

Д-ръ Густавъ Бенишце

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА,

ихъ дѣйствіе, испытаніе и расчетъ.

Переводъ съ нѣмецкаго издавія, пересмотрѣннаго
и исправленнаго авторомъ,

студентовъ СПБ. Политехнич. Института

Голикца и Сухарева,

подъ редакціей преподавателя СПБ. Политехнич. Института
и инж.-злек. Г. А. МЮСТА.

Съ 113 флаграми въ текстѣ.

С.-ПЕТЕРВУРГЪ.

Типографія „Нечатаній Трудъ“, Прасенский пер., 4, уголъ Мойки.
1912.

Предисловіе автора.

Настоящая книга содержит теорию индукционныхъ двигателей трехфазного тока, безъ углубленія въ ей детали. Всѣдствіе этого удалось отнести больше мѣста разсмотрѣнію условій работы и испытанію машинъ, въ то время какъ вопросы второстепенные, какъ напр. выводъ коэффиціентовъ обмотки, опущены совершенно. Сдѣлано это потому, что на тысячу инженеровъ, имѣющихъ дѣло съ двигателями трехфазного тока, едва встрѣчается одинъ, для которого этотъ выводъ представлялъ бы интересъ. Поэтому коэффиціенты эти просто лаются готовыми (стр. 112). Для лицъ, интересующихся ихъ выводомъ, можно указать на книгу В. де ла Тонг'а: „Motoren asynchrones“ (Paris 1902) или Ненѣаси'я: „Der Drehstrommotor“ (Berlin 1903), хотя съ введеніемъ многихъ коэффиціентовъ, встречающихся въ послѣдней книгѣ, я не согласенъ. Расчетъ двигателя затронуть настолько, насколько онъ становится необходимымъ для определенія нѣкоторыхъ величинъ, которая невозможно получить непосредственно изъ опыта, и поскольку это необходимо для расчета двигателя нового типа. Ради полноты въ послѣдней главѣ приведеть также ходъ вполнѣ независимаго расчета двигателя, хотя вообще едва ли кому-либо придется производить расчетъ, совершенно не пользуясь данными другихъ готовыхъ двигателей. Во всякомъ случаѣ такой расчетъ могъ бы быть произведенъ лишь тѣмъ, кто имѣть обширный опытъ какъ по испытанію, такъ и по расчету двигателей. При помощи книжной или устной передачи этого достигнуть нельзя. Для русскаго перевода, послѣдовавшаго съ моего согласія, я произвелъ нѣкоторыя сокращенія и дополненія, которые войдутъ также въ слѣдующее немецкое изданіе моей книги.

Берлинъ, Августъ 1911 года.

Предисловие къ русскому изданію.

Въ русской литературѣ по вопросу объ асинхронныхъ двигателяхъ трехфазнаго тока не имѣется ни одной печатной книги, между тѣмъ двигатели этого рода получили столь широкое распространеніе, что изучать дѣйствіе ихъ приходится весьма обширному кругу техниковъ.

Изъ всѣхъ книгъ на иностраннѣхъ языкахъ втому условно наиболѣе удовлетворяетъ, по нашему мнѣнію, книга Г. Бенишке, написанная на нѣмецкомъ языкѣ.

Однако изъ лицъ, интересующихся асинхронными двигателями, нѣмецкимъ языкомъ владѣть относительно небольшое количество, а потому переводъ етой книги на русскій языкъ представляется весьма желательнымъ.

Авторъ былъ настолько любезенъ, что предоставилъ переводчикамъ свой трудъ въ переработанномъ, для предполагаемаго второго нѣмецкаго изданія, видѣ.

Г. Листъ.

Декабрь, 1911.

Содержание.

	стр.
Введение	1
1. Основные законы	1
Принципъ дѣйствія асинхронныхъ двигателей.	2
2. Понятіе о вращающемся магнитномъ полѣ	2
3. Трехфазное вращающееся поле	5
4. Многополюсные двигатели, число оборотовъ	8
5. Принципъ дѣйствія асинхронного двигателя	9
6. Число периодовъ тока въ роторѣ и скольженіе	11
7. Вращающій моментъ и скольженіе	12
8. Максимальный вращающій моментъ двигателя	15
9. Начальный вращающій моментъ	20
10. Неравномѣрность вращающего момента	25
11. Вращающій моментъ, вызываемый токами Фуко и гистерезисомъ	27
12. Мощность и коэффициентъ полевнаго дѣйствія	27
13. Роторъ съ коротковамкнутой обмоткой	32
14. Важнѣйшіе роды обмотокъ статоровъ и роторовъ съ колышками	35
Круговые диаграммы	51
15. Асинхронный двигатель какъ трансформаторъ	51
16. Диаграмма трансформатора при безъиндукціонной нагрузкѣ	52
17. Круговая диаграмма Гейланда	58
18. Наибольший коэффициентъ мощности	62
19. Вращающій моментъ и мощность	63
20. Скольжение	69
21. Наибольший вращающій моментъ и наибольшая мощность	69
22. Примѣръ примѣненія круговой диаграммы	71
Фактъ въ ходѣ двигателей и регулированіе числа оборотовъ	73
23. Пусковые расходы	73
24. Регулированіе числа оборотовъ	81
Асинхронная машина въ обычныхъ условияхъ работы	82
25. Асинхронная машина въ качествѣ генератора	82
26. Асинхронная машина въ качествѣ тормоза	88
27. Каскадное включение асинхронныхъ двигателей	90

	стр.
Исследование асинхронныхъ двигателей	94
28. Измѣрение электрической мощности и коэффиціента мощности.	94
29. Определение механической мощности и коэффиціента полезного дѣйствія	98
30. Потери холостого хода	99
31. Определение потерь въ мѣдь	104
32. Измѣрение скольженія	105
33. Измѣрение магнитнаго разсѣянія	109
 Расчетъ всиxхърнныхъ двигателей	110
34. Расчетъ магнитной индукціи	110
35. Магнитодвижущая сила асинхроннаго двигателя	115
36. Коэффиціентъ разсѣянія	118
37. Вычисление магнитныхъ сопротивлений	120
38. Наибольшій коэффиціентъ мощности; намагничивающій токъ	124
39. Влияніе междузубьянаго пространства, зазора между зубцами и числа полюсовъ на свойства двигателя	126
40. Потери въ мѣдь и потери холостого хода; построение круговой диаграммы по вычисленнымъ даннымъ двигателя	127
41. Потери въ обмоткѣ короткозамкнутаго ротора	131
42. Приближенное вычисление коэффиціентовъ мощности и полезнаго дѣйствія	134
43. Определение размѣровъ проектируемаго двигателя	134

Д-ръ Густавъ Бенишке.

**АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ
ТРЕХФАЗНОГО ТОКА.**

Введение.

1. Основные законы.

При изложении этой книги мы будем предполагать везде, где это не оговорено особо, синусоидальную форму кривой тока, эл.-дв. с. и магнитных полей; такъ напр. токъ

$$i = I \sin \omega t,$$

гдѣ $\omega = 2\pi c$, причемъ c есть число периодовъ тока.

Мгновенные значения будемъ обозначать малыми буквами (i, e, z), амплитуды — заглавными буквами I, E, Φ, L , а действующія значения курсивными латинскими буквами (\bar{I}, \bar{E} и т. д.).

При изложении предполагаются известными слѣдующіе основные законы: соотношеніе между амплитудой и действующимъ значеніемъ; напр.,

$$\bar{I} = \frac{I}{\delta},$$

—гдѣ δ некоторый коэффиціентъ, который для синусоиды равенъ

$$\delta = \sqrt{2} = 1,414.$$

Въ случаѣ переменнаго тока законъ Ома справедливъ для мгновенныхъ значеній, т.-е.

$$i = \frac{e}{r}.$$

Действующія же значения связаны соотношеніемъ

$$\bar{I} = \frac{\bar{e}}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{\bar{e}}{\sqrt{r^2 + (2\pi c L)^2}},$$

гдѣ L коэффиціентъ самоиндукціи. Знаменатель этой дробиноситъ название полнаго сопротивленія, членъ же $\omega L = 2\pi c L$ безваттнаго (индуктивнаго) сопротивленія.

Магнитный потокъ Φ , охватываемый катушкой въ n витковъ, индуцируетъ въ ней электродвижущую силу, дѣйствующее значение которой

$$S = \frac{2\pi}{\delta} c w \Phi \cdot 10^{-8} = 4,44 c w \Phi \cdot 10^{-8} \text{ вольтъ.}$$

Число магнитныхъ линій на единицу площади называется плотностью потока, или магнитной индукціей.

Потокъ Φ , охватываемый катушкой въ n витковъ, можетъ быть выраженъ черезъ токъ протекающей по катушкѣ и создающей этотъ потокъ; именно

$$\Phi = \frac{0,4\pi Iw}{R},$$

гдѣ I выражено въ амперахъ, а R представляетъ сопротивление магнитному потоку. Оно равно

$$R = \frac{l}{\mu s},$$

гдѣ l — длина пути магнитного потока, s — съченіе магнитной пѣчи, μ — магнитная проницаемость среды. Числитель дроби — $0,4\pi Iw$ называются, по аналогіи съ закономъ Ома, магнитодвижущей силой.

Если путь магнитныхъ линій состоять изъ отдѣльныхъ послѣдовательныхъ участковъ различного поперечного съченія или различной магнитной проницаемости, то общее магнитное сопротивленіе будетъ:

$$R = \frac{l_1}{\mu_1 s_1} + \frac{l_2}{\mu_2 s_2} + \frac{l_3}{\mu_3 s_3} + \dots$$

Если же путь магнитныхъ линій состоять изъ несколькиихъ параллельныхъ вѣтвей съ различными магнитными сопротивленіемъ, то магнитная проводимость $\frac{1}{R}$ всѣхъ путей выразится такъ же, какъ при развѣтвленіи токовъ,透过

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_3} + \dots$$

Откуда для двухъ параллельныхъ вѣтвей

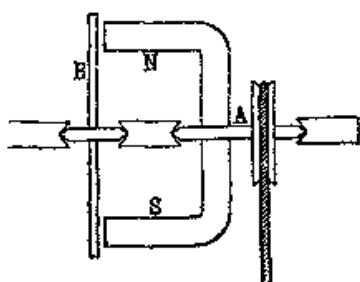
$$R = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}$$

Принципъ дѣйствія асинхронныхъ двигателей.

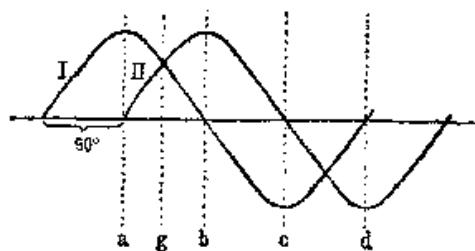
2. Понятие о вращающемся магнитномъ полѣ.

Если вращать постоянный магнитъ *NS* вокругъ оси *A*, то мѣдный дискъ *B*, расположенный противъ концовъ магнита на той же оси, придется во вращательное движение въ томъ же направлениі.

Исходящія изъ полюсныхъ концовъ *NS* магнитныя линіи пронизываютъ дискъ, вслѣдствіе чего при вращеніи магнита въ дискъ индуцируются токи, направленіе которыхъ, по закону Ленца, таково, что они противодѣйствуютъ вращенію магнита. Если же, прикладывая винѣшнюю силу, вращать магниты, то и дискъ долженъ следовать за магнитомъ. Такимъ образомъ получается механизмъ, где вращеніе одной части передается другой безъ всякой между ними механической связи. Передача движенія и работы происходитъ исключительно при помощи силовыхъ линій, исходящихъ изъ вращающагося магнита и пронизывающихъ дискъ.



Фиг. 1.



Фиг. 2.

Если осуществить вращеніе магнитнаго поля не вращеніемъ магнитовъ, а какимъ-нибудь другимъ способомъ, безъ посредства механической силы, то получится двигатель.

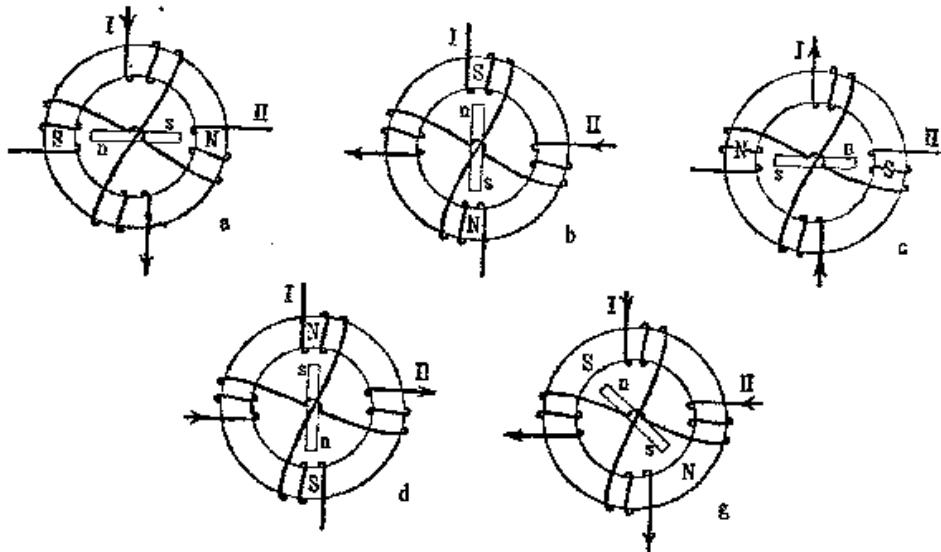
Способъ соображенія вращающагося магнитнаго поля безъ вращенія магнита впервые былъ данъ Феррарисомъ. Простейшій способъ таковъ: два переменныхъ тока свинутыхъ по фазѣ другъ относительно друга на $\frac{1}{4}$ периода, т.-е. на 90° (фиг. 2), пропускаются по катушкамъ, помѣщеннымъ на желѣзномъ кольцѣ, какъ это представлено схематически на фиг. 3.

Въ моментъ *a* токъ *I* имѣть свое наибольшее значеніе, въ то время какъ токъ *II* равенъ нулю. Токъ *I* намагничиваетъ кольцо и образуетъ сѣверный и южный полюсы, какъ

показано на фиг. 3а. Если помѣстить въ центръ кольца по-сторонний магнитъ изъ то онъ приметъ указанное на фиг. положеніе.

Черезъ $\frac{1}{4}$ періода въ моментъ b токъ II имѣть максимальное значеніе, а токъ I равенъ нулю.

Направленіе магнитнаго поля для этого момента показано на фиг. 3б. По сравненію съ фиг. 3а оно, а за нимъ и магнитъ ns , повернулись на $\frac{1}{4}$ окружности. Въ моментъ с токъ II — нуль, токъ же I достигаетъ отрицательнаго максимальнаго значенія. Магнитное поле имѣть направление обратное направленію въ моментъ a . Въ моментъ d состояніе обратное сравнительно съ b , и т. д. Такимъ образомъ за одинъ періодъ тока магнитное поле, а съ нимъ и постоянный магнитъ, совершаеть поворотъ на полные 360° . Переходъ между представленными



Фиг. 3.

на фиг. 3 моментами совершаеться постепенно и непрерывно; напр. въ моментъ g (фиг. 3) по обѣмъ обмоткамъ проходять одинаковы токи, и въ кольцѣ образуется нѣкоторое результирующее поле (фиг. 3 g). Подобнымъ образомъ въ любой моментъ магнитное поле является реаультирующимъ изъ полей, создаваемыхъ отдельными токами.

Ясно, что постоянный магнитъ изъ внутри кольца долженъ елѣдовать за вращеніемъ поля, такъ какъ полюса его стремятся установиться въ направленіи силовыхъ линій.

Однако не только постоянный магнитъ, но и барабанъ изъ хорошо проводящаго токъ металла, а также желѣзный барабанъ, на которомъ наложена замкнутая на короткое обмотка изъ проводящаго металла, будутъ вращаться по тѣмъ же причинамъ, по которымъ получалось вращеніе диска на модели

фиг. 1. Въ этомъ случаѣ получается такъ называемый асинхронный двигатель. Какъ послѣдній долженъ быть устроенъ въ цѣляхъ наилучшей работы мы увидимъ впослѣдствіи.

Сначала мы разсмотримъ полученіе, имѣющаго на практикѣ наибольшее значеніе, трехфазного вращающагося поля.

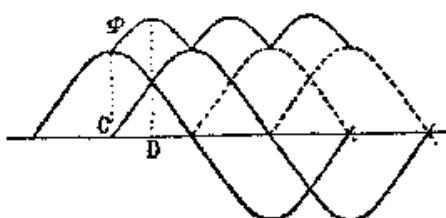
Ta часть двигателя, къ которой подводится переменный токъ создающій поле называется статоромъ, ибо обычно она является неподвижной, часть же, вращаемая магнитнымъ полемъ, будь то магнитъ или барабанъ съ обмоткой, называется роторомъ.

3. Трехфазное вращающееся поле.

Если предположимъ, что переменные токи, создающіе вращающееся поле, измѣняются по закону синусовъ, и, если отдельные полюса, создаваемыя токами, однородны и полностью накладываются другъ на друга въ пространствѣ занимаемомъ роторомъ, то для полученія характера результирующаго поля слѣдуетъ сложить ординаты сдвинутыхъ другъ относительно друга на 90° синусоидъ (фиг. 4).

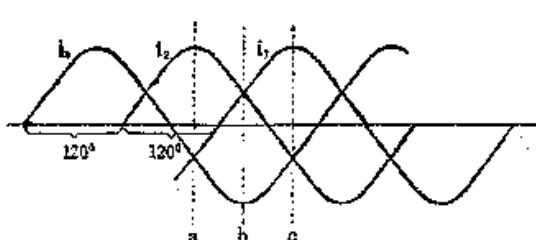
Магнитныя поля, соответствующія отрицательнымъ значениямъ кривыхъ тока, должны быть отложены въ положительную сторону (пунктирный линіи), такъ какъ мы разсматриваемъ лишь строеніе вращающагося поля независимо отъ направленія вращенія. Такимъ образомъ получается кривая Φ , которая указываетъ, что результирующее поле не постоянно, а пульсируетъ между значеніями С и D. Эти пульсации повышаютъ потери на токи Фуко и на гистерезисъ, а также вызываютъ неравномѣрность вращающаго момента, вслѣдствіе чего ихъ стараются устранить. Въ двигателяхъ же отдельные полюса неоднородны и накладываются другъ на друга не полностью (фиг. 3 и 6). Впослѣдствіи (глава 35) мы увидимъ, что при некоторомъ идеальномъ распределеніи отдельныхъ полей получается такое вращающееся поле, которое имѣеть въ различные моменты одинаковую интенсивность и вращается съ равномѣрной скоростью. Въ техникѣ примѣняются преимущественно трехфазные асинхронные двигатели, а потому мы и займемся, главнымъ образомъ, трехфазными вращающимися полями. Аналогичную обмотку фиг. 3, но для трехфазного тока, представляетъ—фиг. 6.

