъ всего прибора;

l_1 — разстояніе отъ оси вращенія до центра тяжести;

q — вѣсъ добавочнаго груза, положеннаго на рычагъ нажима.

Такимъ образомъ, помощью наблюденій нажима Прони, мы можемъ опредѣлить $P_{\text{пол.}}$. P всегда можно знать по наблюде-

ніямъ электрическихъ величинъ (по амметру и вольтметру), а слѣдовательно найдемъ и $P_{вр. сопр.}$ и бо

$$P - P_{пол.} = P_{вр. сопр.}$$

вредныя сопротивленія будутъ $fN + hN + gN^2$.

P опредѣляется обыкновенно въ уаттахъ, а $P_{пол.}$ — въ килограммо-метрахъ. Чтобы перевести P въ кгрмт., надо P въ уаттахъ раздѣлить на 9,81. Если, при постоянной разности потенциаловъ на зажимахъ, будетъ измѣняться нагрузка, то вмѣстѣ съ тѣмъ будетъ измѣняться число оборотовъ, полезное дѣйствіе и количество затрачиваемой энергіи.

Если изобразить все графически, то получатся кривыя I, II, III (черт. 57), гдѣ I есть кривая измѣненія полезнаго дѣйствія;

II—кривая измѣненія коэффициента полезнаго дѣйствія;

III—кривая измѣненія затраченной энергіи.

Разсматривая эти кривыя, видимъ, что полезная работа и коэффициентъ полезнаго дѣйствія переходятъ черезъ максимумъ; энергія же, затраченная въ электродвигатель, при увеличеніи числа оборотовъ, уменьшается. Для нахождения максимума мощности нужно, принявъ e за переменную независимую, взять производную отъ выраженія:

$$P = eI = \frac{e(V - e)}{R}$$

и приравнять ее нулю:

$$\frac{dP}{de} = \frac{V - e - e}{R} = 0$$

$$V - 2e = 0$$

$$\frac{1}{2} V = e.$$

Слѣдовательно, P будетъ максимумъ при $e = \frac{1}{2} V$.

Значитъ $\eta' = 50\%$ для электродвигателя series, а для shunt оно будетъ еще меньше.

Итакъ, если желательно получить отъ электродвигателя наибольшую мощность, то слѣдуетъ электродвигателю давать такую нагрузку, чтобы развиваемая имъ обратная электродвижущая сила равнялась половинѣ разности потенциаловъ на зажимахъ. На практикѣ, однако, пользуются работой электродвигателя при меньшей мощности, но при большемъ полезномъ дѣйствиіи. Коэффициентъ η' часто достигаетъ величины 96%.

Отношеніе энергіи, развиваемой электродвигателемъ ко всей полученной энергіи, называется коэффициентомъ трансформациіи. Для электродвигателя series полученная энергія будетъ:

$$VI = (R_3 + R_a) I^2 + eI.$$

$$\text{Коэффициентъ трансформациіи } \eta' = \frac{eI}{VI} = \frac{e}{V}.$$

Въ выраженіе для e входитъ множителемъ магнитный потокъ Φ ; слѣдовательно, для того чтобы η' было больше, надо, чтобы Φ былъ больше.

Коэффициентъ механическаго полезнаго дѣйствиія

$$\eta'' = \frac{P_{\text{пол.}}}{P}$$

коэффициентъ экономическаго полезнаго дѣйствиія

$$\eta = \frac{P_{\text{пол.}}}{VI}.$$

Для электродвигателя shunt полученная энергія равна:

$$VI = R_a I_a^2 + R_3 i^2 + eI_a$$

$$\eta' = \frac{eI_a}{VI} = \frac{eI_a}{V(I_a + i)} = \frac{e}{V\left(i + \frac{i}{I}\right)}.$$

Изъ этихъ уравненій видно, что величина η' , а слѣдовательно η'' и η увеличиваются съ увеличеніемъ e .

XXIV. Изслѣдованія электродвигателей помощью электрическихъ измѣреній въ цѣпи динамо-машины и электродвигателя, связанныхъ электрически и механически.

На специальныхъ заводахъ, изслѣдованіе качествъ электродвигателя можетъ быть сдѣлано значительно полнѣе, такъ какъ тамъ есть возможность пользоваться двумя динамо-машинами приблизительно одинаковыхъ размѣровъ и одинаковой мощности. Для изслѣдованія связываютъ механически оба вала динамо-машинъ вмѣстѣ, причемъ одна изъ машинъ работаетъ въ качествѣ генератора, а другая въ качествѣ электродвигателя. Сединивъ обѣ динамо-машины, какъ показано на черт. 58 и сообщивъ зажимы А и В динамо-машины № 1 съ зажимами источника, доставляющаго энергію, пропустимъ токъ, который въ точкѣ А раздѣлится на три части: одна пойдетъ черезъ якорь динамо-машины № 1, а двѣ другія части пойдутъ черезъ обмотки электромагнитовъ динамо-машинъ № 1 и № 2. Число оборотовъ во всякій моментъ можетъ быть определено тахометромъ или счетчикомъ оборотовъ. Динамо-машину № 2 заставляютъ работать на нѣкоторое вѣншее сопротивление.

Введя въ цѣпь динамо-машины № 1 реостатъ, помощью его измѣняютъ силу тока въ якорѣ.

Выраженіе для всей энергіи есть:

$$VI = V(i + i_1) + I_a^2 R_a + e I_a,$$

гдѣ V — есть разность потенциаловъ на зажимахъ электродвигателя;

$V(i + i_1)$ — энергія, потраченная на намагничиваніе электромагнитовъ;

$I_a^2 R_a$ — энергія, потраченная на нагреваніе обмотокъ якоря;

$e I_a$ — энергія механическая.

Величина $e I_a$, равная P , какъ выведено раньше, равна $2(f+h)N + 2gN^2 + \epsilon j$, гдѣ ϵj есть энергія, развиваемая динамо-машиной № 2.