Трехфазный токъ имѣеть то преимущество, что несмотря на существование шести концовъ обмотки, требуетъ только три подводящихъ токъ проводниковъ. Это понятно изъ

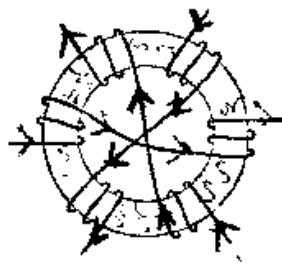


Фиг. 4.

Фиг. 5, гдѣ, напр., въ моментъ a $i_2 = -(i_1 + i_3)$, въ моментъ $b - i_1 = (i_2 + i_3)$ и въ моментъ c $i_3 = (i_1 + i_2)$; такъ и въ каждый другой моментъ.

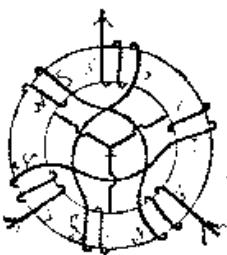
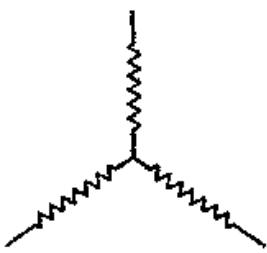


Фиг. 5.

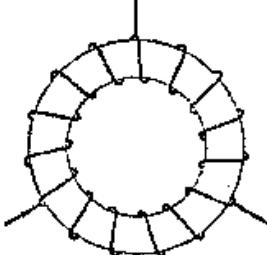
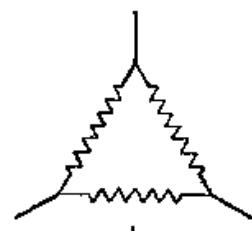


Фиг. 6.

Другими словами въ каждый моментъ одинъ токъ является обратнымъ для двухъ другихъ. Для этого необходимо, чтобы обмотки были соединены между собою определеннымъ образомъ, именно такъ, чтобы каждый изъ 3-хъ проводовъ быть соединенъ симметрично съ двумя другими. Соединеніе производится по схемѣ фиг. 7 или 8.



Фиг. 7.



Фиг. 8.

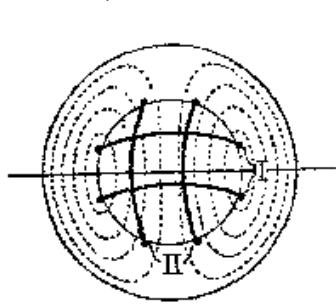
Первое называется — соединеніемъ звѣздой, второе — треугольникомъ.

При кольцевой обмоткѣ, какъ это представлено на фиг. 3, 6, 7, 8 потокъ статора замыкается главнымъ образомъ черезъ роторъ, благодаря тому, что воздушный зазоръ между ними дѣлается возможно малымъ и самая обмотка укладывается въ каналахъ.

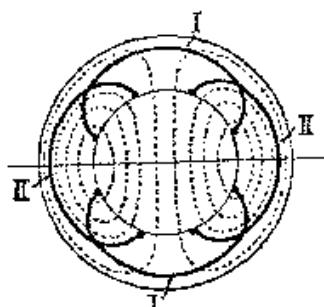
Если вынуть ротор из статора, то магнитные линии будут главным образом проходить в кольцо и взаимно уничтожаться.

Въ подобной обмоткѣ и при вставленномъ роторѣ значительная часть спиральныхъ линий замыкается помимо ротора черезъ воздухъ или кожухъ статора. Это магнитное разсѣяніе значительно меньше при барабанныхъ обмоткахъ.

На фиг. 9 (а и б) изображено распределеніе магнитного поля для барабанной обмотки двухфазного тока. Магнитные линии, создаваемыя обѣими катушками обмотки I должны избрать путь, указанный пунктирными линиями, даже и въ томъ случаѣ, если роторъ вынутъ, ибо обмотка охватываетъ не желѣзное кольцо, какъ на фиг. 3, а охватываетъ про-



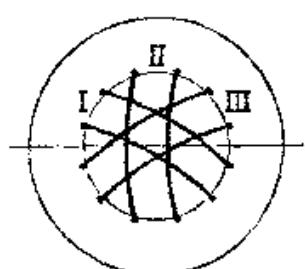
Фиг. 9а.



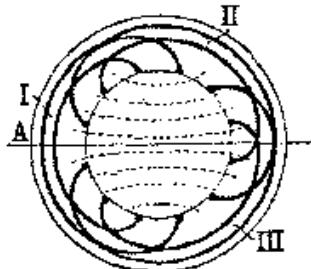
Фиг. 9б.

странство, занимаемое роторомъ. Такой же путь избираютъ и магнитные линии создаваемыя обмоткой II, но перпендикулярно къ первымъ. Катушки обмотокъ заходятъ одна за другую, для того чтобы достичь наложения полей, такъ какъ только въ такомъ случаѣ возможно образование вращающагося поля.

Выполнить обмотку по схемѣ 9а, однако, невозможно, такъ какъ въ такомъ случаѣ невозможно было бы вставить ротора.



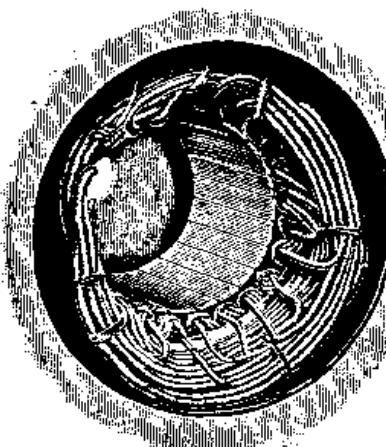
Фиг. 10а.



Фиг. 10б.

Поэтому внешніе соединительные проводники должны быть отогнуты въ сторону и размѣшены по торцевой поверхности статора, какъ показано на фиг. 9б.

Значительная магнитная утечка на виѣшней поверхности статора имѣеть мѣсто только тогда, если сѣченіе желѣза сердечника его слишкомъ мало. Для размѣщенія возможно большаго числа витковъ, каждая катушка состоитъ изъ несколькиихъ частей, укладываемыхъ въ отдѣльные каналы. Фиг. 10 b изображаетъ барабанную обмотку трехфазнаго двигателя, где каждая катушка состоитъ изъ двухъ частей. Фиг. 11 изображаетъ лѣстнично выполненную обмотку, причемъ каждая катушка состоитъ изъ четырехъ частей.

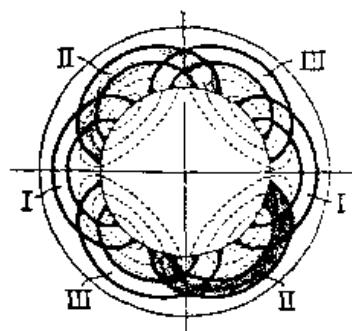


Фиг. 11.

4. Многополюсные двигатели; число оборотовъ.

Всѣ схематически разсмотрѣнныя до сихъ поръ двигатели были двухполюсныя, такъ какъ въ нихъ магнитныя линіи выходили изъ одной половины статора и входили въ другую, какъ будто имѣлись вращающіеся сѣверный и южный полюса. То же будетъ и въ случаѣ барабаннаго ротора: выходящія изъ статора магнитныя линіи входять въ одну половину барабана и выходятъ изъ другой. Напр., на фиг. 9 верхняя половина образуетъ одинъ полюсъ, нижня—другой. Каждая пара полюсовъ состоитъ изъ столькихъ группъ катушекъ, сколько имѣется фазъ; при двухфазномъ токѣ, слѣдовательно,—изъ двухъ (фиг. 9), а при трехфазномъ—изъ трехъ группъ (фиг. 10).

Представимъ себѣ кольцо статора, фиг. 10 b , въ одномъ мѣстѣ разрѣзаннымъ, напр. въ А, и разогнутымъ въ полукругъ и приложимъ къ нему совершенно такой же полукругъ, тогда получимъ четырехполюсный статоръ, фиг. 12, такъ какъ магнитныя линіи входять въ двухъ и выходятъ въ двухъ мѣстахъ. Соответственно этому получается четыре поля, изъ которыхъ каждыя два образуютъ пару полюсовъ. Эти поля вращаются около оси двигателя такъ, что въ теченіе одного периода тока поворачиваются на одну пару полюсовъ, какъ и раньше при двухполюсномъ двигателе; въ данномъ



Фиг. 12.

елучай поворотъ будеть на 180° . Одному полному обороту соотвѣтствуетъ поэтому два периода тока. Такимъ образомъ, число оборотовъ n_1 вращающагося поля въ единицу времени (въ секунду) мы получимъ, если число периодовъ тока статора раздѣлимъ на число паръ полюсовъ p :

$$n_1 = \frac{c_1}{p}$$

или, что то же самое, число перемѣнъ тока $2c_1$ на число полюсовъ $2p$.

Какъ мы увидимъ позже роторъ ненагруженаго двигателя, подобно магниту изъ фиг. 3, вращается вмѣстѣ съ полемъ и лишь въ сколько отстаетъ отъ него благодаря тренію въ подшипникахъ и о воздухъ, поэтому теоретическое число оборотовъ ротора равняется числу оборотовъ поля n_1 . Если напр. подвести къ четырехполюсному двигателю токъ въ 50 периодовъ (или 100 перемѣнъ), то его теоретическое число оборотовъ равно 25 въ секунду или 1500 въ минуту.

5. Принципъ дѣйствія асинхронного двигателя.

Вернемся къ фиг. 3, гдѣ постоянный магнитъ находится во вращающемся полѣ. Какъ уже упомянуто, онъ долженъ вращаться вмѣстѣ съ полемъ, такъ какъ полюса его постоянно устанавливаются въ направленіи силовыхъ линій. Его вращеніе, слѣдовательно, синхронно съ вращеніемъ магнитнаго поля. Такого рода двигатель называется синхроннымъ.

Обратно, если не пускать токъ въ обмотку кольца, а вращать магнитъ механической силой, то по закону Ленца въ обѣихъ обмоткахъ индуцируются токи, противодѣйствующіе движению; относительное измѣненіе этихъ токовъ во времени показано на фиг. 2.

Такой механизмъ, слѣдовательно, является генераторомъ, дающимъ двухфазный переменный токъ. Если обмотка сдѣлана, какъ на фиг. 7 или 8, то получается трехфазный переменный токъ.

Если помѣстить во вращающееся магнитное поле барабанъ изъ желѣзныхъ круглыхъ листовъ, то онъ не будетъ вращаться, такъ какъ въ немъ не будетъ магнитныхъ полюсовъ, которые стремились бы установиться въ направленіи магнитныхъ линій. Для того, чтобы барабанъ могъ притти во вращеніе, необходимо было бы, чтобы этотъ сортъ желѣза обладалъ способностью сохранять значительный остаточный магнетизмъ, дабы въ немъ могли образоваться хоть слабые полюса.

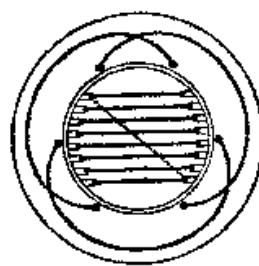
Вращеніе могло бы получиться и въ такомъ случаѣ, если въ массѣ желѣза барабана образовались бы достаточной силы токи Фуко, которые могли бы вызывать вращеніе по той же

причинѣ, какъ на фиг. 1б. Но силы, получаемыя по обѣимъ этимъ причинамъ, практически такъ малы, что не могутъ быть приняты во вниманіе.

Но если наложить на желѣзный барабанъ короткозамкнутую обмотку изъ мѣдной проволоки (фиг. 13), то получается практическіи пригодный вращающій моментъ,

потому что вращающееся магнитное поле рѣжетъ обмотку барабана и индуктируетъ въ ней токи, которые, какъ на фиг. 1, получаютъ такое направленіе, что стремятся задержать вращеніе поля. Такъ какъ они этого сдѣлать не могутъ, то самъ барабанъ долженъ начать вращаться вмѣстѣ съ полемъ. Но его вращеніе не синхронно съ последнимъ, какъ въ раасмотрѣнномъ случаѣ съ постояннымъ магнитомъ. Если бы вращеніе совпадало точно съ вращеніемъ поля, то въ обмоткѣ ротора не индуктировалось бы никакихъ токовъ, такъ какъ тогда не было бы перерѣзыванія силовыхъ линій проводниками обмотки. А, следовательно, въ такомъ случаѣ вращающій моментъ былъ бы равенъ нулю. Однако треніе, существующее при всѣхъ обстоятельствахъ, даже при отсутствіи нагрузки, вызвало бы отставаніе ротора отъ магнитнаго поля. Какъ только начинается отставаніе ротора, такъ обмотка начинаетъ рѣзать силовые линіи, въ ней индуктируются токи и отъ взаимодѣйстія ихъ съ полемъ получается вращающій моментъ. Такой двигатель, следовательно, имѣть стремленіе по возможності догнать вращающееся поле, но никогда этого сдѣлать не можетъ, т.-е. никогда не достигаетъ синхронизма. Поэтому такой двигатель есть а с и н х р о н и й двигатель, роторъ котораго вращается медленнѣе поля. Такъ какъ моментъ является следствиемъ индуктируемаго въ обмоткѣ ротора тока, то онъ можетъ быть названъ также и н д у к ц i o n n i мъ двигателемъ. Отставаніе скорости ротора отъ скорости поля называется скольженіемъ ротора.

Фиг. 13.



Изъ только что сказанного вытекаетъ, что вращающій моментъ и скольженіе находятся въ тѣсной связи между собою. Къ такому же выводу мы пришли бы и изъ основнаго закона о взаимодѣйстії проводника съ токомъ, движущимся въ магнитномъ полѣ параллельно самому себѣ и перпендикулярно къ направленію магнитныхъ линій.

Сила взаимодѣйстія въ каждый моментъ пропорціональна току и магнитному полю. Съ такимъ фактамъ мы и имѣемъ адѣль. Въ короткозамкнутой обмоткѣ возникаютъ токи вслѣдствіе пересѣченія витковъ ея вращающимся полемъ. Взаимодѣйстіе этихъ токовъ съ полемъ выражается въ полученніи силы тяги на окружности ротора, приложенной къ проводникамъ обмотки по всей длине желѣза ротора и направленной по касательной къ ротору.

Сила тяги, умноженная на радиусъ ротора, даетъ врашающій моментъ.

При холостомъ ходѣ двигателя, крѣда вращающій моментъ преодолѣвается только треніе въ подшипникахъ и о воздухѣ, роторъ вращается со скоростью незначительно меньшей, чѣмъ скорость поля; скольженіе ротора въ магнитномъ полѣ такое, какое нужно для полученія въ обмоткѣ ротора тока достаточного для созданія необходимой силы тяги, способной преодолѣть треніе.

При нагрузкѣ двигателя, вращеніе ротора замедляется, т.-е. скольженіе увеличивается. Вѣдьдствіе этого короткозамкнутая обмотка перерѣзываетъ большее число магнитныхъ линій, индуктируемый токъ усиливается, а съ нимъ и сила тяги.

Особенностью асинхронного двигателя является, следовательно, то, что скольженіе его чѣмъ больше, чѣмъ больше онъ нагружается.

6. Число періодовъ тока въ роторѣ и скольженіе.

Если ω_1 угловая скорость вращенія поля, а ω_2 — ротора, то скольженіе опредѣлится такъ:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = 1 - \frac{\omega_1}{\omega_2},$$

т.-е. представляетъ отношеніе разности скоростей $\omega_1 - \omega_2$ (относительной скорости) къ скорости вращенія поля.

При неподвижномъ роторѣ $\omega_2 = 0$ и, следовательно, скольженіе $s = 1$.

Для другого крайняго случая, именно, когда роторъ вращается синхронно съ полемъ, $\omega_1' = \omega_2$, скольженіе $s = 0$.

Угловая скорость ни что иное, какъ число оборотовъ въ секунду умноженное на 2π .

Если n_1 обозначаетъ число оборотовъ вращающагося поля, n_2 — число оборотовъ ротора, то получится:

$$\omega_1 = 2\pi n_1,$$

$$\omega_2 = 2\pi n_2,$$

тогда слѣдуетъ, что

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$n_2 = n_1 (1 - s) \quad \dots \dots \dots \dots \dots \quad (4)$$

Обычно скольженіе умножаютъ на 100, т.-е. выражаютъ въ процентахъ

Важно также соотношеніе между числомъ періодовъ c_1 первичнаго, подводимаго въ статоръ, тока и числомъ періодовъ c_2 вторичнаго, индуктируемаго въ обмоткѣ ротора, тока.

Когда роторъ стоитъ, токъ въ немъ имѣть то же число періодовъ, какъ и первичный, такъ какъ тогда двигатель отличается отъ трансформатора только виѣшней формой.

Въ другомъ крайнемъ случаѣ, когда роторъ вращается синхронно съ полемъ, магнитныя линіи имѣть не перерѣзываются и число періодовъ тока въ немъ равно нулю. Во всѣхъ другихъ случаяхъ c_2 лежить между этими предѣлами. Рассмотримъ двухполюсный двигатель фиг. 3 и 9, где поле во время одного періода первичнаго тока совершаѣтъ полный оборотъ. Въ этомъ случаѣ число періодовъ равно числу оборотовъ поля

$$c_1 = n_1$$

Если роторъ отстанетъ отъ поля въ секунду на одинъ оборотъ, то число періодовъ вторичнаго тока равно единице; если онъ отстанетъ на два оборота, то число періодовъ равно 2 и т. д. Слѣдовательно число періодовъ ротора равно разности чиселъ оборотовъ вращающагося поля и ротора

$$c_2 = n_1 - n_2$$

Изъ двухъ послѣднихъ равенствъ слѣдуетъ

$$\frac{c_2}{c_1} = s \quad \text{или} \quad c_2 = c_1 s, \dots \dots \dots \quad (5)$$

т.-е. число періодовъ тока ротора равно произведению числа періодовъ тока, подводимаго къ статору, на скольженіе. Это справедливо также и для многополюснаго двигателя, такъ какъ

$$c_1 = p n_1 \quad \text{и} \quad c_2 = p (n_1 - n_2),$$

здесь p — число паръ полюсовъ двигателя.

Откуда опять вытекаетъ равенство (5).

7. Вращающій моментъ и скольженіе.

Возвращимся къ механизму, изображеному на фиг. 1, и выведемъ одно важное механическое соотношеніе.

Обозначимъ черезъ M вращающій моментъ, передаваемый магнитнымъ полемъ съ одной вращающейся части на другую. По акону механики мощность, которую вращающееся поле должно передать ротору, выражается такъ

$$W_1 = \omega_1 M \dots \dots \dots \quad (6)$$

гдѣ ω_1 — угловая скорость вращающегося поля. Мощность же действительно передаваемая ротору равна

$$W_2 = \omega_2 M \dots \dots \dots \quad (7)$$

гдѣ ω_2 — угловая скорость вращения ротора.

Если пренебречь всѣми прочими побочными явленіями, то W_2 , т.-е. работа произведенная дискомъ въ единицу времени, отличается отъ W_1 лишь на величину потерь въ самомъ диске.

Въ механическихъ передачахъ эта потеря состоитъ изъ потерь на треніе, при электромагнитной передачѣ же — изъ потерь на тепло Джоуля отъ токовъ индуктируемыхъ въ диске.

Назовемъ эту потерю въ единицу времени черезъ V , тогда

$$V = W_1 - W_2 = (\omega_1 - \omega_2) M \dots \dots \dots \quad (8)$$

Въ этомъ соотношениі, выведенномъ на основаніи чисто механическихъ соображеній, ничто неизмѣнится, будеть ли вращающееся поле создаваться вращающимся постояннымъ магнитомъ или способами описанными въ главѣ I и II; отсюда слѣдуетъ, что всѣ дальнѣйшія уравненія справедливы также для всякаго асинхроннаго двигателя.

Изъ равенствъ (2) и (8) слѣдуетъ

$$V = s \omega_1 M, \dots \dots \dots \quad (9)$$

а изъ равенства (6)

$$V = s W_1 \dots \dots \dots \quad (10)$$

Это соотношеніе указываетъ, что тепловыя потери энергіи въ цѣпи ротора получаются умноженіемъ переданной ротору мощности на скольженіе.

Изъ равенствъ (8) и (10) имѣмъ

$$V = s (V + W_2) \text{ или}$$

$$V = \frac{s}{1-s} W_2 \dots \dots \dots \quad (11)$$

Посредствомъ этого выраженія можно вычислить потери въ цѣпи ротора по отдаваемой роторомъ мощности и скольженію.

Потеря энергіи на тепло Джоуля можетъ быть выражена черезъ ваттное сопротивление ротора r_2 и силу тока въ немъ I_2 :

$$V = r_2 I_2^2 \dots \dots \dots \quad (12)$$

для однофазной обмотки:

и

$$V = m r_2 \mathfrak{J}_2^2 \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

для m -фазной обмотки.

Изъ равенствъ (9) и (13)

$$M = \frac{m r_2 \mathfrak{J}_2^2}{\omega_1 s} \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

Согласно страницѣ 11, $\omega_1 = 2\pi n_1$ и по стр. 9

$$n_1 = \frac{c_1}{p}, \text{ откуда}$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi c_1}{p} \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

Тогда равенство (14) преобразуется въ

$$M = \frac{p}{2\pi c_1 s} m r_2 \mathfrak{J}_2^2 \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

или, вводя снова уравненіе (13),

$$M = \frac{p V}{2\pi c_1 s} \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

Если V — выражено въ омахъ, \mathfrak{J}_2 въ амперахъ и, значитъ, V — въ ваттахъ, то вращающій моментъ M — въ ваттъ-секундахъ (Джоуляхъ).

Для перевода въ лошадиные силы, нужно раздѣлить на 736:

$$M = \frac{1}{736} \cdot \frac{p V}{2\pi c_1 s} \text{ лош. с.} \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

Для перевода въ кг.-метры послѣднее равенство нужно умножить на 75:

$$M = \frac{75}{736} \cdot \frac{p V}{2\pi c_1 s} = 0,0162 \frac{p V}{c_1 s} \text{ кг.-мтр.} \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

Когда роторъ стоитъ, то $s = 1$, слѣдовательно вращающій моментъ при пускѣ въ ходъ

$$M_a = 0,0162 \frac{p V}{c_1} \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

Раздѣливъ это выраженіе на радиусъ $\frac{d}{2}$ (въ метрахъ), получимъ силу тяги при пускѣ въ ходъ

$$F = 0,0162 \cdot \frac{\frac{pV}{d}}{c_1 \cdot \frac{d}{2}} \text{ кг.} \quad (21)$$

8. Максимальный вращающий моментъ двигателя.

Изложенные уже въ § 5 разсужденія показали, что вращающій моментъ зависитъ отъ скольженія. Ихъ равенst. (16) эта зависимость еще не вполнѣ видна, такъ какъ \mathcal{J}_2 само зависитъ отъ скольженія. Поэтому выражимъ сперва \mathcal{J}_2 , въ функции отъ скольженія.

Передача энергіи отъ статора къ ротору совершаются при помощи вращающагося магнитнаго поля, переходящаго изъ статора въ роторъ, т.-е. общимъ потокомъ Φ . Этотъ потокъ индуцируетъ въ обмоткѣ ротора эл. дв. силу E_{2i} , которая, по законамъ переменныхъ токовъ, равна

$$\mathcal{E}_{2i} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} c_2 w_2 \Phi \text{} \quad (22),$$

если принять поле синусоидальнымъ. Здѣсь c_2 —число периодовъ тока въ роторѣ, w_2 —частота витковъ обмотки его на фазу.

По другому основному закону имѣемъ

$$\mathcal{J}_2^2 = \frac{\mathcal{E}_{2i}^2}{r_2^2 + (2\pi c_2 L'_2)^2} \text{} \quad (23)$$

гдѣ L'_2 —коэффиціентъ самоиндукціи, соответствующій вторичному полю разсѣянія ¹⁾.

¹⁾ Эл.-да силу E_{2i} не надо смѣшивать съ такъ наз. вторичной эл.-дв. силой E_2 . Послѣднимъ индуцируется не общимъ полемъ Φ , а вторичнымъ полемъ Φ_2 . Это ясно изъ слѣдующаго: уравненіе напряженій цѣпи вторичнаго тока i_2 , индуцируемаго первичнымъ токомъ i_1 будетъ

$$M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2 = 0 \text{} \quad (1)$$

причемъ M обозначаетъ коэффиц. взаимоиндукціи, а L_2 —коэффи. самоиндукціи всей вторичной цѣпи. Послѣдний состоитъ изъ самоиндукціи L_2 , тѣхъ спловыхъ линій, которая сцепляются съ вервичнымъ токомъ (соответствующимъ вторичному фиктивному полю) и самоиндукціи L'_2 , тѣхъ линій, которая сцепляются лишь съ вторичнымъ токомъ, т.-е. линій вторичнаго потока разсѣянія. Вѣнцей самоиндукціи мы не принимаемъ во вниманіе, такъ какъ при нормальной работе двигателя она не существуетъ. (См. на обратную).

Вставляя сюда значеніе \mathcal{E}_{2i} изъ форм. (22), получимъ:

$$\mathfrak{J}_2^2 = \frac{2\pi^2 c_2^2 w_2^2 \Phi^2}{r_2^2 + (2\pi c_2 L'_2)^2}$$

Вставивъ значеніе c_2 изъ форм. (5), получимъ

$$\mathfrak{J}_2^2 = \frac{2\pi^2 c_1^2 s^2 w_2^2 \Phi^2}{r_2^2 + s^2 (2\pi c_1 L'_2)^2}$$

Теперь для вращающаго момента получаемъ

$$M = \pi m p w_2^2 \Phi^2 \frac{r_2^2 c_1 s}{r_2^2 + s^2 (2\pi c_1 L'_2)^2} \dots \quad (24)$$

Изъ этого выраженія видно, что вращающій моментъ пропорціоналенъ числу паръ полюсовъ p , квадрату витковъ ротора и квадрату потока.

Общий потокъ Φ не равенъ потоку Φ_1 , создаваемому обмоткой статора, т. к. часть послѣдняго проходитъ мимо ротора, не пронизывая его обмотки. Положимъ, что

$$\frac{\Phi_1}{\Phi} = \gamma, \dots \quad (25)$$

гдѣ γ —коэффиціентъ, зависящій оть первичнаго разсѣянія.

Тогда уравненіе напряженій будетъ:

$$M \frac{di_2}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + L'_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2 = 0 \dots \quad (2)$$

Оба первыя члена даютъ вмѣстъ эл.-дв. силу e_2 , эффективная величина которой есть \mathcal{E}_{2i} , и которая индуцируется общимъ полемъ Φ . Сдвигъ фазъ между этой эл.-дв. силой и вторичнымъ токомъ будетъ

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi c_2 L'_2}{r_2} \text{ (ср. гл. 16, фиг. 69).}$$

Наоборотъ первыя три члена равенства (1) даютъ эл.-дв. силу e_2 , эффективная величина которой есть \mathcal{E}_2 . Изъ этой эл.-дв. силы получается вторичная сила тока, въ отличіе оть равен. (23), какъ $\mathfrak{J}_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{r_2}$ и сдвигъ фазъ между вторичнымъ токомъ и этой эл.-дв. силой нуль. На самомъ дѣлѣ многие авторы исходить изъ той эл.-дв. силы, которая индуцируется вторичнымъ полемъ. Но такой методъ не даетъ правильного представления, такъ какъ магнитную связь статора съ роторомъ представляетъ поле Φ , а не вторичное Φ_2 , которое лишь частично связывается со статоромъ. Исходя изъ вторичнаго поля Φ_2 и эл.-дв. силы \mathcal{E}_2 нельзя также сдѣлать заключенія о важной зависимости вращающаго момента оть вторичной самоиндукціи L'_2 , которая показана въ дальнѣйшемъ.

По основному закону

$$\Phi_1 = \frac{\sqrt{2} \mathcal{E}_1}{2\pi c_1 w_1} .$$

Если ввести оба последние выражения в уравнение (24), получимъ

$$M = \frac{mpw_1^2 \Phi_1^2}{2\pi w_1^2 r^2} \cdot \frac{r_2 s}{c_1 [r_2^2 + s^2 (2\pi c_1 L'_2)^2]} \dots \quad (26)$$

Такимъ образомъ вращающей моментъ, при прочихъ равныхъ условіяхъ, пропорционаленъ квадрату первичной эл.-дѣ. силы, но тѣмъ менѣе, чѣмъ больше число периодовъ первичного тока. Сложнѣе зависимость M отъ величинъ r_2 , s и L'_2 . Разсмотримъ, поэтому, подробнѣе эти зависимости, и главнымъ образомъ настѣдуемъ имѣть ли вращающей моментъ максимумъ для какого-либо скольженія. Для нахожденія максимума возьмемъ производную отъ M по s и приравняемъ ее нулю. Для упрощенія соединимъ сперва всѣ величины, не содержащія s въ одинъ коэффиціентъ C и раздѣлимъ числитель и знаменатель на s , тогда

$$M = C \cdot \frac{1}{\frac{r_2^2}{s} + s (2\pi c_1 L'_2)^2}$$

$$\frac{dM}{ds} = -C \left[\frac{-\frac{r_2^2}{s^2} + (2\pi c_1 L'_2)^2}{\left[\frac{r_2^2}{s} + s (2\pi c_1 L'_2)^2 \right]^2} \right] = 0.$$

Такъ какъ знаменатель не можетъ быть бесконечно большимъ, то числитель долженъ быть нулемъ. Отсюда получаемъ условіе для максимума:

$$s = \frac{r_2}{2\pi c_1 L'_2} \dots \quad (27)$$

Такимъ образомъ вращающей моментъ достигаетъ максимума тогда, когда скольженіе равно отношенію ваттнаго сопротивленія обмотки ротора къ безваттному сопротивленію ея, но отнесенному къ числу периодовъ первичного тока, которое предполагается постояннымъ. Этотъ максимумъ наступаетъ при тѣмъ большемъ скольженіи, т.-е. при тѣмъ меньшемъ числѣ оборотовъ, чѣмъ больше отношеніе ваттнаго сопротивленія ротора къ его безваттному сопротивленію. Принявъ во внимание уравненіе 5, получимъ условіе максимума въ такомъ видѣ:

$$\frac{2\pi c_1 L'_2}{r_2} = 1 \dots \quad (28)$$

т.-е. вращающій моментъ достигаетъ максимума, когда безвятнное сопротивленіе, соотвѣтствующее вторичному полю разсѣянія, равняется ваттному сопротивленію ротора. По уравненію (23) получаемъ сдвигъ фазъ между вторичнымъ токомъ и эл.-дв. силой \mathcal{E}_2 :

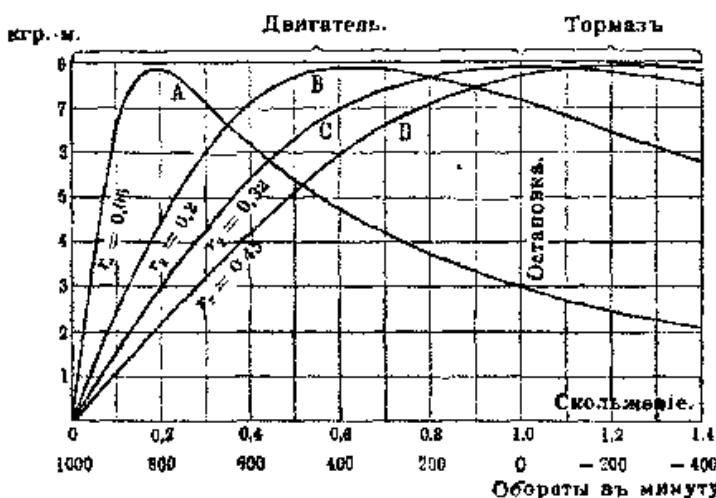
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2\pi e_2 L_2'}{r_2} \quad \dots \dots \quad (29)$$

Сопоставляя это выражение съ условіемъ максимума для вращающаго момента (28), видимъ что максимумъ для M насту-паетъ тогда, когда $\operatorname{tg} \delta = 1$, т.-е. когда тангенсъ угла сдвига фазъ между токомъ и эл.-дв. силой \mathcal{E}_2 равенъ единицѣ.

Подставивъ выражение (27) въ формулу (26), получимъ выражение для наибольшаго значенія вращающаго момента

$$M_{\max} = \frac{mpw_2^2 \mathcal{E}_1^2}{8\pi^2 w_1^2 \gamma^2 c_1^2 L_2'} \quad \dots \dots \quad (30)$$

Въ это выражение совсѣмъ не входитъ сопротивленіе r_2 ; слѣдовательно наибольшее значеніе вращающаго момента не зависитъ отъ сопротивленія ротора; оно зависитъ, при прочихъ равныхъ условіяхъ, отъ самоиндук-ціи, соотвѣтствующей полю разсѣянія ротора. Но величина ваттнаго сопротивленія входитъ въ общее выражение для



Фиг. 14. Вращающій моментъ двигателя при различныхъ сопротивленіяхъ въ роторѣ.

вращающаго момента (ур. 26), что даетъ намъ право сдѣлать заключеніе, что величина сопротивленія вліяетъ лишь на то, при какомъ скольженіи вращающій моментъ принимаетъ ма-ко-маленькое значеніе. Это подтверждается кривыми зависимости вращающаго момента (фиг. 14) отъ величины скольженія для

четырехъ различныхъ сопротивлений r_2 , причемъ всѣ остальные факторы, въ особенности L'_2 , постоянны. Практически это осуществляется включениемъ соответствующаго сопротивления въ цѣль ротора. На оси абсциссъ отложены скольженіе и числа оборотовъ шестиполюснаго двигателя. Значеніе ваттныхъ сопротивлений, для которыхъ начерчены кривыя, указаны на постѣднихъ. Изъ кривыхъ ясно, что хотя они и различны, но во всѣхъ ихъ максимальные значения вращающаго момента одинаковы. Но скольженія, при которыхъ наступаютъ максимумы вращающаго момента различны. Для $r_2 = 0,06$ ома максимумъ получается при $s = 0,19$, для $r_2 = 0,2\Omega$ — при $s = 0,63$ и для $r_2 = 0,32\Omega$ только при $s = 1$, т.-е. при троганіи съ места двигателя. Рассматривая ближе кривую С, мы видимъ, что съ увеличеніемъ нагрузки двигателя, т.-е. съ уменьшеніемъ числа оборотовъ отъ 1000 до нуля, вращающей моментъ непрерывно возрастаетъ. Такой двигатель имѣть то достоинство, что его вращающей моментъ, въ предѣлахъ обусловленныхъ размѣрами двигателя и приложеніемъ напряженіемъ, возрастаетъ съ увеличеніемъ нагрузки, такъ что въ этихъ предѣлахъ онъ не можетъ остановиться. Онъ подобенъ тѣлу находящемуся въ состояніи устойчиваго равновѣсія. Иначе обстоитъ дѣло при сопротивлении въ роторѣ, соответствующемъ кривой А. Здѣсь съ увеличеніемъ нагрузки, т.-е. съ уменьшеніемъ числа оборотовъ, вращающей моментъ растетъ до тѣхъ поръ пока при $s = 0,19$ не достигаетъ своего максимума. Если нагружать его дальше, то вращающей моментъ его падаетъ и тѣмъ больше, чѣмъ большими становится скольженіе. Поэтому двигатель, перейдя максимумъ, быстро останавливается. Подобный двигатель аналогиченъ тѣлу, находящемуся въ неустойчивомъ равновѣсіи. Скольженіе, при которомъ получается максимальный вращающей моментъ, является такимъ образомъ предѣломъ для нагрузки двигателя. Это скольженіе опредѣляется по форм. (27), а сама предѣльная нагрузка — по форм. (30).