Изъ послѣдняго уравненія имѣемъ:

$$2(f+h) + 2gN = \frac{e I_a - \epsilon j}{N} = a.$$

Измѣняя число оборотовъ динамо-машины, работающей въ качествѣ электродвигателя, можно получить другое подобное же уравненіе:

$$2(f+h) + 2gN_1 = \frac{e_1 I_{1a} - \epsilon_1 j_1}{N_1} = a_1.$$

Изъ этихъ двухъ уравненій опредѣлятся неизвѣстныя величины g и $(f+h)$, считая f и h за одну величину.

$$g = \frac{a - a_1}{2(N - N_1)}$$

$$(f+h) = \frac{a N_1 - a_1 N}{2(N_1 - N)}.$$

Если бы требовалось опредѣлить отдѣльно величины f и h , то слѣдовало бы разомкнуть цѣпь динамо-машины, работающей въ качествѣ генератора, тогда:

$$e_2 I_2 = 2fN_2 + hN_2 + gN_2^2.$$

Отсюда
$$2f + h + gN_2 = \frac{e_2 I_2}{N_2} = a_2.$$

Сравнивая это уравненіе съ предыдущими, легко уже отдѣльно опредѣлить величину f :

$$f = \frac{2a_2 - a}{2}.$$

Можно дѣлать всѣ эти измѣренія, имѣя и слабый источникъ электричества и производя испытаніе безъ нагрузки. Электромагниты намагничиваются отдѣльнымъ токомъ:

$$P = \Phi n N I_a = e I_a = (f+h)N + gN^2.$$

Но этимъ способомъ отдѣльно опредѣлить f и h уже нельзя. Источникъ этого способа заключается въ томъ, что измѣреніе производится безъ нагрузки, при этомъ токъ въ якорѣ будетъ малый и поэтому получается нѣсколько иной магнитный потокъ, а извѣстно, что токи Фуко и гистерезисъ зависятъ отъ величины магнитнаго потока и его распредѣленія. Чтобы отдѣлить f и h отъ g , надо составить другое подобное же уравненіе.

XXV. Сравненіе полезнаго дѣйствія динамо-машинъ и электродвигателей одинаковаго размѣра и типа. Величины коэффициентовъ полезнаго дѣйствія, достигаемыя на практикѣ.

Сравнимъ теперь величину полезнаго дѣйствія у динамо-машины, когда она работаетъ, какъ генераторъ и какъ электродвигатель. Вся энергія, посланная валу въ генераторѣ, изобразится:

$$EI + P_{\text{вр. сопр.}}$$

$$\eta_{\text{генер.}} = \frac{EI - W}{EI + P_{\text{вр. сопр.}}}$$

W есть нагреваніе внутри динамо-машины.

$$\eta_{\text{двиг.}} = \frac{eI - P_{\text{вр. сопр.}}}{eI + W}$$

Для рассматриваемаго случая $e = E$.

Чтобы сравнить эти двѣ величины, приведемъ ихъ къ одному знаменателю и тогда:

$$\eta_{\text{ген.}} = \frac{(EI)^2 - W^2}{(EI + P_{\text{вр. сопр.}})(EI + W)}$$

$$\eta_{\text{двиг.}} = \frac{(eI)^2 - P_{\text{вр. сопр.}}^2}{(EI + P_{\text{вр. сопр.}})(EI + W)}$$

Изъ этихъ двухъ уравненій явствуетъ, что полезное дѣйствіе динамо-машины, когда она работаетъ, какъ генераторъ, будетъ иное, чѣмъ когда она работаетъ, какъ электродвигатель.

Опытъ показываетъ, что въ электродвигателяхъ среднихъ величинъ (отъ 5 до 50 силъ), нагреваніе (W) почти равно работѣ вредныхъ сопротивленій ($P_{\text{вр. сопр.}}$).

Въ очень большихъ машинахъ, мощность которыхъ считается сотнями силъ, нагреваніе относительно мало, а работа вредныхъ сопротивленій велика. Ясно отсюда, что въ качествѣ генератора выгоднѣе пользоваться большой динамо-машиной. Въ малыхъ же динамо-машинахъ нагреваніе значительно больше работы вредныхъ сопротивленій, а потому, работая въ качествѣ электродвигателей, онѣ даютъ бѣльшій коэффициентъ полезнаго дѣйствія. Надо упомянуть еще о томъ, что динамо-машины съ самовозбужденіемъ намагничиваются только тогда, когда якорь дѣлаетъ не менѣе известнаго числа оборотовъ; дѣйствуя же въ качествѣ электродвигателя, она будетъ всегда работать.

На основаніи сказаннаго, электродвигатели можно строить съ малыми желѣзными массами. Для практическихъ цѣлей интересно опредѣлить отношеніе энергіи, превращенной въ механическую помощью электродвигателя, къ энергіи, затрачиваемой на вращеніе якоря генератора.

$$P_{\text{пол.}} = P_{\text{пар. машины}} (\eta'' \cdot \eta') (\eta_1' \cdot \eta_1'')$$

гдѣ η'' и η' относятся къ генератору;

— η_1'' и η_1' относятся къ электродвигателю.

Для динамо-машинъ и электродвигателей средней силы, на вредныя сопротивленія тратится около 4%. Электродвигатель возвращаетъ энергіи около 96%.

$$\eta = (0,96)^4 = 0,85.$$

Если генераторъ взятъ средней силы, а электродвигатель малой, то

$$\eta = (0,96)^3 \times 0,85 = 0,75.$$

Если генераторъ работаетъ не на полную нагрузку, то полезное дѣйствіе будетъ меньше, именно около 80%, и тогда:

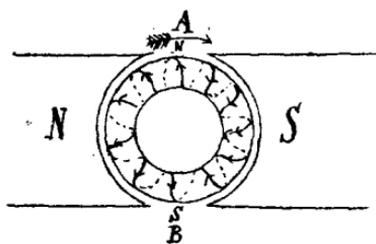
$$\eta = (0,85)^2 \times 0,96 = 0,70.$$

На желѣзныхъ дорогахъ, гдѣ электродвигатели работаютъ большую часть при неустойчивомъ режимѣ, коэффициентъ полезнаго дѣйствія еще ниже, именно около 50%—60%.