Если сопротивление ротора больше 0,32, то максимумъ вращающаго момента наступаетъ при скольженіи большемъ единицы. Это, по уравненію (2), будетъ тогда, когда ϕ_2 отрицательно, т.-е. когда двигатель вращается вѣшней силой въ направлѣніи обратномъ вращенію поля. При отрицательномъ ϕ_2 по ур. (7) и W_2 отрицательно.

W_2 есть теперь та мощность, которую необходимо приложить извѣдь для вращенія ротора со скоростью ω_2 въ обратномъ направлѣніи и, которая, такъ же, какъ и электрическая мощность, подводимая отъ статора, обращается въ обмоткѣ ротора въ тепло Джоуля. Это слѣдуетъ изъ уравн. (10), согласно которому въ тепло переходитъ тѣмъ большая часть энергіи, подводимой отъ статора, чѣмъ больши скольженіе. При остановкѣ ротора ($s = 1$) вся подводимая энергія обращается въ тепло, и двигатель не даетъ никакой работы, какъ это, очевидно, и должно быть.

Если скольженіе становится больше единицы, то тепловые потери V превосходятъ мощность W_1 , а это возможно только въ томъ случаѣ, если, кроме доставляемой сѣтью мощности W_1 , въ тепло обращается еще и мощность W_2 , затрачиваемая на обратное вращеніе ротора. Такимъ образомъ при скольженіи большемъ единицы двигатель дѣйствуетъ вполнѣ какъ тормозъ, поглощающій энергию.

На практикѣ асинхронный двигатель обыкновенно включается въ сѣть съ постояннымъ напряженіемъ, поэтому неподвижнымъ въ немъ является не эл.-дв. с., а первичное напряженіе. Вслѣдствіе этого вращающій моментъ несколько меньше, чѣмъ это получалось бы по предыдущимъ формуламъ. Скольженія же, какъ независящія отъ эл.-дв. силы, не измѣняются.

Выраженіе для вращающаго момента можетъ также быть получено изъ основнаго электромеханическаго закона, по которому сила дѣйствующая на проводникъ длиною l съ токомъ \mathcal{J}_2 , находящимся въ магнитномъ полѣ съ плотностью B , пропорциональна $l\mathcal{J}_2B$. Поэтому при постоянномъ B , а значитъ и при постоянной первичной эл.-дв. силѣ, вращающій моментъ зависитъ только отъ \mathcal{J}_2 . Это не противорѣчить ур. (14), по которому вращающій моментъ зависитъ также отъ ваттнаго сопротивленія вторичной обмотки и скольженія, такъ какъ $\mathcal{J}_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{r_2}$.

Если, напримѣръ, сопротивление r_2 возрастетъ, то токъ \mathcal{J}_2 уменьшится, вслѣдствіе чего двигатель начнетъ вращаться медленнѣе, т.-е. его скольженіе возрастетъ.

Съ увеличеніемъ же скольженія увеличивается и вторичная эл.-дв. сила, т. к.

$$\mathcal{E}_2 = \frac{2\pi}{V^2} c_2 w_2 \Phi_2 \quad \text{и} \quad c_2 = c_1 s.$$

Поэтому, несмотря на увеличеніе ваттнаго сопротивленія, сила тока восстановляется прежняя. Итакъ при измѣненіи сопротивленія ротора измѣняется пропорционально и скольженіе, такъ что вращающій моментъ при постоянной силѣ поля по уравненію (14) зависитъ только отъ \mathcal{J}_2 , такъ какъ ω_1 — угловая скорость магнитнаго поля — является величиной постоянной

9. Начальный вращающій моментъ.

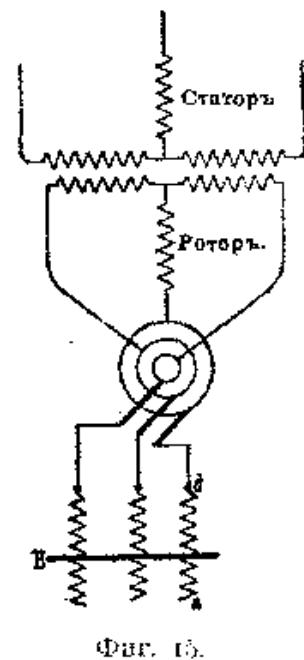
На практикѣ часто требуется, чтобы двигатель развивалъ при пускѣ въ ходъ возможно большій вращающій моментъ. Это особенно важно въ двигателяхъ для подъемниковъ. Поэтому желательно имѣть въ подобныхъ двигателяхъ сопротивление ротора такимъ, при которомъ кривая моментовъ приближалась бы къ кривой C , гдѣ максимальный мо-

ментъ имѣть мѣсто при $s = 1$, т.-е. при пускѣ въ ходъ. Съ другой стороны коэф. пол. дѣйствія такого двигателя выше, чѣмъ двигателей работающихъ по кривымъ *A* и *B*, такъ какъ сопротивленіе его ротора больше, а тепловыя потери пропорциональны сопротивленію. Нагрѣвавіе въ большинствѣ случаевъ можетъ быть такъ велико, что двигатель не можетъ безъ вреда для себя работать продолжительное время при такихъ условіяхъ. Но r_2 обозначаетъ не только сопротивленіе ротора, но вообще—всей вторичной цѣпи; часть сопротивленія можетъ находиться и въ роторѣ. Когда двигатель пущенъ въ ходъ и достигъ нормальныхъ условій работы, то вѣнчаная часть сопротивленія можетъ быть выключена, причемъ обмотка ротора замыкается на короткое. Сопротивленіе обмотки должно быть подобрано такъ, чтобы, съ одной стороны, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія былъ возможно выше, съ другой—максимальный вращающій моментъ наступать при возможно большемъ скольженіи, т. к. въ противномъ случаѣ предѣлъ возможной перегрузки двигателя наступаетъ уже при незначительномъ уменьшеніи числа оборотовъ. Въ большинствѣ двигателей сопротивленіе ротора подбирается такъ, что кривая моментовъ лежитъ между кривыми *A* и *B* (фиг. 14).

Для получения высокаго к. п. д. и незначительного нагрѣванія нужно, чтобы въ предѣлахъ нормальной работы двигателя скольжение замынялось незначительно. Больше двигатели при полной нагрузкѣ рѣдко имѣютъ скольжение больше 0,04 (4%), малые—рѣдко больше 0,06 (6%); наложеніе же вращающаго момента начинается между 0,2 (20%) и 0,6 (60%) скольженія.

При практическомъ выполненіи двигателя, у которого часть вторичнаго сопротивленія находится въ роторѣ и выключается при достиженіи нормального числа оборотовъ, необходимо обмотку ротора присоединить къ колышкамъ, черезъ которыхъ токъ ротора при помощи щетокъ пропускается черезъ вѣнчаное сопротивленіе (пусковой реостатъ), какъ это показано схематически на фиг. 15. Конечно это обусловливаетъ болѣе сложную и дорогую конструкцію двигателя сравнительно съ двигателями съ коротко-замкнутой обмоткой и безъ пускового приспособленія. Поэтому въ тѣхъ случаяхъ, когда условія работы не требуютъ большого начального момента, предпочтитаются, въ особенности въ небольшихъ двигателяхъ, коротко-замкнутый роторъ.

Въ большинствѣ случаевъ двигатель съ коротко-замкнутымъ роторомъ также развиваетъ достаточный начальный моментъ,



Фиг. 15.

но потребляеть при этомъ большій токъ, чѣмъ двигатель съ кольцами и пусковымъ реостатомъ. Чтобы подробнѣе разобрать этотъ вопросъ вернемся къ ур. (16). Когда роторъ находится въ покое, скольженіе $s=1$. Начальный моментъ будетъ

$$M_a = \frac{p}{2\pi c_1} \cdot m r_2 \mathcal{J}_2^2 \quad \dots \dots \dots \quad (31)$$

т.-е., при прочихъ равныхъ условіяхъ, онъ пропорціоналенъ квадрату силы вторичнаго тока. Но находящійся въ покое асинхронный двигатель съ коротко-замкнутымъ роторомъ представляетъ собою ни что иное, какъ коротко-замкнутый трансформаторъ. Въ трансформаторъ же, какъ известно, число первичныхъ и вторичныхъ ампервитковъ равны, т.-е.

$$\mathcal{J}_2 w_2 = \mathcal{J}_1 w_1,$$

откуда

$$M_a = \frac{m p r_2}{2\pi c_1} \cdot \frac{w_1^2}{w_2^2} \cdot \mathcal{J}_1^2 \quad \dots \dots \dots \quad (32)$$

т.-е. начальный вращающій моментъ пропорціоналенъ квадрату первичнаго, подводимаго къ статору, тока, и ваттному сопротивлению вторичной цѣпи. Для получения данного вращающаго момента при большемъ сопротивлении въ цѣпи ротора требуется меньшій (въ корень квадратный изъ отношенія сопротивлений раза) токъ.

Поэтому для возможнаго меньшаго потребленія тока при пускѣ въ ходъ слѣдуетъ двигатели съ кольцами снабжать регулировочнымъ пусковымъ сопротивлениемъ, которое при передвиженіи контакта B отъ a къ d постепенно уменьшалось бы до нуля. Если по условіямъ работы требуется отъ двигателя небольшой начальный моментъ, то онъ достигается при большомъ вторичномъ сопротивлѣніи, т.-е. при маломъ расходѣ тока. Двигатель начинаетъ вращаться и, при постоянномъ уменьшеніи сопротивлѣнія реостата, достигаетъ скольженія, при которомъ моментъ имѣть максимальное значеніе. При дальнѣйшемъ уменьшеніи сопротивлѣнія соотвѣтственно возрастающему числу оборотовъ (убывающему скольженію), вращающій моментъ въкоторое время сохраняетъ свой максимумъ, такъ какъ онъ съ уменьшеніемъ сопротивлѣнія вторичной цѣпи смыкается въ сторону возрастанія числа оборотовъ (на фиг. 14 влѣво). Такимъ образомъ возможнопустить двигатель въ ходъ при наименьшемъ расходѣ тока, что очень важно въ томъ случаѣ, если мощность источника тока не очень велика по сравненію съ мощностью двигателя, такъ какъ при несоправимо большомъ потребленіи тока двигателемъ въ сѣти получится большое паденіе напряженія.

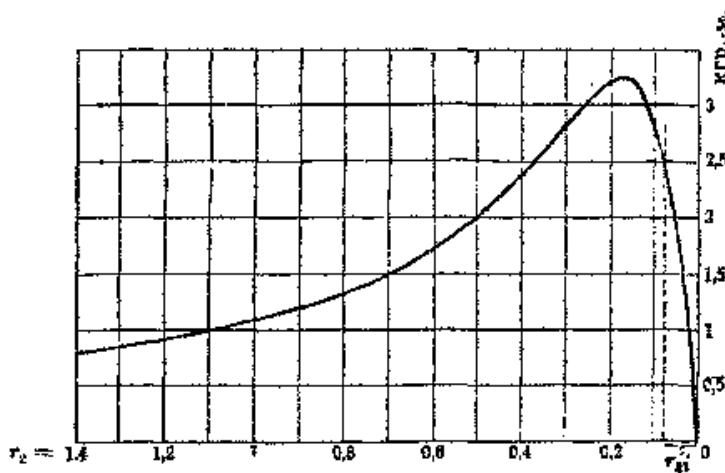
Изъ уравнений (31) и (32) слѣдуетъ, что, при прочихъ равныхъ условіяхъ, начальный вращающій моментъ обратно пропорціоналенъ числу періодовъ первичаго тока. Если условія работы допускаютъ при пускѣ въ ходъ пониженіе числа періодовъ генератора, то этимъ достигается соотвѣтственное увеличеніе вращающаго момента. Этимъ иногда пользуются при пускѣ въ ходъ двигателя. Но изъ уравненія (26) слѣдуетъ, что при любомъ скольженіи вращающій моментъ увеличивается съ уменьшеніемъ числа періодовъ c_1 . Но было бы ошибочно отсюда заключить, что выгодно питать двигатель токомъ меньшей частоты, чѣмъ та, на какую онъ расчитанъ.

Не говоря уже о прочихъ, возникающихъ при этомъ, неудобствахъ, въ этомъ случаѣ число оборотовъ двигателя уменьшается, а слѣдовательно уменьшается соотвѣтственно и мощность его.

Для полученія зависимости начального вращающаго момента отъ вторичнаго сопротивленія r_2 при постоянной электродвижущей силѣ подставимъ въ уравненіе (26) $s=1$; получимъ:

$$M_a = \frac{\pi p w_2^2 \mathcal{E}_1^2}{2 \pi w_1^2 r_1^2} \cdot \frac{r_2}{r_1 [r_2^2 + (2 \pi c_1 L'_2)^2]} . . . (33)$$

Фиг. 16 даетъ такую зависимость для двигателя въ 2 лошадиныхъ силы.



Фиг. 16. Начальный вращающий моментъ 2-хъ сильнаго двигателя при различныхъ сопротивленіяхъ въ роторѣ.

Слѣдуетъ различать двигатели, пускаемые въ ходъ при большомъ сопротивлении во вторичной цѣпи, когда въ роторѣ включается пусковой реостатъ и двигатели съ неизначительнымъ сопротивленіемъ (коротко-замкнутый роторъ). Въ первомъ случаѣ можно величиной $(2 \pi c_1 L'_2)^2$ сравнительно съ r_2^2 пре-небречь. Тогда, приблизительно, получимъ

$$M_o = \frac{mpw_2^2\phi_1^2}{2\pi w_1^2\gamma^2 c_1 r_2} \quad \dots \dots \dots \quad (34)$$

Въ этомъ случаѣ начальный вращающій моментъ обратно пропорціоналенъ числу періодовъ c_1 и вторичному сопротивлению (лѣвая часть кривой фиг. 16, отъ $r_2 = \infty$ до $r_2 = 0,8$).

Въ двигателяхъ съ небольшимъ сопротивлениемъ вторичной цѣпи можно пренебречь величиной r_2^2 по сравненію съ $(2\pi c_1 L'_2)^2$. Тогда начальный вращающій моментъ приблизительно равенъ

$$M_o = \frac{mpw_2^2\phi_1^2 r_2}{8\pi^3 w_1^3 \gamma^2 c_1^3 L'_2} \quad \dots \dots \dots \quad (35)$$

Въ этомъ случаѣ начальный вращающій моментъ прямо пропорціоналенъ сопротивлению вторичной цѣпи (фиг. 16) и обратно пропорціоналеъ кубу числа періодовъ.

Такимъ образомъ увеличеніе сопротивленія вторичной цѣпи только въ томъ случаѣ влечетъ за собой возрастаніе начального вращающаго момента, пока это сопротивление остается ниже известнаго предѣла, опредѣляемаго величиной L'_2 (напр. на фиг. 16 ниже 0,173 Ω). Выше этого предѣла увеличеніе сопротивленія влечетъ за собой уменьшеніе начального вращающаго момента. На фиг. 16 r_2 обозначаетъ сопротивление самой обмотки ротора ($0,08 \Omega$); если не включено никакого добавочнаго сопротивленія, то двигатель развиваетъ вращающій моментъ въ 2,5 к.-м. (на фиг. 16 показанъ пунктиромъ).

Для полученія наибольшаго начального момента, опредѣляемаго по форм. (30), нужно сопротивление вторичной цѣпи взять такимъ, какое оно получится по форм. (27) при $s = 1$.

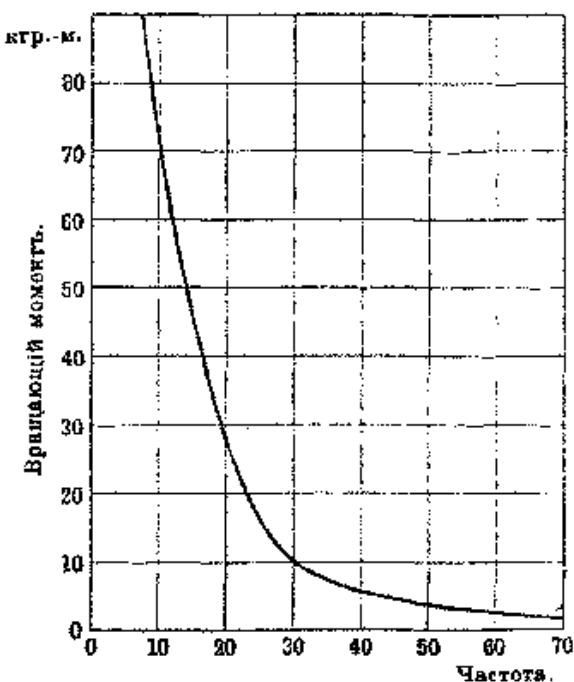
Получимъ

$$r_2 = 2\pi c_1 L'_2,$$

то есть, ваттное сопротивленіе вторичной цѣпи должно быть равно безваттному сопротивленію, соответствующему вторичному полю разсѣянія, но отнесенному къ числу періодовъ первичнаго тока. Въ нашемъ примѣрѣ оно равно $0,173 \Omega$. Слѣдовательно необходимо включить въ цѣпь ротора добавочное сопротивленіе въ $0,173 - 0,08 = 0,093$ ома, чтобы вращающій моментъ былъ наиболѣшій (3,24 килограммо-метра) при пускѣ въ ходъ. По кривой фиг. 16 можно опредѣлить и сопротивленія, необходимыя для полученія меньшихъ начальныхъ моментовъ, а по уравненію (31)—найти соответствующіе токи въ роторѣ и по ур. (32) соответствующіе токи въ статорѣ. Эти соображенія очень важны для расчета пусковыхъ реостатовъ (ср. гл. 24).

Что касается числа періодовъ, то изъ ур. (33) слѣдуетъ, что начальный моментъ тѣмъ больше, чѣмъ менѣе число періодовъ. Въ первомъ случаѣ, при большемъ сопротивленіи

вторичной цепи (ур. 34), онъ обратно пропорционаленъ первой степени числа периодовъ, во второмъ же случаѣ, при маломъ сопротивлѣніи вторичной цепи (форм. 35), онъ обратно пропорционаленъ кубу числа периодовъ. Кривая на фиг. 17 соответствуетъ второму случаю. Слѣдовательно въ двигателяхъ съ коротко-замкнутымъ роторомъ можно небольшимъ уменьшениемъ частоты тока значительно увеличивать начальный моментъ.



Фиг. 17. Вращающий моментъ въ зависимости отъ частоты тока.