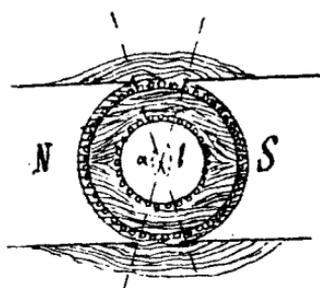
Электродвигатели бываютъ самыхъ разнообразныхъ видовъ по формамъ ихъ электромагнитовъ. Наиболѣе типичные показаны на черт. отъ 59 до 71.

- № 60 — Удобны тѣмъ, что допускаютъ общую отливку, а неудобны тѣмъ, что якорь поднятъ слишкомъ высоко; мало устойчивы.
- №№ 62, 63 и 64 — Удобны вслѣдствіе большой устойчивости якоря, а неудобны тѣмъ, что требуютъ очень тщательной изоляціи.
- № 64 — Круговымъ образованіемъ достигается кратчайшій путь для магнитнаго потока; сопротивление можетъ быть сдѣлано очень малымъ.
- № 65 — Даетъ симметричное магнитное поле, легко допускающее разрѣзаніе пути магнитнаго потока.
- № 68 — Можетъ быть совершенно закрытъ и не даетъ никакихъ внѣшнихъ дѣйствій.
- № 71 — Подобенъ № 68.
- № 69 — Компактенъ и очень удобенъ для приваженія въ дѣйствіе маленькихъ комнатныхъ вентиляторовъ.

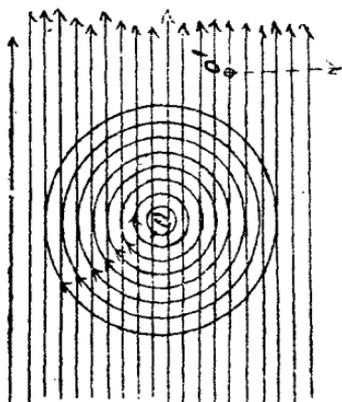
Изоляція въ динамо-машинахъ и въ особенности въ электродвигателяхъ имѣетъ весьма важное значеніе, такъ какъ эти послѣдніе бываютъ иногда совершенно закрыты и не допускаютъ частаго и удобнаго внѣшняго осмотра. Очень полезно, вслѣдствіе этого, возможно чаще измѣрять изоляцію. Въ динамо-машинахъ и электродвигателяхъ послѣдней конструкции сопротивление изоляціи превосходитъ 500.000 омъ тотчасъ послѣ ихъ изготовленія; съ теченіемъ времени сопротивление изоляціи уменьшается, но не падаетъ ниже 100.000 омъ при хорошемъ уходѣ за машиной.



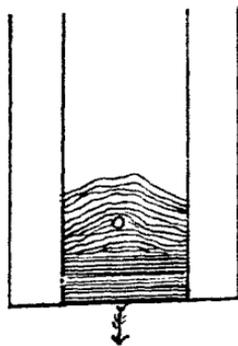
Черт. 1.



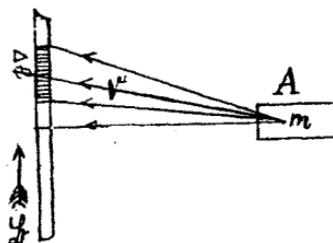
Черт. 2.



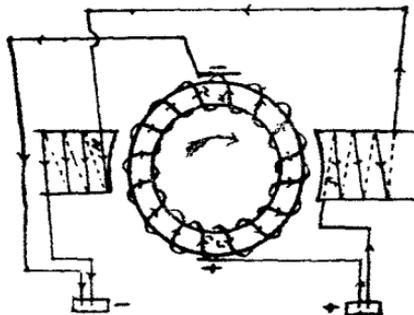
Черт. 3.



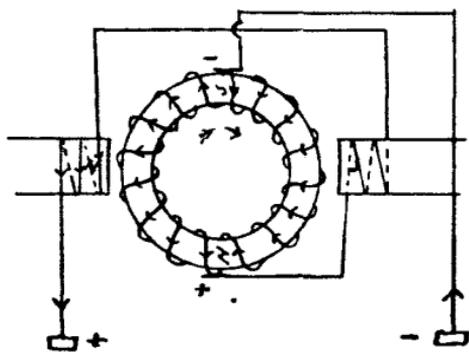
Черт. 4.



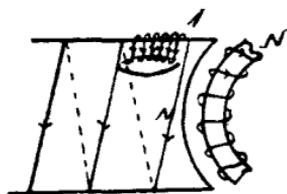
Черт. 5.



Черт. 6.



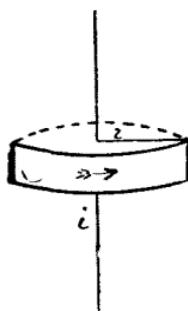
Черт. 7.



Черт. 10.



Черт. 8.



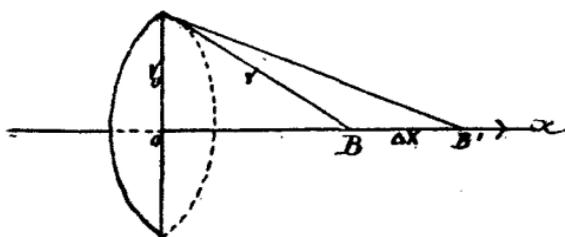
Черт. 11.