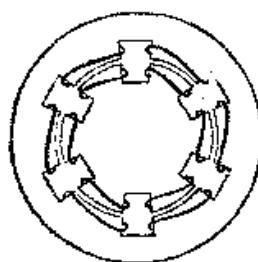
При этомъ однако предполагается, что всѣ прочія величины, въ особенности приложенное къ статору напряженіе, постоянны.

10. Неравномѣрность вращающего момента.

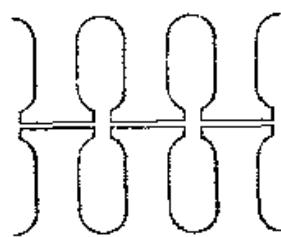
Въ предыдущихъ разсужденіяхъ предполагалось, что вращающееся поле правильное круговое, т.-е. постоянной силы и вращается съ равномѣрной скоростью. Какъ известно изъ главы 2, это достигается наложеніемъ полей отдельныхъ фазъ, для чего необходимо, чтобы обмотки сдѣлялись одна съ другой. Если же представить себѣ, въ противоположность фиг. 10 и 12, обмотку двухполюсного трехфазного двигателя, съ расположеннымъ рядомъ катушками (фиг. 18), то роторъ не будетъ вращаться. Дѣйствительно, создаваемый каждой фазой потокъ выходитъ изъ своего строго ограниченного полюса и входитъ въ такой же полюсъ ротора. Силы взаимодѣйствія

между первичной и вторичной обмотками направлены по радиусу и взаимно уничтожаются. Нѣчто подобное имѣть мѣсто и при нормальныхъ обмоткахъ, если числа зубцовъ на статорѣ и роторѣ равны (фиг. 19а).

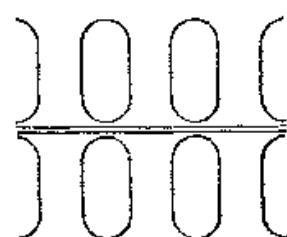
Такой двигатель, не получивъ извѣя толчка, не могъ бы тронуться съ мѣста, когда зубцы ротора и статора находились бы прямо другъ противъ друга. Во избѣженіе этого статоръ и роторъ должны быть снабжены неодинаковымъ числомъ зубцовъ, и лучше всего, если эти числа не имѣютъ общихъ множителей.



Фиг. 18.



Фиг. 19а.



Фиг. 19б.

Въ коротко-замкнутыхъ обмоткахъ (на подобіе бѣлпчьяго колеса) это достигается легко, въ роторахъ же съ кольцами, гдѣ приходится дѣлать правильныя фазовыя обмотки, число зубцовъ должно быть кратнымъ числа полюсовъ и фазъ. При опредѣленныхъ положеніяхъ ротора нѣкоторые зубцы становятся прямо другъ противъ друга, а нѣкоторые почти прямо другъ противъ друга. Всѣдѣствіе этого часто случается, что подобные двигатели сами не берутъ съ мѣста безъ виѣшняго толчка, каковымъ можетъ быть сотрясеніе ротора при включеніи двигателя. Однако въ нѣкоторыхъ опредѣленныхъ положеніяхъ подобные двигатели можно остановить рукой. Во всякомъ случаѣ легко замѣтить, что начальный вращающій моментъ такихъ двигателей измѣняется толчками, что зависитъ отъ взаимнаго расположения зубцовъ статора и ротора.

Иначе обстоитъ дѣло, если проводники обмотки уложены не въ открытыхъ, а въ закрытыхъ каналахъ (фиг. 19б). Здѣсь упомянутое обстоятельство не можетъ имѣть мѣста, такъ какъ выходящіе и входящіе въ роторъ потоки, взаимодѣйствуютъ и нарушаютъ симметрію. Если, несмотря на это, такие двигатели встрѣчаются все рѣже, то это объясняется трудностью ихъ изготовлениія. Въ главѣ 8 мы уже видѣли, что поля разсѣянія, въ особенности вторичное, имѣютъ очень важное значеніе (ур. 25).

Оба они прежде всего зависятъ отъ магнитнаго сопротивленія между зубцами, а это послѣднее измѣняется значительно при самыхъ малыхъ измѣненіяхъ толщины мостика

между зубцами (фиг. 19). Подобныя же измѣненія могутъ произойти при обточкѣ на токарномъ станкѣ.

11. Вращающій моментъ, вызываемый токами Фуко и гистерезисомъ.

Отъ пересѣченія вращающимся полемъ ротора индуцируются токи не только въ его обмоткѣ, но и въ листовъмъ же лѣзъ ротора, такъ называемыя токи Фуко, которые также взаимодѣйствуютъ съ полемъ и создаютъ искаженный вращающій моментъ. Послѣдній однако сравнительно съ моментомъ, создаваемымъ токомъ въ обмоткѣ ротора, такъ незначителенъ, что имъ вполнѣ можно пренебречь. Чтобы принять во вниманіе его, слѣдовало бы увеличить токъ I_2 на небольшую величину, которую можно было бы опредѣлить приближительно по тепловымъ потерямъ на токи Фуко.

Кромѣ того, возникаетъ еще небольшой моментъ отъ гистерезиса или вѣрнѣе сказать отъ остаточного магнетизма. Такъ какъ въ асинхронномъ двигателе первичное поле непрерывно вращается, а роторъ отстаетъ на величину скольженія, то остаточный магнетизмъ на той поверхности, где потокъ входитъ, отстаетъ отъ остаточного магнетизма на поверхности статора, откуда потокъ выходитъ. Между остаточными магнетизмами возникаетъ сила, направленіе которой проходитъ черезъ центры полюсовъ. Эта сила даетъ составляющую въ направленіи радиуса и касательной къ ротору. Послѣдняя вызываетъ вращающій моментъ, который однако тѣмъ меньше, чѣмъ меньше отставаніе ротора, т.-е. скольжение. При небольшихъ скольженіяхъ моментъ, вызываемый остаточнымъ магнетизмомъ, пропорціоналенъ скольженію.

Въ двигателяхъ съ открытыми каналами кромѣ остаточного магнетизма въ полюсахъ имѣется еще остаточный магнетизмъ въ каждомъ зубцѣ. Но такъ какъ въ области каждого полюса находится нѣсколько зубцовъ, то взаимодѣйствія ихъ остаточныхъ магнетизмомъ взаимно компенсируются.

Такъ какъ для полученія высокаго ковѣцтвента полезнаго дѣйствія въ двигателяхъ примѣняется желѣзо съ малымъ остаточнымъ магнетизмомъ, то моментомъ послѣдняго можно пренебречь. Однако возможно, что моментъ отъ токовъ Фуко и гистерезиса бываетъ достаточенъ для преодолѣнія сопротивленія воздуха и тренія и для поддержанія вращенія ротора въ холостую при разомкнутомъ роторѣ.

12. Мощность и коэффиціентъ полезнаго дѣйствія.

По закону механики мощность всякаго двигателя равна произведению изъ угловой скорости на вращающій моментъ.

По уравненію (7)

$$W_2 = \omega_2 M$$

Эта мощность W_2 однако не можетъ быть использована цѣлкомъ, такъ какъ часть ея идетъ на преодолѣніе сооротивленій тренія о воздухъ и въ подшипникахъ. Обозначимъ эту частію мощности черезъ R , а полезную мощность черезъ W_n , тогда

$$W_n = W_2 - R (36)$$

Изъ уравненія (2) имѣмъ

$$\omega_2 = \omega_1 (1-s), (37)$$

откуда

$$W_2 = \omega_1 (1-s) M (38)$$

или

$$W_2 = \frac{2\pi c_1}{p} (1-s) M (39)$$

Подставивъ выраженіе для M изъ уравненія (26), имѣмъ

$$W_2 = \frac{m w_2^2 \mathcal{G}_1^2}{w_1^2 r_i^2} \cdot \frac{r_2 s (1-s)}{r_2^2 + s^2 (2\pi c_1 L'_2)^2} (40)$$

При очень малыхъ нагрузкахъ, когда скольженіе незначительно, имъ можно пренебречь сравнительно съ единицей, а членомъ $s^2 (2\pi c_1 L'_2)^2$ —по сравненію съ r_2^2 . Въ этомъ случаѣ

$$\omega_2 = \omega_1 = \frac{2\pi c_1}{p}$$

и

$$W_2 = \frac{m w_2^2 \mathcal{G}_1^2}{w_1^2 r_i^2} \cdot \frac{s}{r_2} (41)$$

Отсюда (по ур. 26)

$$M = \frac{mp w_2^2 \mathcal{G}_1^2}{2\pi c_1 w_1^2 r_i^2} \cdot \frac{s}{r_2} (42)$$

Итакъ, при малыхъ нагрузкахъ какъ мощность такъ и врашающей моментъ пропорціональны скольженію. На фиг. 20 это выражается тѣмъ, что нижняя часть кривой скольженія прямолинейна.

Изъ фиг. 22 видно, что мощность въ функции отъ скольженія, а значитъ и отъ числа оборотовъ ротора, имѣть максимумъ. Для нахожденія его слѣдуетъ приравнять нулю производную выраженія для W_2 (ур. 40) по s . Для простоты соеди-

нимъ члены, не зависящіе отъ s , въ одну постоянную C и положимъ $2\pi c_1 = \omega$, тогда

$$W_2 = C \frac{s(1-s)}{r_2^2 + s^2 \omega^2 L'_2}$$

Отсюда получаемъ условіе для максимума W_2 :

$$s^2 \omega^2 L'_2 + 2sr_2^2 = r_2^2 \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (43)$$

Такъ какъ это уравненіе квадратное, то изъ него получаемъ два значенія для s , при которыхъ W_2 имѣеть максимумъ, а именно:

$$s = - \frac{r_2}{\omega^2 L'_2} (r_2 - \sqrt{r_2^2 + \omega^2 L'_2})$$

$$\text{и} \quad s = - \frac{r_2}{\omega^2 L'_2} (r_2 + \sqrt{r_2^2 + \omega^2 L'_2})$$

Изъ этихъ формулъ видно, что скольженіе, при которомъ наступаетъ максимальная мощность двигателя, зависитъ только отъ натнаго и безваттнаго сопротивленій вторичной цѣпи его, такъ же какъ и скольженіе, соотвѣтствующее максимуму врашающаго момента (гл. 6).

Перное значеніе s всегда положительно, такъ какъ выраженіе въ скобкахъ всегда отрицательно. Слѣдовательно оно относится къ случаю работы машины двигателемъ, тогда какъ второе значеніе всегда отрицательное и относится къ случаю работы машины генераторомъ, когда роторъ вращается извѣдь со скоростью выше синхронной.

Коэффициентъ полезнаго дѣйствія (машины) двигателя называютъ отношеніе полезной мощности двигателя къ полной имъ потребляемой мощности.

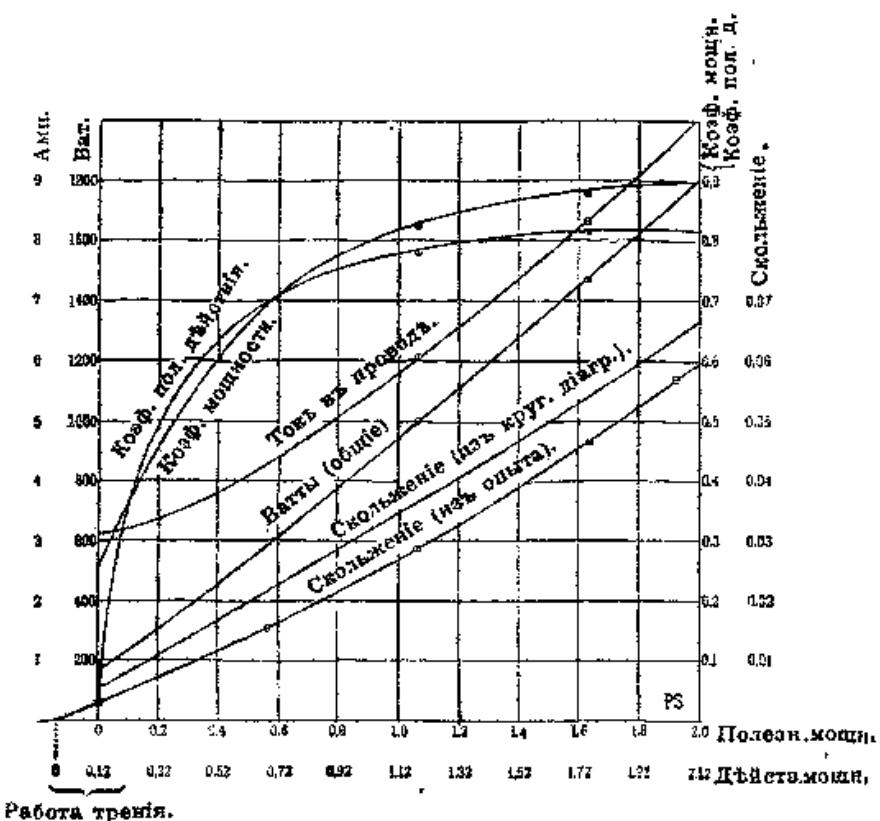
Обозначимъ послѣднюю черезъ Q , тогда

$$\eta = \frac{W_a}{Q}$$

На практикѣ коэф. пол. дѣйствія опредѣляется измѣреніемъ полезной мощности тормазомъ, а потребляемой ваттметромъ. При вычислениі к. п. дѣйствія нужно принять во вни-
маніе, что потребляемая двигателемъ мощность состоять изъ полезной и идущей на потери. Послѣдняя суть: потери на треніе о воздухъ, въ подшипникахъ (а также—шетокъ)— R , потери въ желѣзѣ— G , состоящія изъ потерь на гистерезисъ и на токи Фуко въ статорѣ и роторѣ, потери на Джоулево тепло въ обмоткѣ статора— H и потери въ мѣди ротора V . Поэтому

$$Q = W_a + R + G + H + V.$$

Для сужденія о свойствахъ двигателя слѣдуетъ строить кривыя зависимостей к. пол. дѣйствія, коэф. мощности ($\cos\varphi_1$), первичнаго тока, скольженія и вращающаго момента отъ полезной мощности двигателя. Фиг. 20 представляетъ такія кривыя для трехфазнаго четырехполюснаго двигателя нормальной мощности въ 2 лош. силы. Нуль полной, отдаваемой роторомъ, мощности получимъ, отложивъ влѣво отъ нуля полезной мощности потері на треніе. Точки пересѣченія кривыхъ съ осью ординат опредѣляютъ соотвѣтствующія значения при холостомъ ходѣ.



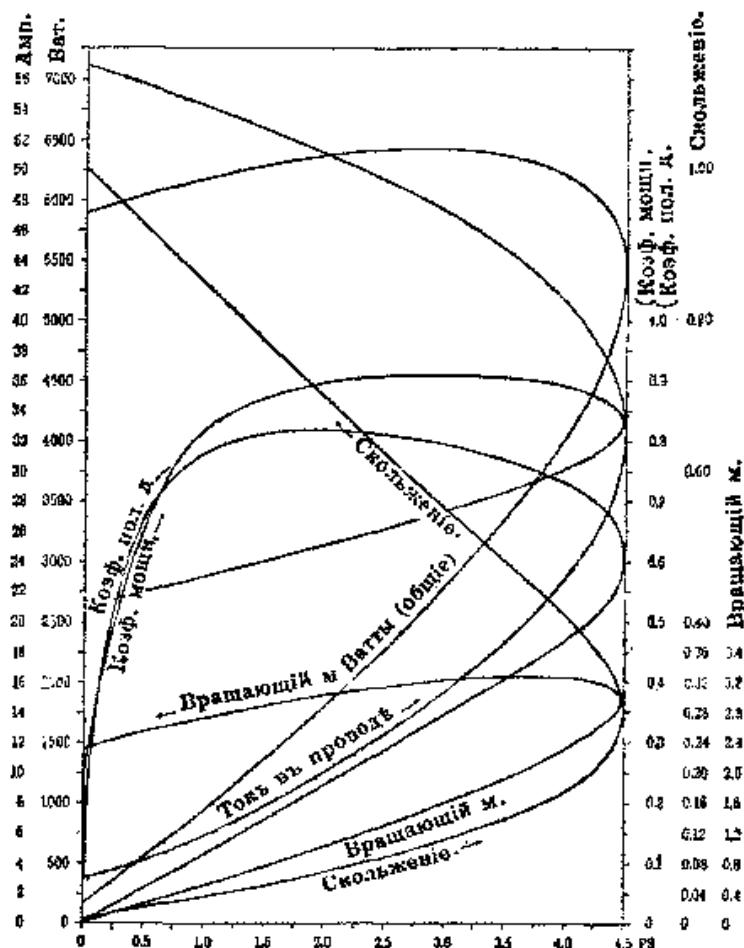
Работа тренія.

Фиг. 20. Характеристичная кривая 2-хъ сильнаго двигателя.

При этомъ коэффиц. полезн. дѣйствія равенъ нулю, въ то время какъ вращающій моментъ и скольжение равны нулю тамъ, где мощность отдаваемая роторомъ равна нулю. Сила тока J_1 и $\cos\varphi_1$ при этомъ не будутъ равны нулю.

На фиг. 21 представлены кривыя для того же двигателя, начиная отъ холостого хода до максимальной нагрузки въ 4,5 лош. силы, при которой все кривые имѣютъ точку перегиба. Если двигатель нагружать дальше, то его мощность уменьшается до нуля (при остановкѣ). При этомъ скольжение и токъ возрастаютъ до наибольшихъ возможныхъ при дан-

номъ напряженій, величинъ. Вращающій же моментъ раететь только до величины 3,25 кггр.-мтр., которой онъ достигаетъ при мощности въ 3,6 лош. с. (на исходящей вѣтви), въ то время, какъ при нормальной мощности (2 лош. с. на воходящей вѣтви), онъ равенъ одному кггр.-метру. Съ величины 3,25 кггр.-мтр. моментъ падаетъ до 2,3 кггр.-мтр. при остановкѣ (началь-



Фиг. 21. Характеристичныя кривыя 2-хъ сильнаго двигателя.