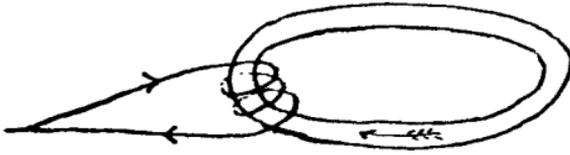
Черт. 9.



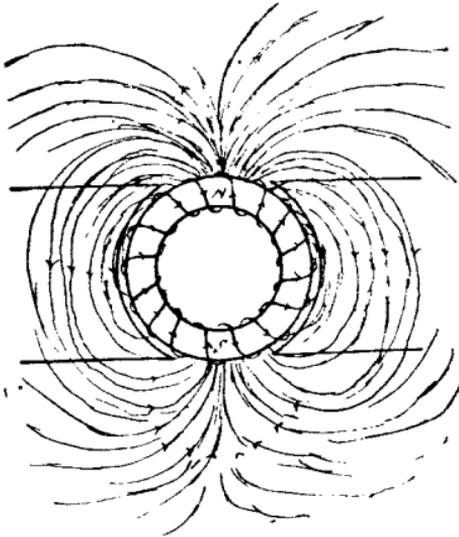
Черт. 12.



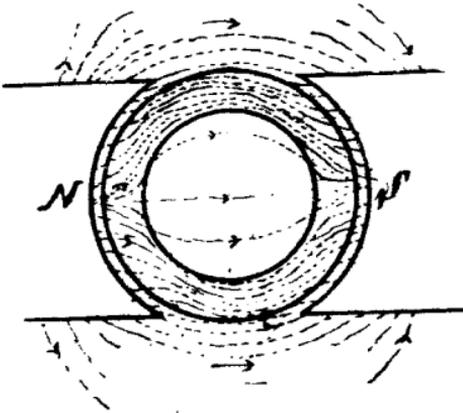
Черт. 13.



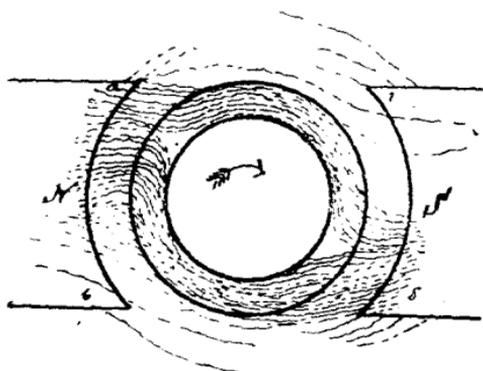
Черт. 14.



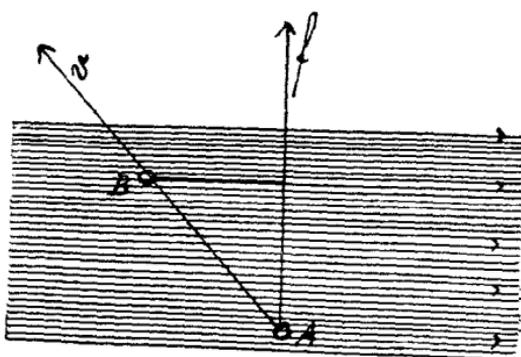
Черт. 15.



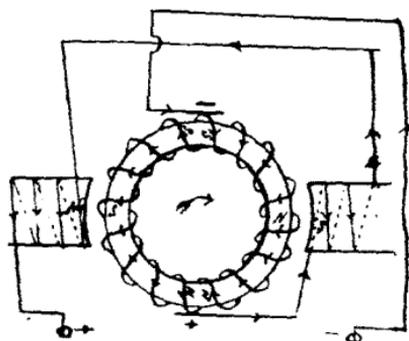
Черт. 16.



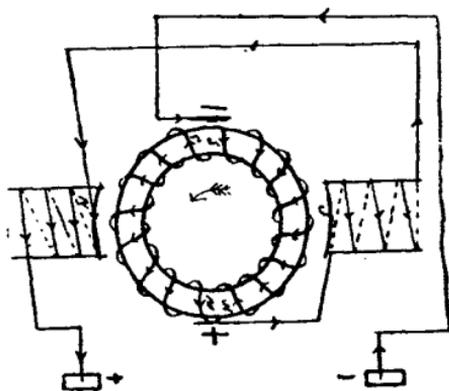
Черт. 17.



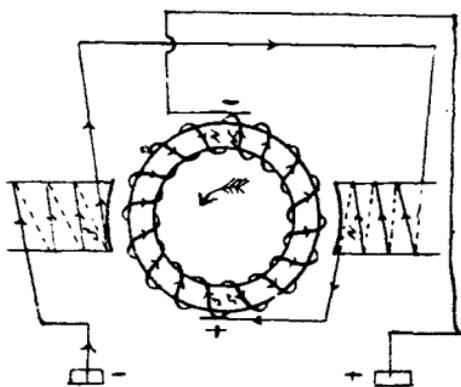
Черт. 18.



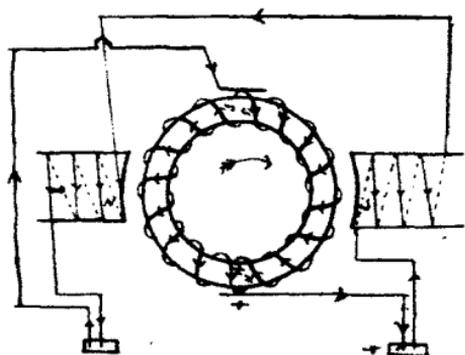
Черт. 19.