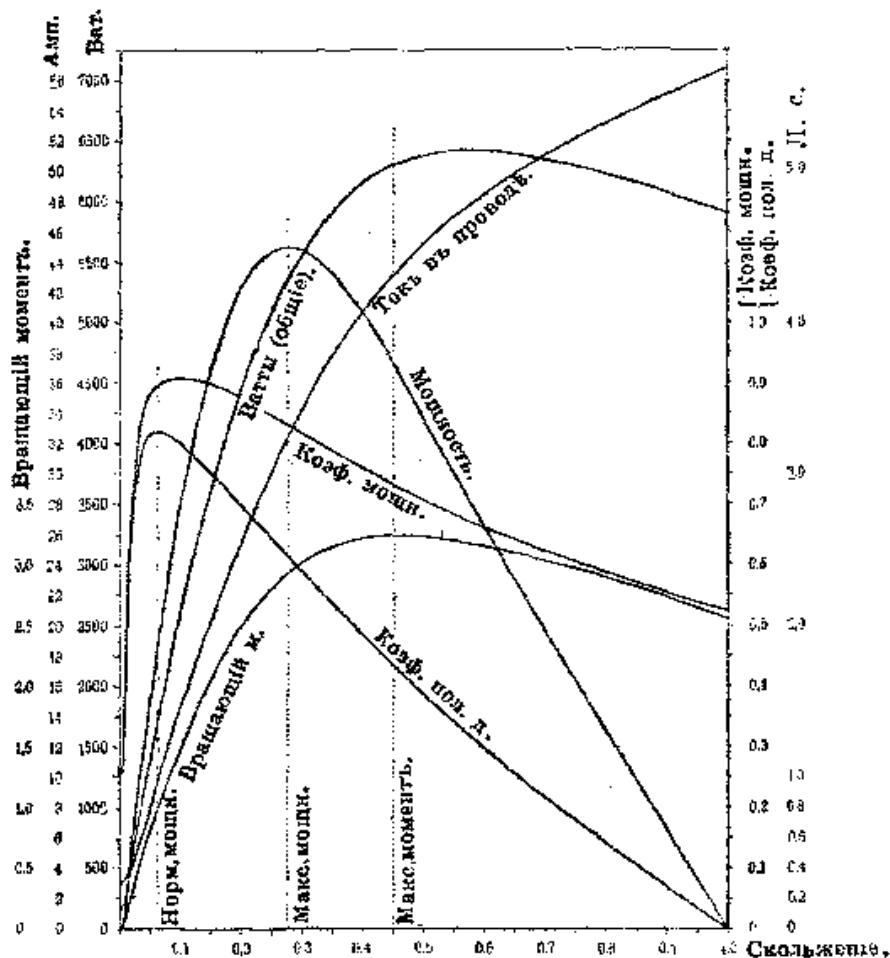
ный моментъ). Такимъ образомъ максимальная мощность пре-
восходитъ нормальную величину въ 2,25 раза, а максималь-
ный вращающій моментъ — въ 3,25 раза.

Коэффицієнтъ мощности σ_1 достигаетъ максимума уже
при мощности въ 2,7 лош. с., а коэффицієнтъ полезнаго дѣй-
ствія — при 1,9 лош. силы.

Фиг. 22 представляетъ кривыя зависимости тѣхъ же вели-
чинъ отъ скольженія, или, что тоже, отъ числа оборотовъ.

Нормальной мощностью въ данномъ примѣрѣ яв-
ляется та, при которой двигатель можетъ работать продолжи-

тельное время безъ чрезмѣрного нагреванія и за которой онъ допускаетъ извѣстную перегрузку, не останавливаясь. Обычно предѣль перегрузки опредѣляется нагреваніемъ. Если же



Фиг. 22. Характеристическая кривая 2-хъ сильнаго двигателя.

двигатель достигаетъ наибольшаго вращающаго момента раньше предѣла допускаемаго нагреванія, то перегрузка опредѣляется этимъ моментомъ, такъ какъ въ противномъ случаѣ двигатель работалъ бы даже при незначительной перегрузкѣ на нисходящей вѣтви кривой момента и остановился бы.

13. Роторъ съ коротко-замкнутой обмоткой.

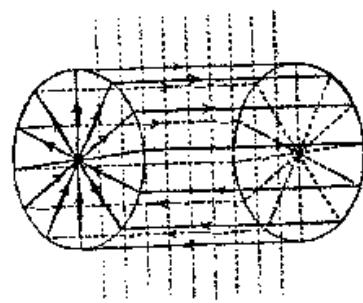
Осуществленіе обмотки по фиг. 13 было нецѣлесообразно, такъ какъ при ней не вся поверхность цилиндра была бы исполь-

ована. Проще всего было бы покрыть поверхность ротора сплошной мѣдной оболочкой. Но такимъ образомъ получится бы значительный зазоръ между желѣзомъ ротора и желѣзомъ статора.

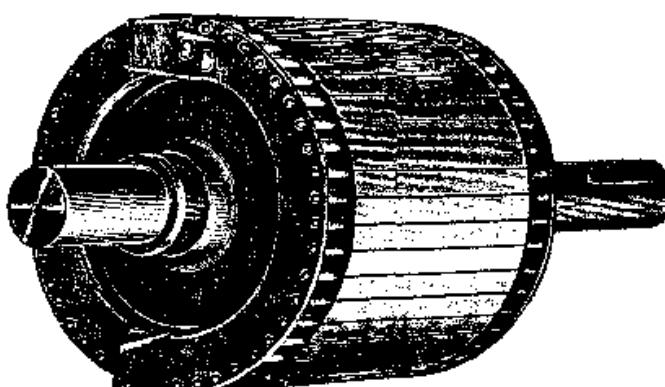
Для проведенія потока черезъ это пространство потребовалось бы большое число ампервитковъ. Въ виду этого величину междужелѣзного пространства дѣлаютъ, исходя изъ условій правильной работы и рационального изготошенія, а проводники укладываютъ въ каналахъ.

Чтобы эл.-дв. силы, индуцируемыя въ проводникахъ складывались, необходимо проводники, лежащіе подъ различными полюсами, включить послѣдовательно. Подобное соединеніе проводниковъ обмотки показано схематически на фиг. 23. Помѣстивъ этотъ роторъ въ поле двухполюснаго статора, изображенное центраторомъ, получимъ въ одной половинѣ ротора токи одного направленія, въ другой—противоположнаго. Наибольшая эл.-дв. сила будетъ въ проводникахъ, перерѣзывающихъ максимальное число линій, и сила тока въ каждомъ контурѣ опредѣляется ур. (23), при чмъ E_2 —эл.-дв. сила, индуцируемая въ обѣихъ сторонахъ витка общимъ полемъ.

Ясно, что распределеніе токовъ не измѣнится, если соединить провода въ точкѣ ихъ пересѣченія или присоединить ихъ на лобовыхъ поверхностяхъ къ кольцамъ изъ хорошо проводящаго металла. Такимъ образомъ получается обмотка на подобіе бѣльчьяго колеса (фиг. 24)¹⁾. Распределеніе токовъ



Фиг. 23.

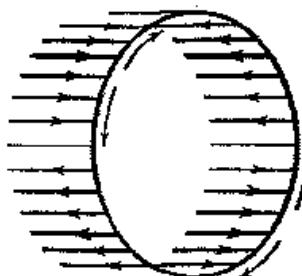


Фиг. 24.

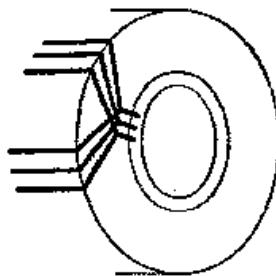
¹⁾ Два крыла, прикрепленныхъ къ кольцамъ, замыкающимъ обмотку на короткое, служатъ для лучшей вентиляціи двигателя, которая безъ того была бы недостаточной.

въ короткозамкнутомъ роторѣ четырехполюснаго двигателя показано на фиг. 25.

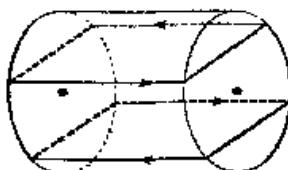
Въ двигателяхъ большой мощности подобныя обмотки не применяются, такъ какъ отдача теплоты кольцами недостаточна,



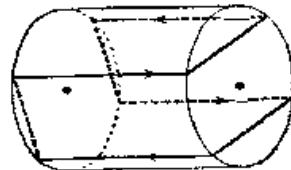
Фиг. 25.



Фиг. 26.



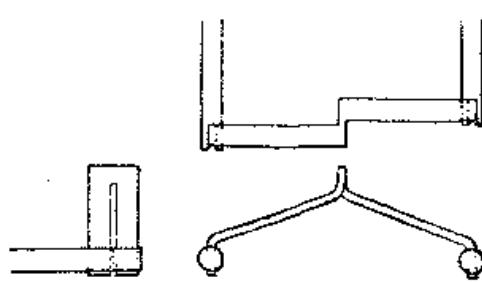
Фиг. 27.



Фиг. 28.

вследствіе ихъ относительно малой поверхности. Поэтому предпочтается соединять посредствомъ вилокъ оди въ или нѣсколько витковъ, образуя такимъ образомъ замкнутые витки. Для четырехполюснаго двигателя такія соединенія могутъ производиться по схемѣ фиг. 27 или 28. Послѣдняя называется коротко-замкнутой обѣгающей обмоткой. Фиг. 26 показываетъ схематически соединенія вилками (соответственно фиг. 27). Вилка изготавливается обычно изъ одной полосы, разрѣзанной вдоль по серединѣ, причемъ концы отгибаются въ разные стороны и припаиваются къ двумъ соединяемымъ стержнямъ (фиг. 29).

Какъ видно изъ чертежа, одинъ изъ соединяемыхъ стержней долженъ быть длиннѣе другого на половину ширины вилки. Длинные и короткіе стержни или чередуются (фиг. 61) или расположены группами (фиг. 57).



Фиг. 29.

Короткозамкнутая обмотка можетъ быть получена и изъ любой изъ описанныхъ въ дальнѣйшемъ фазныхъ обмотокъ, если начала и концы всѣхъ фазъ соединить между собою.

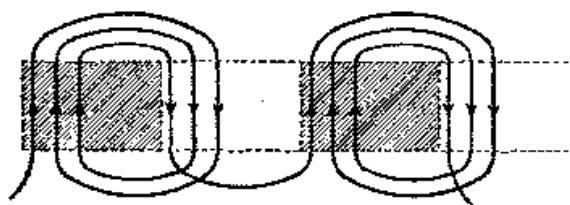
14. Важнѣйшіе роды обмотокъ статоровъ и роторовъ съ кольцами.

При теоретическомъ изученіи асинхронного двигателя мы предполагали наличность однороднаго поля, вращающагося съ равномѣрной угловой скоростью. Изъ главы 10 мы знаемъ, какъ важно это условіе при пускѣ двигателя въ ходъ. Такъ какъ вращающееся поле является результирующимъ полемъ статора и ротора, то поле ротора въ свою очередь должно быть однороднымъ. Легче всего это условіе выполняется въ обмоткѣ на подобіе бѣличьяго колеса. Если же примѣняется пусковой реостатъ, и обмотка ротора подведена къ кольцамъ, то однородности вращающагося поля достигаютъ, устранивъ обмотку ротора совершенно такъ же, какъ и статора. Поэтому все фазныя обмотки примѣнимы, какъ для статора, такъ и для ротора. Различие же опредѣляется исключительно соотношеніемъ въ нихъ напряженій. Послѣднее опредѣляется для статора тѣмъ рабочимъ напряженіемъ, для котораго онъ предназначень, между тѣмъ какъ въ роторѣ напряженіе должно удовлетворять лишь условію, чтобы число амперъ-витковъ соответствовало заданной мощности. Но напряженіе въ роторѣ не едѣдуетъ съ одной стороны выбирать очень высокимъ въ цѣляхъ экономіи на изоляцію и безопасности обслуживания, съ другой стороны—не слишкомъ низкимъ, для избѣжанія искренія щетокъ, вслѣдствіе большого тока и большихъ съченій мѣди.

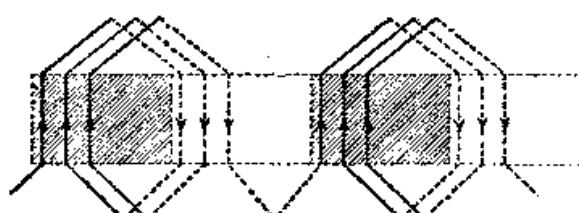
Какъ мы видѣли уже на фиг. 6—13 каждому полюсу соответствуетъ одинаковое число рядомъ лежащихъ проводниковъ отъ всѣхъ фазъ, въ которыхъ токи въ каждый моментъ имѣютъ одинаковое направленіе. Если, напр., на фазу и полюсъ приходится три катушки, причемъ каждая лежитъ въ отдѣльномъ каналѣ, то на каждый полюсъ двухфазнаго двигателя приходится 6 впадинъ, трехфазнаго—девять. Если представить себѣ статоръ четырехполюснаго двигателя развернутымъ на плоскость, то получимъ фиг. 30—34, где заштрихованные площади изображаютъ положеніе полюсовъ въ опредѣленный моментъ, а направленіе токовъ показано стрѣлками. Существуетъ только два способа соединенія проводниковъ одной фазы, лежащихъ подъ парой соседнихъ полюсовъ, именно, какъ на фиг. 30 и 31, причемъ получается такъ называемая пятиеобразная обмотка или какъ на фиг. 32—34, причемъ получается—волнообразная обмотка. На фиг. 30 и 32 соединеніе проводниковъ произведено при помощи концентрическихъ дугъ, а на фиг. 31, 33¹⁾

¹⁾ Больше короткіе стержни какъ и ихъ соединенія на этой и всѣхъ послѣдующихъ фигурахъ изображены пунктиромъ, больше длинные и ихъ соединенія изображены сплошными линіями. Это сдѣлано для того, чтобы видѣть перекрещиваются ли двѣ вѣтвейшихъ или же внутреннихъ ножки. На практикѣ выполнить такую обмотку было бы не возможно.

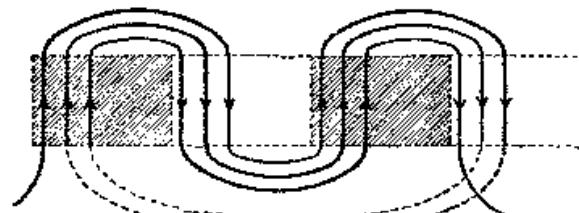
Фиг. 30.



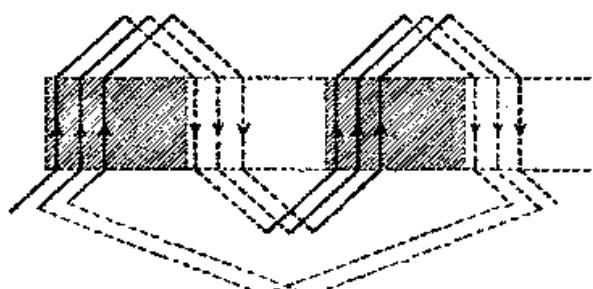
Фиг. 31.



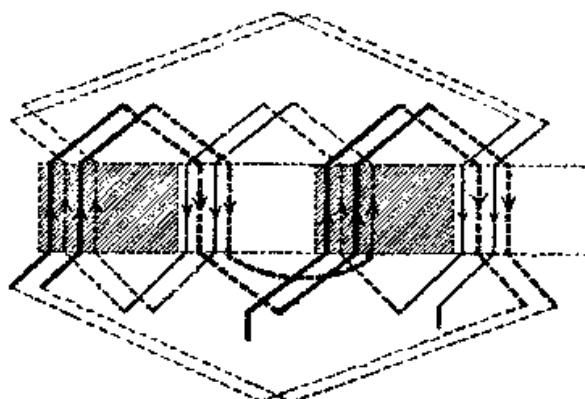
Фиг. 32.



Фиг. 33.



Фиг. 34.



и 34—перекрещивающимися проводниками, въ качествѣ которыхъ часто примѣняются вилки по фиг. 29. Итакъ, мы будемъ различать 4 рода обмотокъ:

1. Петлеобразная обмотка съ соединеніями дугами.

2. Петлеобразная обмотка съ перекрещивающими соединеніями.

3. Волнообразная обмотка съ соединеніями дугами.

4. Волнообразная обмотка съ перекрещивающими соединеніями.

На фиг. 32—34 обмотка идетъ постоянно въ одномъ направлениі. На фиг. 34 обмотка проходитъ всѣ полюса дважды въ одномъ направлениі (жирныя линіи), затѣмъ—въ противоположномъ (тонкія линіи). Слѣдовательно волнообразные обмотки распадаются на прямые и на возвратные.

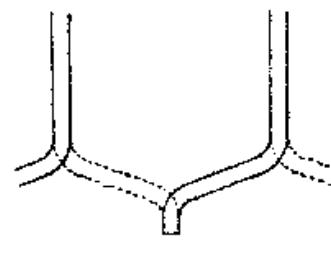
Дальнѣйшее отличіе этихъ послѣдніхъ заключается въ томъ, что два послѣдовательныхъ шага обмотки неодинаковы и различаются на два. На фиг. 34 и 59 шаги 10 и 8, а на фиг. 60—14 и 12. Далѣе, обмотка, пройдя одинъ разъ всѣ полюса, подходитъ къ проводнику, лежащему не рядомъ съ первымъ (второму проводнику), какъ на фиг. 32 и 33, а къ третьему проводнику. Во второй проводникъ она попадаетъ лишь послѣ перемѣны направленія хода. Этимъ достигается болѣе равномѣрное распределеніе перекрещиваній, чѣмъ при прямой волнообразной обмоткѣ.

Соединеніе вилкой производится такъ, что виѣшняя ножка ея спаивается съ болѣе длиннымъ стержнемъ, а внутренняя съ болѣе короткимъ стержнемъ (фиг. 29).

Неравенство шаговъ при возвратныхъ волнообразныхъ обмоткахъ вызываетъ чередование длинныхъ и короткихъ стержней (фиг. 61).

При прямыхъ же волнообразныхъ обмоткахъ (фиг. 33) и при обмоткахъ петлеобразныхъ съ вилками (фиг. 31) длинные и короткие стержни расположены групшами (фиг. 57 и 58).

Возвратная волнообразная обмотка можетъ выполняться еще въ видѣ такъ называемой бочковидной обмотки съ двумя стержнями въ каналѣ. Вместо соединительныхъ вилокъ и различной длины стержней здѣсь требуются лишь нѣсколько болѣе длинные, но одинаковые стержни, и концы верхняго и нижняго стержней отгибаются и спаиваются (фиг. 35). На фиг. 62 изображенъ роторъ съ такой обмоткой. На схемахъ обмотокъ (фиг. 34, 59 и 60) пунктирныя линіи изображаютъ проводники, лежащіе снизу, а сплошные—лежашіе сверху. Такая обмотка имѣть передъ обмоткой съ вилками то преимущество, что не нужно изготавлять отдельныхъ частей (вилокъ), и число спаевъ уменьшено вдвое. Примѣненія профиля-



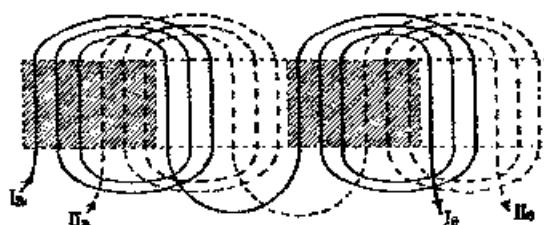
Фиг. 35.

рованные стержни, какъ, наприм., на фиг. 36, получаемъ такое же использование мѣста, какъ въ обмоткахъ съ вилками съ однѣмъ стержнемъ въ каналѣ, въ то время какъ число каналовъ въ два раза менѣше. Такого рода обмотка является, такимъ образомъ, наилучшей для двигателей средней мощности.

Для двигателей меньшей мощности съ обмоткой изъ тонкой проволоки, наиболѣе удобной, какъ для статора, такъ и для ротора, является петлеобразная обмотка съ соединеніемъ дугами, при этомъ въ каналѣ можетъ быть любое число проволокъ. При петлеобразной обмоткѣ съ перекрещивающимися соединеніями (фиг. 31) головки катушекъ заняли бы больше мѣста.

Волнообразныя обмотки примѣняются лишь для низкихъ напряженій, гдѣ въ каналѣ укладывается не больше двухъ проводниковъ. При высокомъ напряженіи стержней въ каналѣ должно быть болѣе двухъ, чтобы не увеличивать слишкомъ числа каналовъ, а следовательно при волнообразной обмоткѣ для заполненія одного и того же канала пришлось бы обойти нѣсколько разъ вокругъ, и разности потенциаловъ между проводниками, лежащими въ одномъ и томъ же каналѣ, получились бы большими. Для роторовъ болѣшихъ двигателей наиболѣе пригодной является прямая волнообразная обмотка съ соединеніями дугами (фиг. 32 и 33). Единственнымъ недостаткомъ ея является необходимость изготавленія дугъ различной величины.

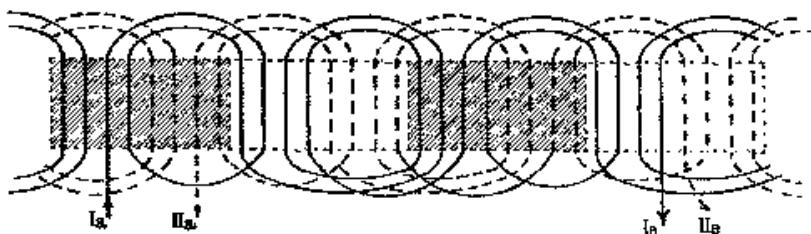
Рассмотримъ теперь устройство двухфазныхъ и трехфазныхъ обмотокъ. При двухфазной обмоткѣ токи сдвинуты во времени другъ относительно друга на $\frac{1}{4}$ периода (90°), поэтому обмотки должны быть сдвинуты въ пространствѣ другъ относительно друга на $\frac{1}{4}$ двойного полюснаго дѣленія, какъ было показано на фиг. 3 и 9. Исходя изъ этого и изъ того соображенія, что токи въ проводникахъ одного полюса должны имѣть одинаковыя направленія, получимъ



Фиг. 37. Петлеобразная обмотка съ соединеніями дугами.

двухфазную петлеобразную обмотку (съ дугами, фиг. 37), если наложимъ двѣ такихъ обмотки, какъ на фиг. 30, съ относительнымъ сдвигомъ на $\frac{1}{2}$ полюснаго дѣленія. При четырехъ и вообще четномъ числѣ каналовъ на полюсъ и фазу

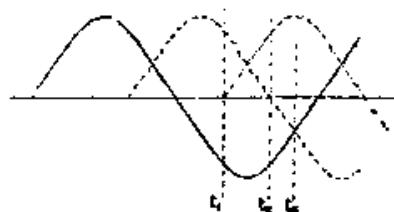
катушки одного полюса и одной и той же фазы могутъ навиваться въ противоположныхъ направленихъ (фиг. 38).



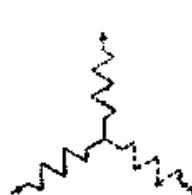
Фиг. 38. Петлеобразная обмотка съ соединеніями дугами.

При трехфазной системѣ токи сдвинуты другъ относительно друга на $\frac{1}{3}$ периода (120°), слѣдовательно обмотки отдельныхъ фазъ должны быть сдвинуты другъ относительно друга въ пространствѣ на $\frac{1}{3}$ двойного полюснаго дѣленія, какъ показано на фиг. 7, 8, 10.

Изъ фиг. 39 елѣдуетъ, что въ моменты, когда ни одинъ изъ фазныхъ токовъ не равенъ нулю (какъ, напр., въ моменты t_1 и t_2), два изъ нихъ имѣютъ одинаковое, а третій противоположное направленіе, какъ, напр., въ моментъ t_3 . Принимая во вниманіе это обстоятельство и тотъ фактъ, что токи въ проводникахъ подъ однимъ полюсомъ должны имѣть одно направленіе мы можемъ убѣдиться, что трехфазная петлеобразная обмотка (съ дугами) получается, если наложить 3 отдельныхъ обмотки по типу фиг. 30 съ относительнымъ сдвигомъ на $\frac{1}{3}$ двойного полюснаго дѣленія (фиг. 42).



Фиг. 39.



Фиг. 40.

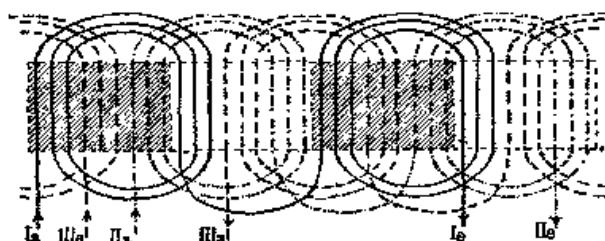


Фиг. 41.

Какъ видно изъ этой схемы, начала обмотокъ сдвинуты на $\frac{1}{3}$ двойного полюснаго дѣленія, причемъ въ первыхъ направленіе токовъ одинаковое, а въ третьей обратное, тѣмъ не менѣе направленіе токовъ въ проводникахъ одного полюса одно и то же.

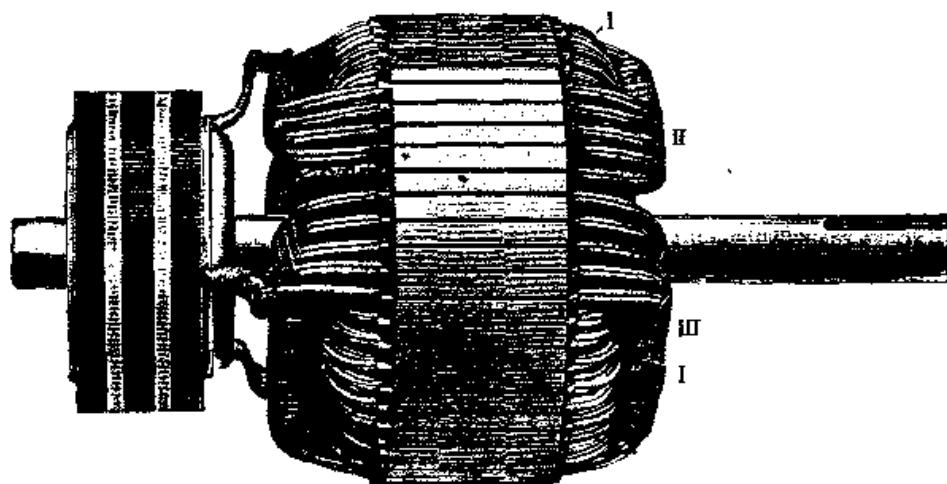
Включение звездой (фиг. 40) получается соединеніемъ между собой или трехъ началъ, или трехъ концовъ обмотки. Включение треугольникомъ (фиг. 41) получается присоединеніемъ концовъ обмотки каждой фазы къ началу об-

мотки слѣдующей фазы. При осуществлениі обмотки слѣдуетъ принимать во вниманіе расположение головокъ катушекъ.



Фиг. 42. Петлеобразная обмотка съ соединеніем дугами.

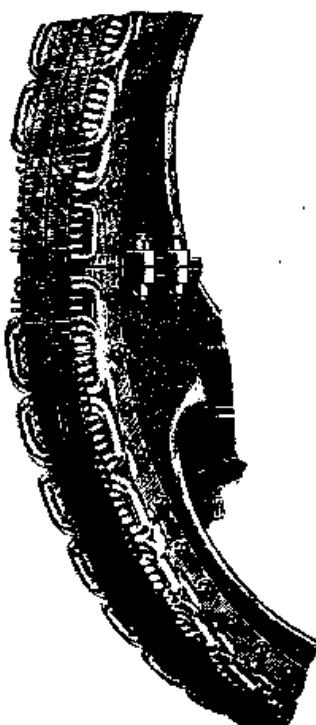
При обмоткахъ этого рода онъ большею частью лежать по очереди другъ надъ другомъ. Вслѣдствіе этого при двухфазной обмоткѣ головки всѣхъ катушекъ одной фазы лежать внизу, а—другой наверху, тогда какъ при трехфазной обмоткѣ онъ лежать сверху и снизу, чередуясь.



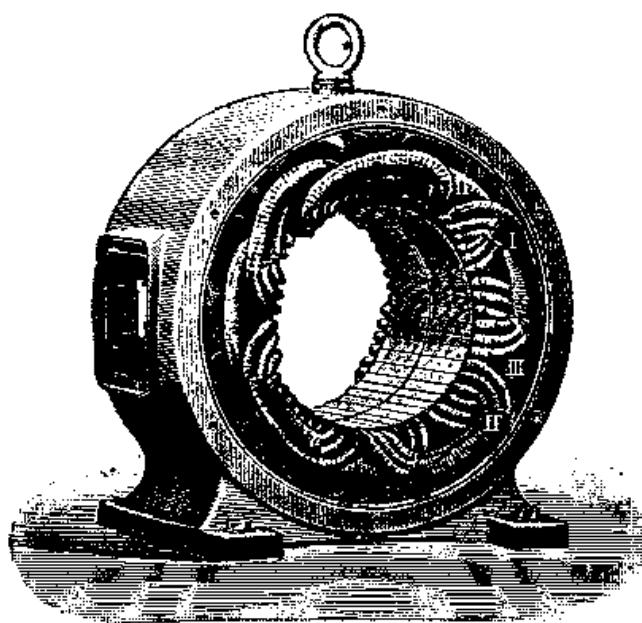
Фиг. 43. Роторъ съ петлеобразной обмоткой.

Фиг. 43—45 и 47 показываютъ практическое осуществление такихъ обмотокъ. При шести полюсахъ и вообще при нечетномъ числѣ паръ полюсовъ обмотка получается несимметрична, какъ это показано схематически на фиг. 46. Здѣсь въ одномъ мѣстѣ (A) встрѣчаются двѣ катушки, которыхъ обѣ должны лежать наверху. Для размѣщенія ихъ необходимо одну изъ нихъ соответственнымъ образомъ изогнуть. Фиг. 45 показываетъ дѣйствительное осуществление изогнутой катушки (наверху налѣво). При высокомъ напряженіи въ каналы вкладываются мikanитовыя трубки, черезъ которыхъ обмотка про-

тягивается. Въ нѣкоторыхъ мѣстахъ разность потенціаловъ между сосѣдними катушками различныхъ фазъ равна полному линейному напряженю. Наименьшее разстояніе междусосѣдними катушками имѣется въ мѣстѣ выхода ихъ изъ трубокъ каналовъ, поэтому слѣдуетъ трубки для катушекъ, лежащихъ снаружи, брать болѣе длинными, а между головками катушекъ различныхъ фазъ прокладывать изолирующія прослойки, какъ напр. показано на фиг. 47 (Сименсъ - Шукжерть). Всеобщая



Фиг. 44.



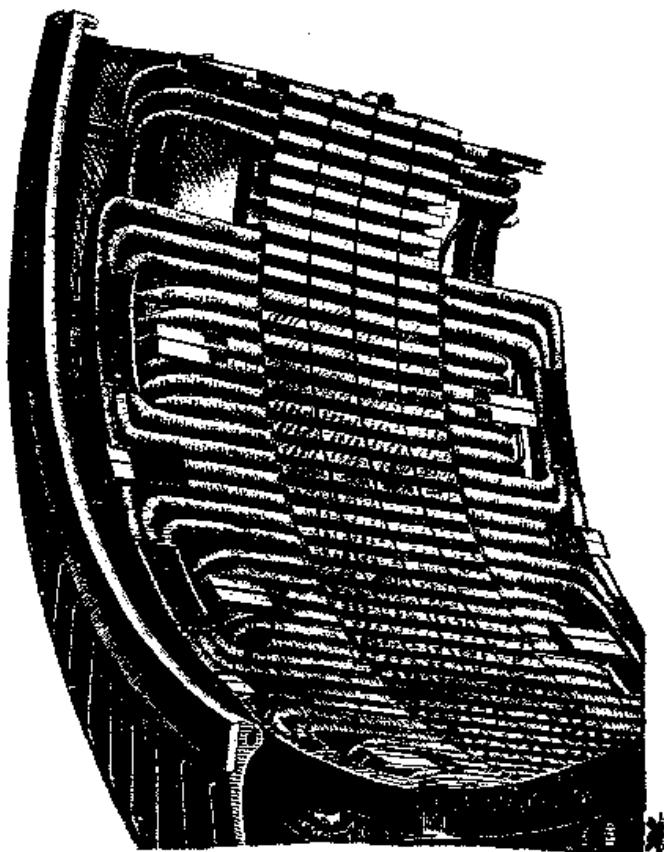
Фиг. 45.

Петлеобразные обмотки статора (Вс. Комп. Эл.).

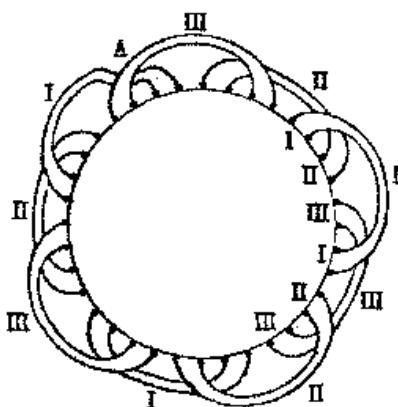
Компания Электричества примѣняетъ при высокихъ напряженіяхъ чешуйчатое расположение головокъ, какъ на фиг. 48 показано схематически, а на фиг. 49 въ дѣйствительности. Одна сторона каждой головки лежитъ вверху, другая внизу. Верхняя часть имѣть болѣе длинныя трубки, чѣмъ нижняя, и нигдѣ нѣтъ рядомъ трубокъ одинаковой длины. Фиг. 48 показываетъ, что при чешуйчатомъ расположеніи катушекъ, обмотка остается вполнѣ симметричной и при нечетномъ числѣ паръ полюсовъ. По этой причинѣ такая обмотка и примѣняется часто. На фиг. 50 приведена подобная обмотка съ однимъ стержнемъ въ каналѣ.

Петлеобразные обмотки съ перекрещивающимися соединеніями выполняются только при помощи вилокъ. Фиг. 51 показываетъ схему подобной трехфазной обмотки. Соединенные съ нижними ножками вилокъ болѣе короткіе стержни

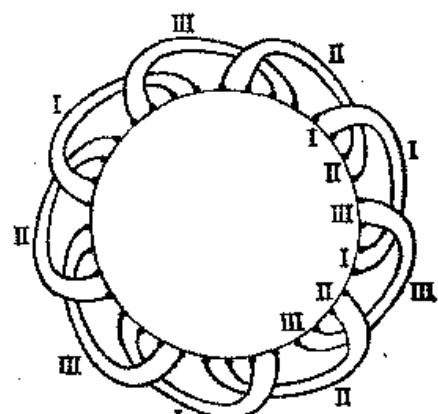
(показаны пунктромъ) группами чередуются съ длинными стержнями, соединенными съ верхними ножками вилокъ.



Фиг. 47. Петлевообразная обмотка (Сименсъ-Шуккертъ).



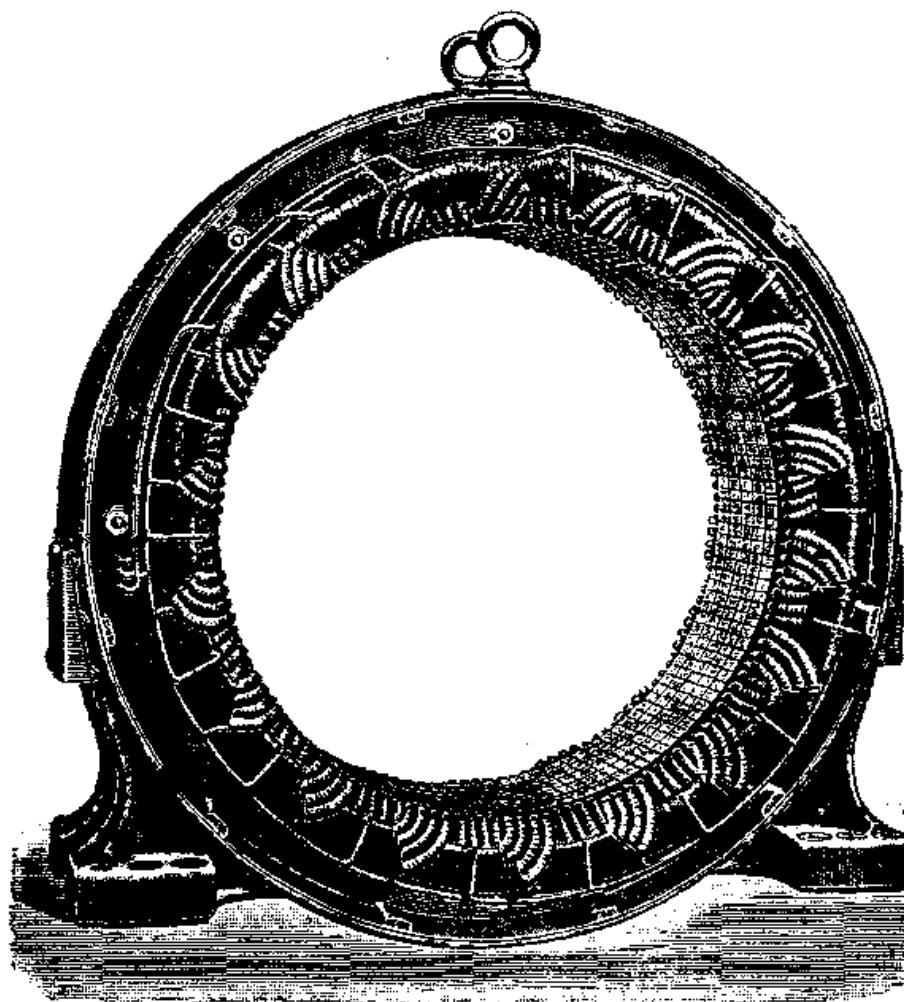
Фиг. 46.