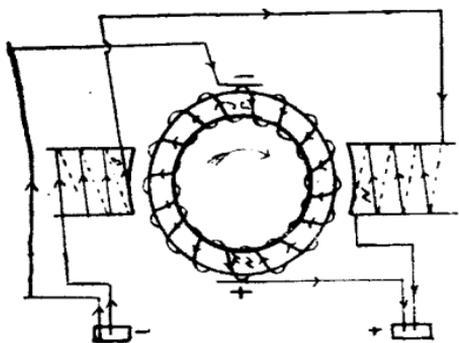
Черт. 20.



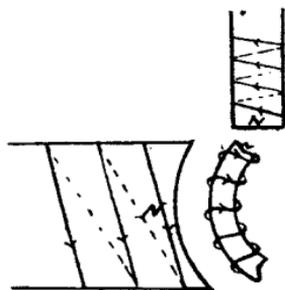
Черт. 21.



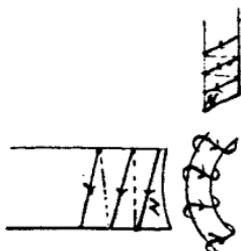
Черт. 23.



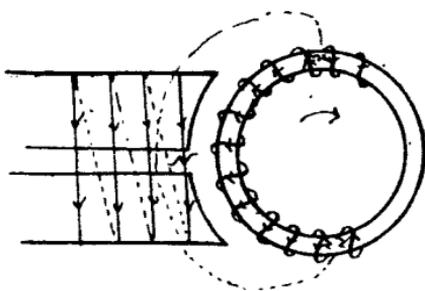
Черт. 24.



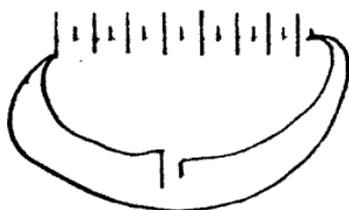
Черт. 25.



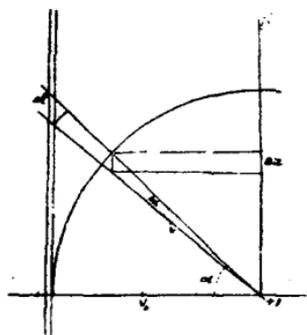
Черт. 26.



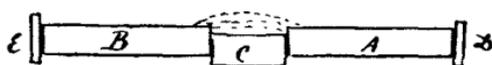
Черт. 27.



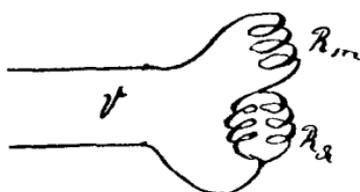
Черт. 28.



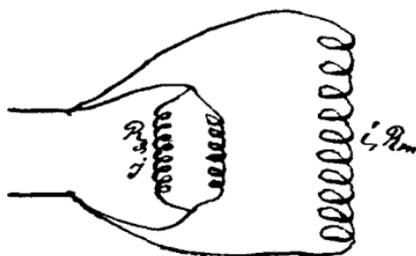
Черт. 10 (*).



Черт. 29.



Черт. 30



Черт. 31.



Черт. 32.



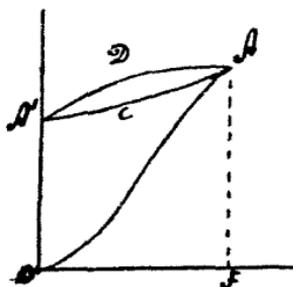
Черт. 33.



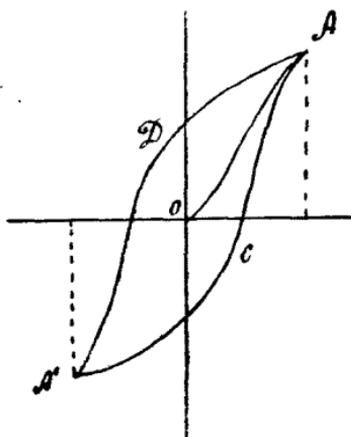
Черт. 34.



Черт. 35.

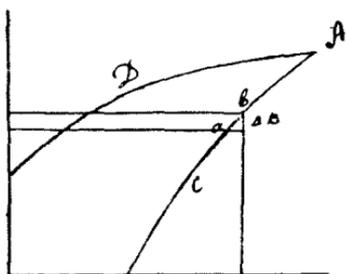


Черт. 36.

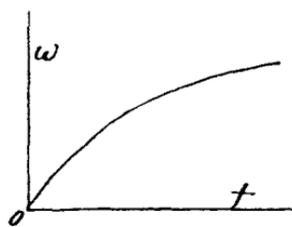


Черт. 37.

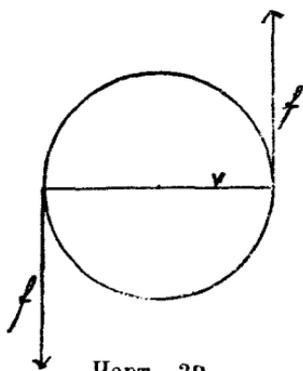
(*) Чертежъ, помѣщенный подъ этимъ нумеромъ раньше, долженъ быть помѣченъ № 25.



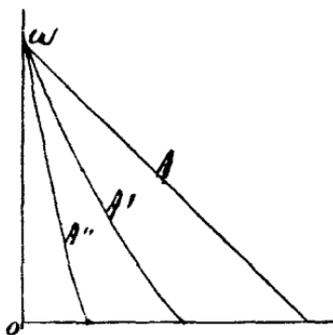
Черт. 38.



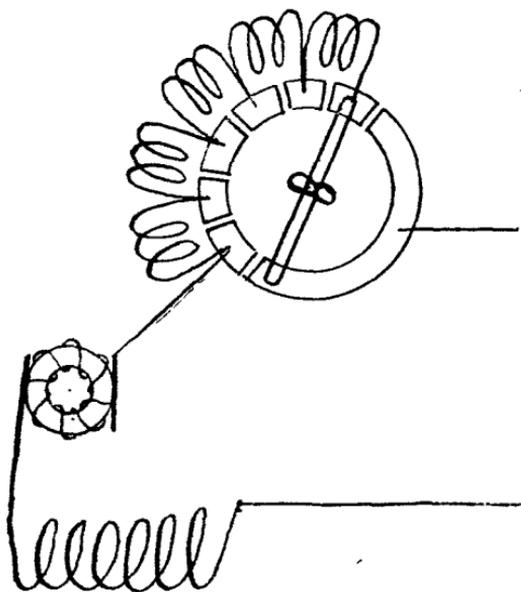
Черт. 40.



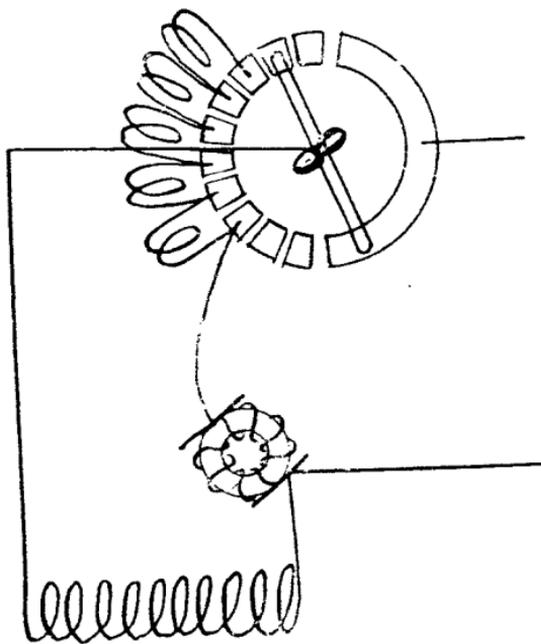
Черт. 39.



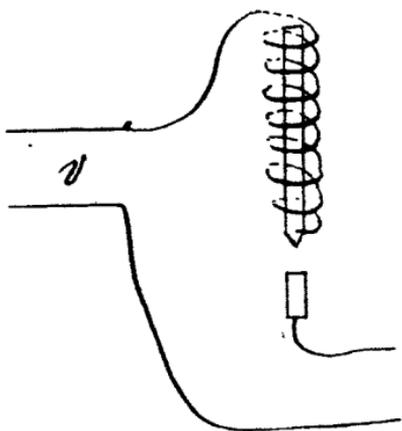
Черт. 41.



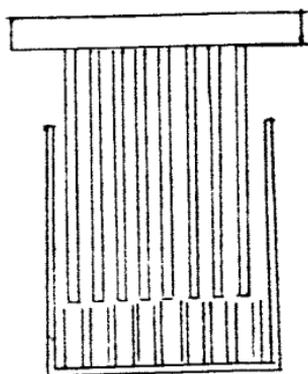
Черт 42.



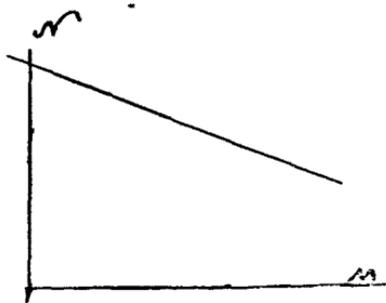
Черт. 43.



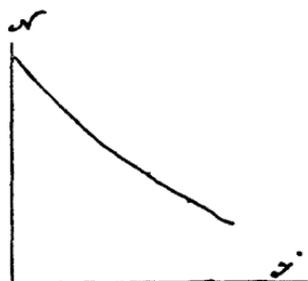
Черт. 44.



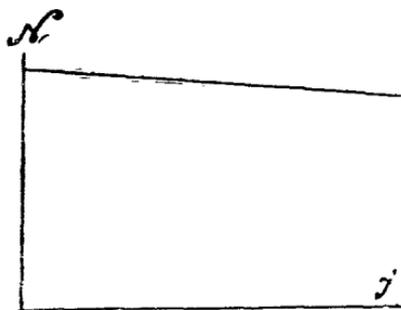
Черт. 45.



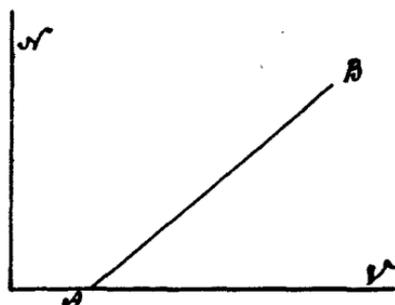
Черт. 46.



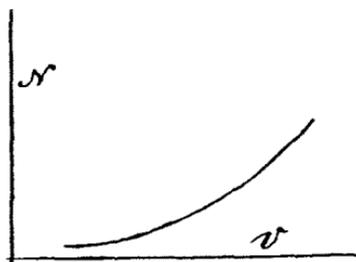
Черт. 47.



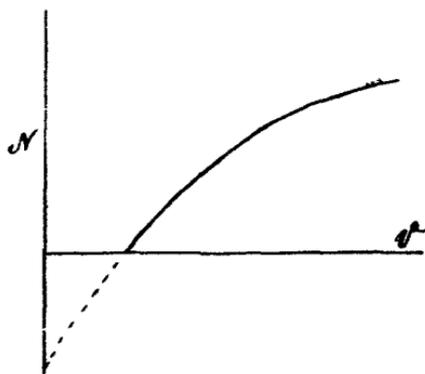
Черт. 48.



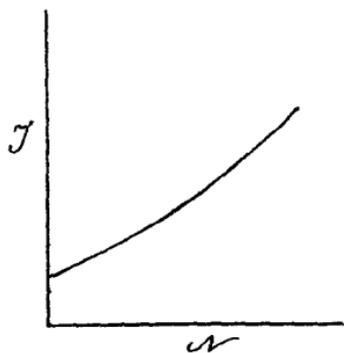
Черт. 49.



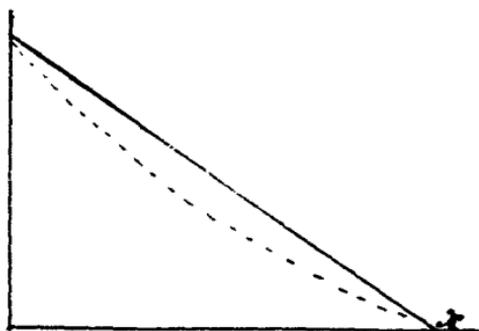
Черт. 50.



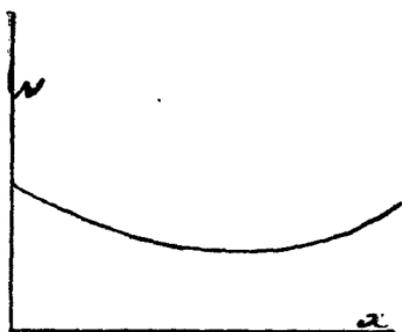
Черт. 51



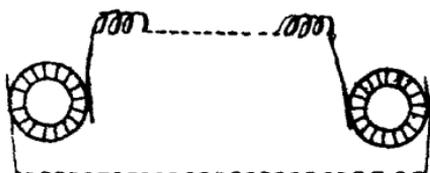
Черт. 52.



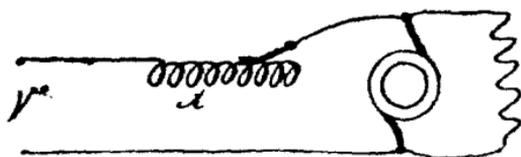
Черт. 53.



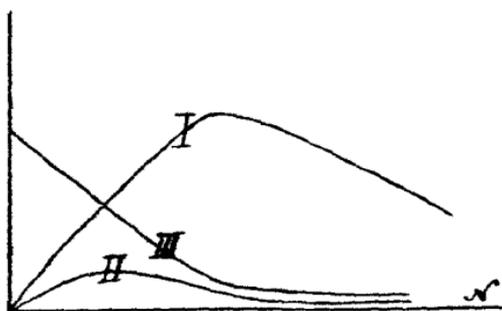
Черт. 54.



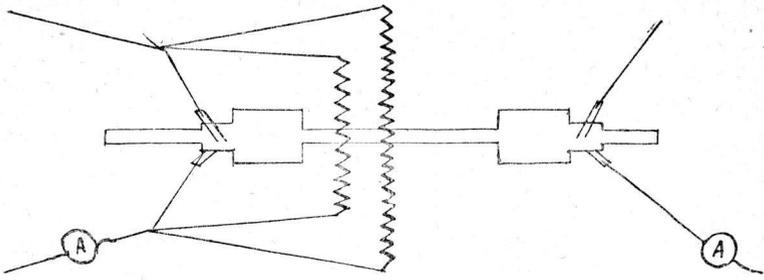
Черт. 56.



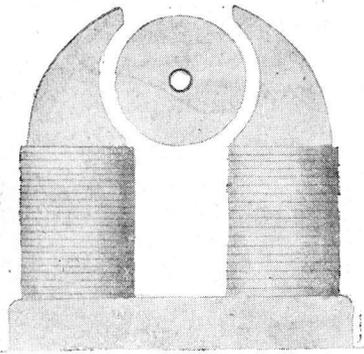
Черт. 55.



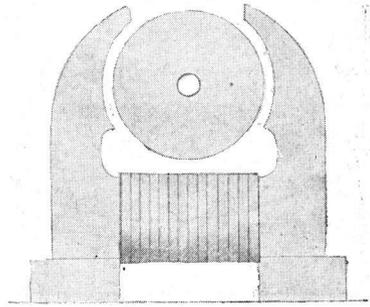
Черт. 57.



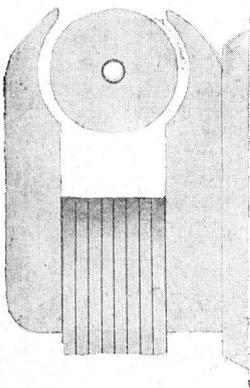
Черт. 58.



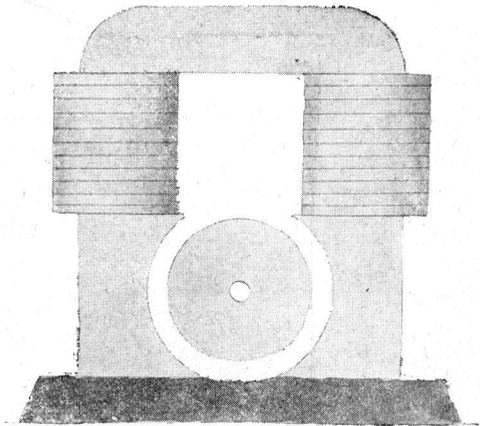
Черт. 59.



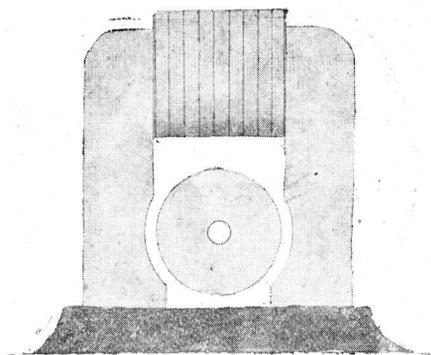
Черт. 60.



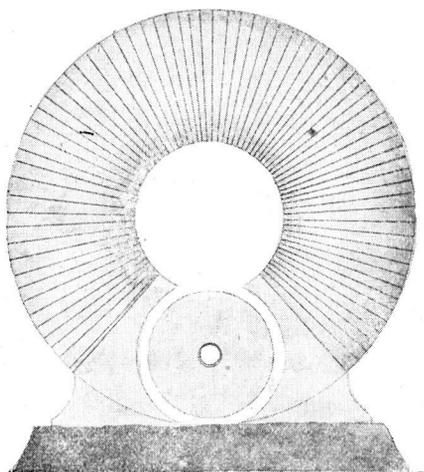
Черт. 61.



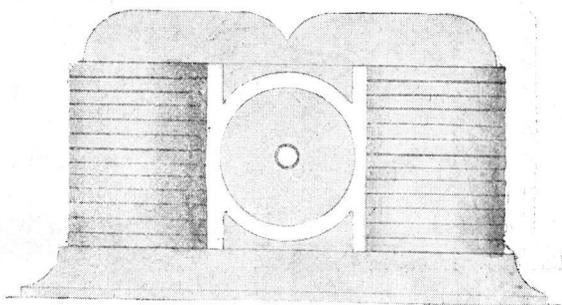
Черт. 62.



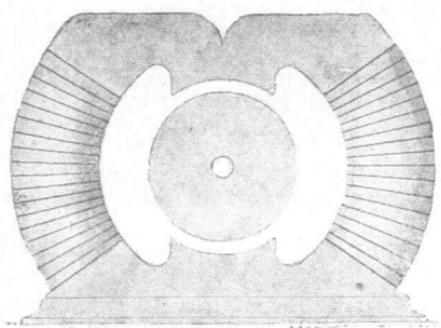
Черт. 63.



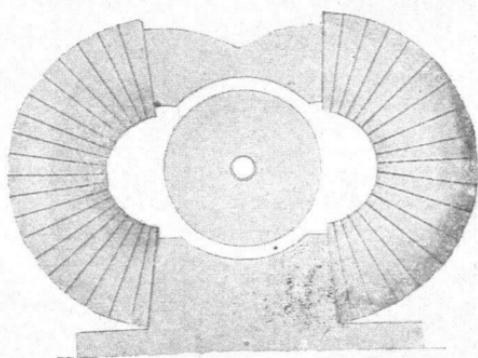
Черт. 64.



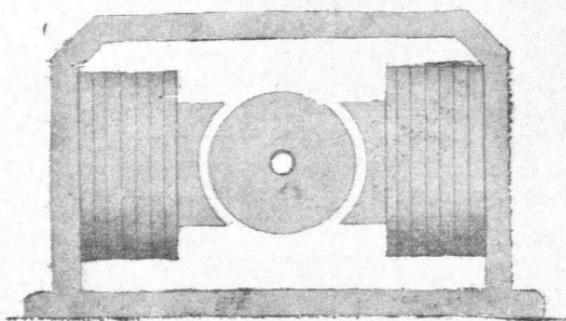
Черт. 65.



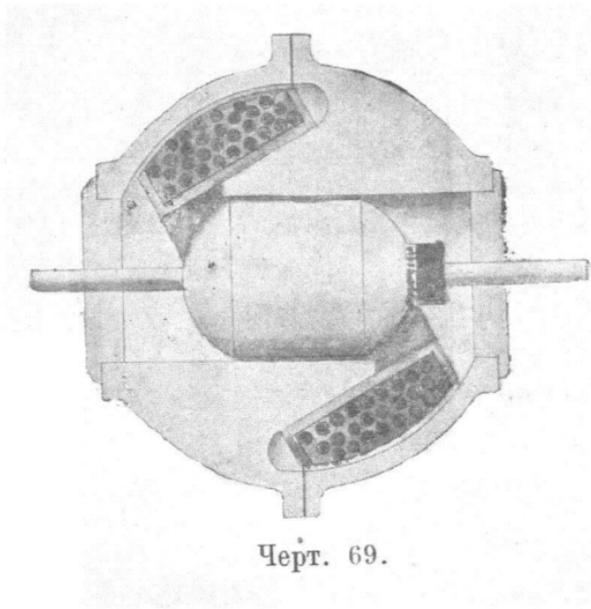
Черт. 66.



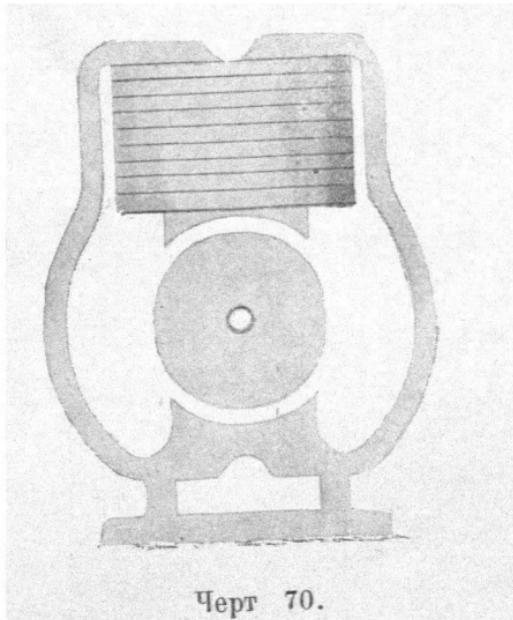
Черт. 67.



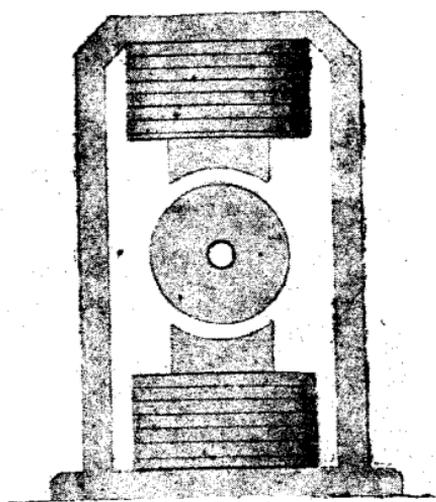
Черт 68



Черт. 69.



Черт 70.



Черт. 71.