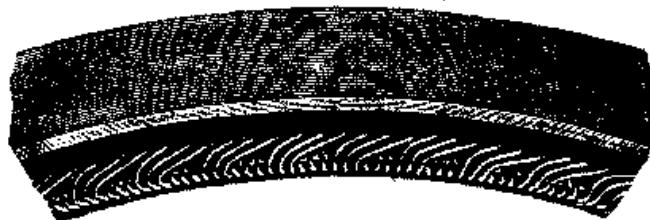
Фиг. 48.

Фиг. 52 даетъ двухфазную, фиг. 53 трехфазную прямую волннообразную обмотку съ дугами, соответственно схемѣ фиг. 82. Относительно расположения головокъ катушекъ

адѣсь можно сказать то же самое, что и для петлеобразныхъ обмотокъ съ дугами. Волнообразная обмотка удобнѣе

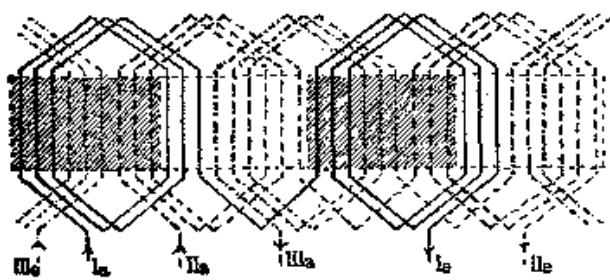


Фиг. 49. Чешуйчатая петлеобразная обмотка (Вс. Комп. Эл.).

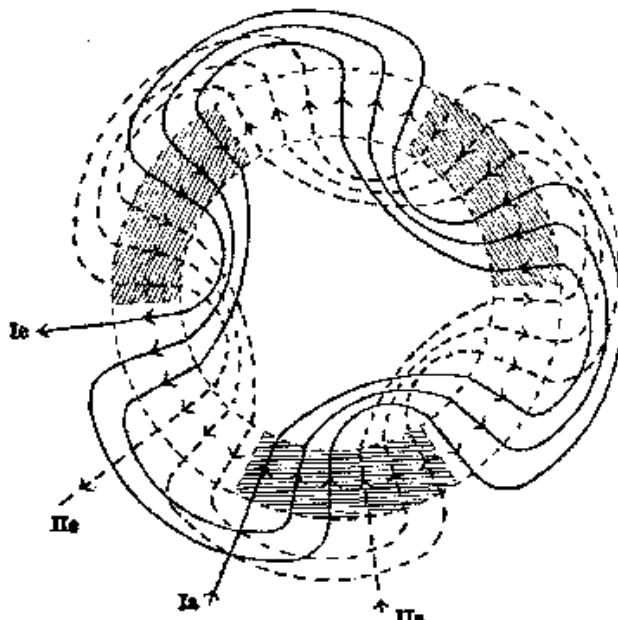


Фиг. 50. Чешуйчатая петлеобразная обмотка (Памейеръ).

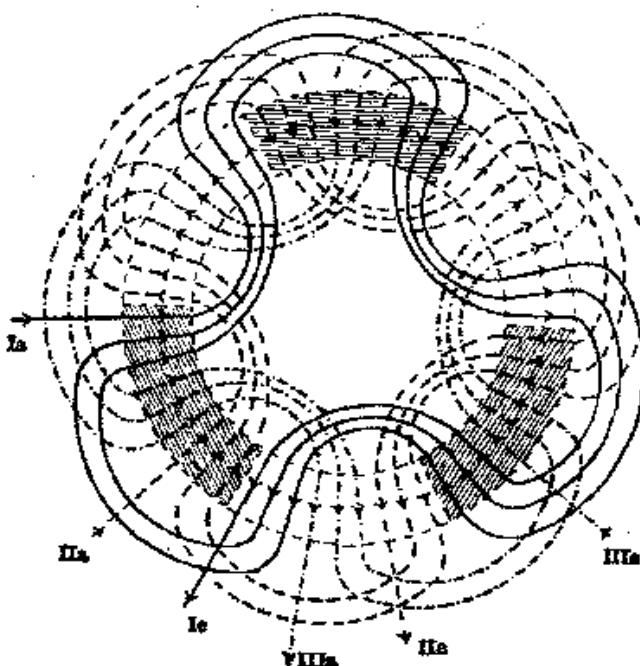
петлеобразной для случаевъ, когда въ каналѣ помѣщается по одному стержню (фиг. 54).



Фиг. 51. Петлеобразная обмотка съ вилками.

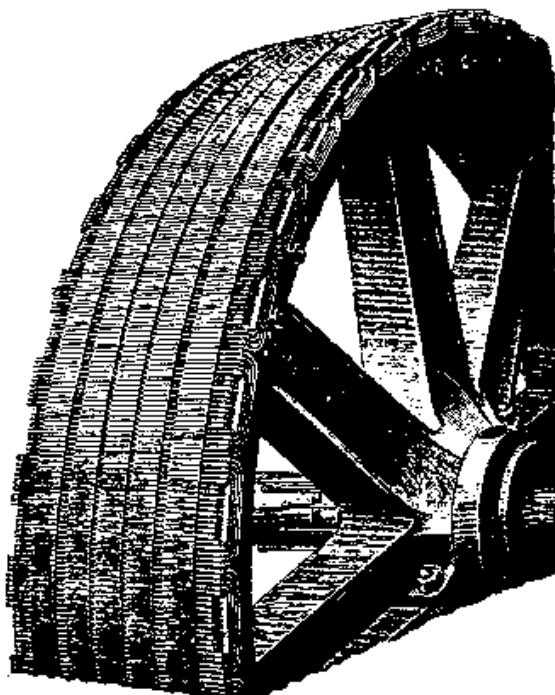


Фиг. 52 Прямая волнообразная обмотка съ дугами.



Фиг. 53. Прямая волнообразная обмотка съ дугами.

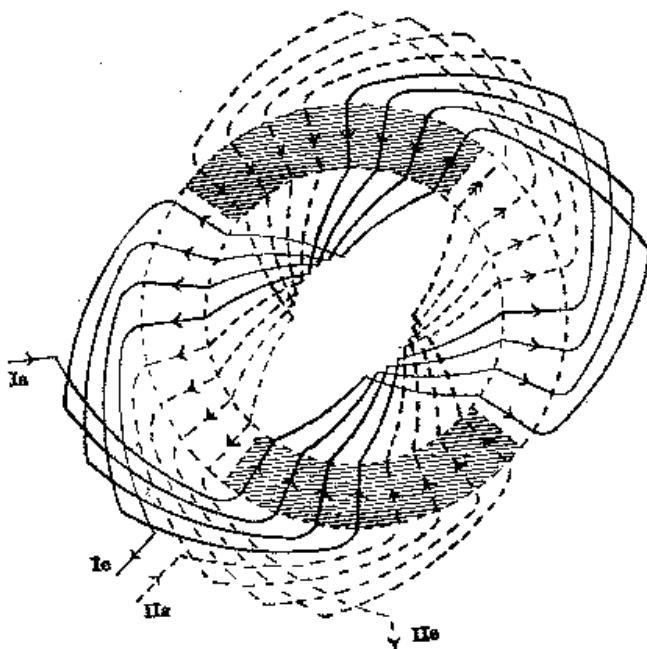
Фиг. 55 представляетъ двухфазную, а фиг. 56 трехфазную прямую волнообразную обмотку съ соединеніями вилками, соответственно схемѣ фиг. 33. Какъ видно, трехфазная обмотка болѣе равномѣрна, чѣмъ двухфазная. Фиг. 57 и 58 показываютъ дѣйствительное выполнение первой изъ нихъ. Фиг. 59 представляетъ двухфазную, а фиг. 60 трехфазную возвратную волнообразную обмотку съ перекрещивающими соединеніями, соответственно схемѣ фиг. 34. Нижнія соединительныя части обозначены пунктирными линіями.



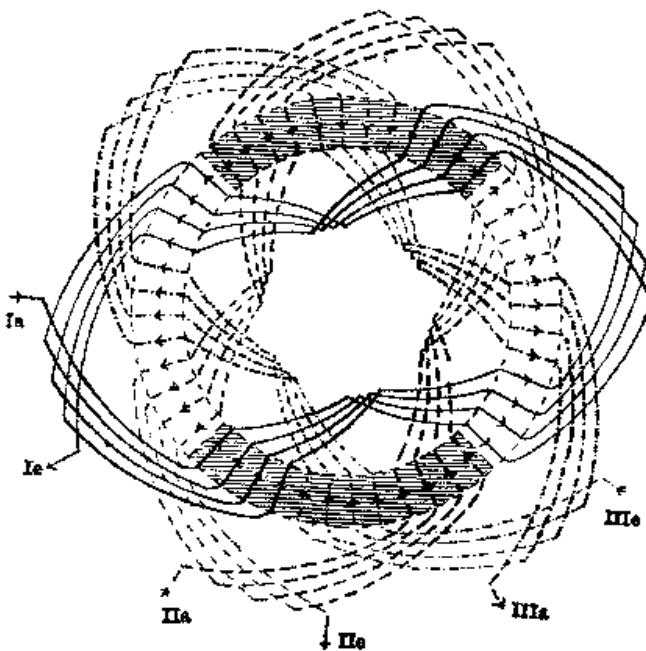
Фиг. 54. Волнообразная обмотка съ дугами (Вс. Комп. Эл.).

Фиг. 61 показываетъ дѣйствительное выполнение этой обмотки съ соединеніями вилками (въ статорѣ и роторѣ). На фиг. 62 показанъ роторъ съ бочковидной волнообразной возвратной обмоткой. Въ трехфазныхъ обмоткахъ съ перекрещивающимися соединительными частями несимметрии въ выполнении не бываетъ и при нечетномъ числѣ паръ полюсовъ, а потому такія обмотки могутъ примѣняться для двигателей съ любымъ числомъ полюсовъ. Изъ обмотки фиг. 59 или 60 легко получить шестиполюсную обмотку, разрѣзавъ ее въ Δ и вставивъ сюда еще часть, подобную той, что лежитъ между B и C . Изъ этой обмотки можно просто получить другую съ шестью или болѣе стержнями на полюсъ и фазу. Придется лишь обойти въ прямомъ и обратномъ направленіяхъ большее, чѣмъ два. число разъ.

Особый родъ обмотокъ представляютъ собой разрѣзаныя обмотки постояннаго тока. Какъ видно изъ фиг. 8, изъ кольцевой обмотки постояннаго тока можно полу-



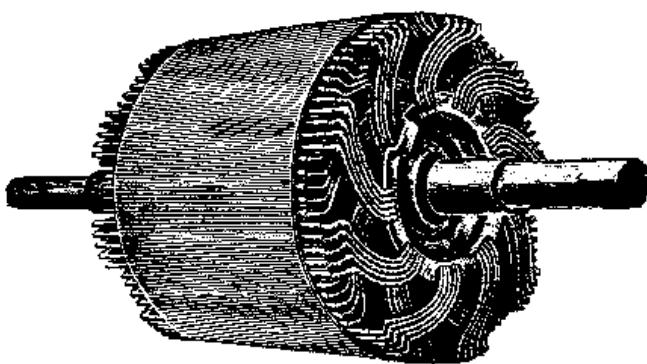
Фиг. 55 Прямая волнообразная обмотка съ вилками.



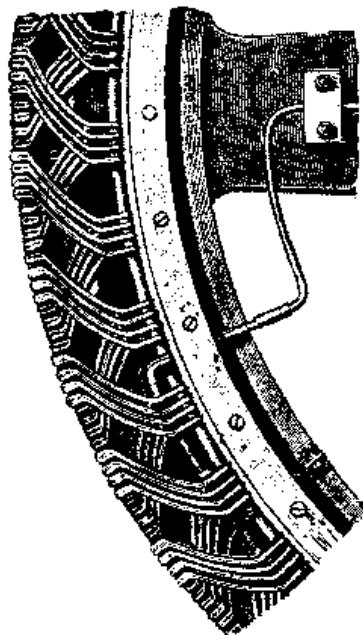
Фиг. 56. Прямая волнообразная обмотка съ вилками.

чить трехфазную обмотку съ соединеніемъ фазъ треугольникомъ, если взять отвѣтвленія отъ трехъ равноотстоящихъ другъ

оть друга точекъ. Если же разрѣзать такую обмотку въ этиъ точкахъ, то можно получить соединеніе фазъ звѣздой. Фиг. 7 показываетъ, какъ, разрѣзавъ кольцевую обмотку въ шести мѣстахъ, получить трехфазную обмотку, а—въ четырехъ — двухфазную обмотку. Замкнутую обмотку трехфазнаго тока можно получить и изъ большаго числа барабанныхъ обмотокъ постояннаго тока, взяты отвѣтвленія оть равноотстоящихъ точекъ, являющихся для постояннаго тока точками равнаго потенциала. Такія обмотки употребляются въ преобразователяхъ.



Фиг. 57. Прямая волнообразная обмотка съ вилками (Эрликонъ)

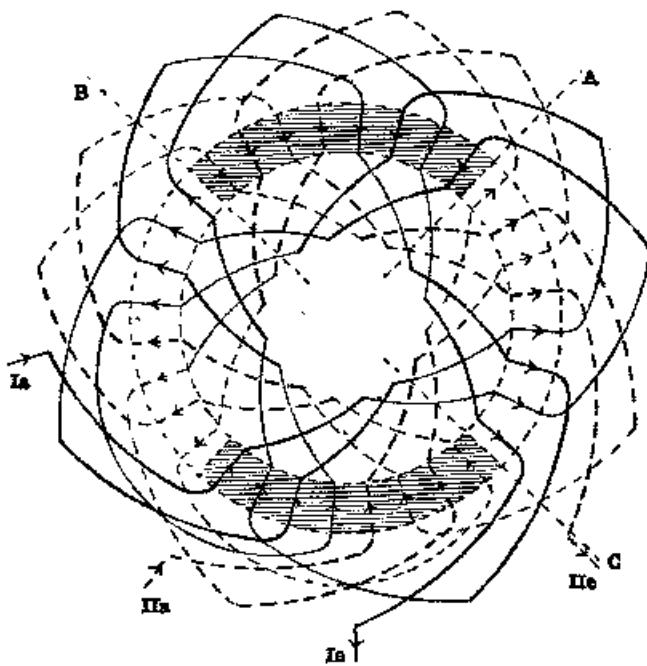


Фиг. 58. Прямая волнообразная обмотка съ вилками (Ламейеръ).

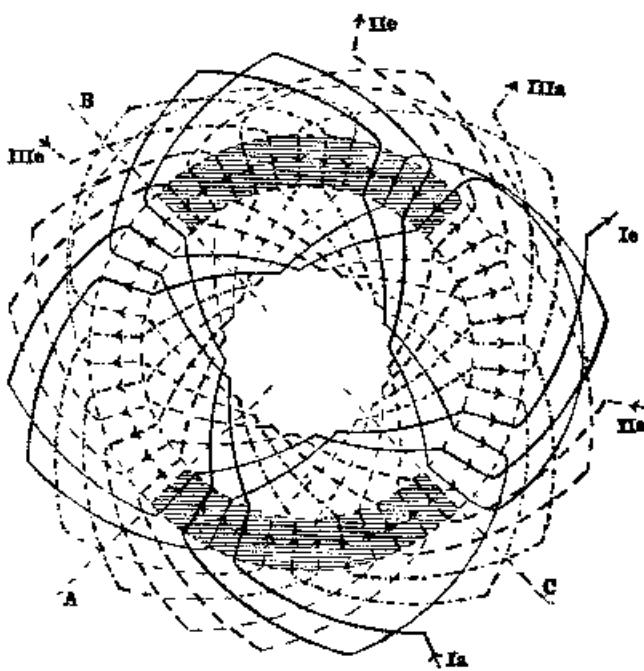
Здѣсь необходимо, чтобы общее число стержней было кратно числу фазъ и полюсовъ. Если это условіе не выполнено, то въ обмоткѣ возникаютъ внутренніе токи, а у краевъ полюсовъ получаются стержни съ токами различныхъ направленій, вслѣдствіе этого двигатель съ такой обмоткой будетъ давать меньшій врашающій моментъ, чѣмъ при данномъ числѣ стержней должно было бы быть.

Такія обмотки имѣли бы еще смыслъ въ примѣненіи къ роторамъ, такъ какъ, по главѣ 10, начальный врашающій моментъ бываетъ равномѣрный въ тѣхъ случаяхъ, когда число стержней обмотки ротора некратно числа полюсовъ. Для избѣженія же, упомянутыхъ выше, внутреннихъ токовъ, подобныя обмотки примѣняютъ лишь для соединенія фазъ звѣздой. Фиг. 63 изображаетъ такую обмотку для четырехъ полюсовъ и 46 стержней, такъ что на полюсъ приходится $11\frac{1}{2}$ стержней. Если въ каналѣ находится два стержня, то на полюсъ

приходится $\frac{5}{4}$ зубца. Обмотка разрѣзана въ трехъ мѣстахъ. На этомъ чертежѣ видны стержни, лежащіе у краевъ полюсовъ съ противоположнымъ направленіемъ токовъ. Меньшее



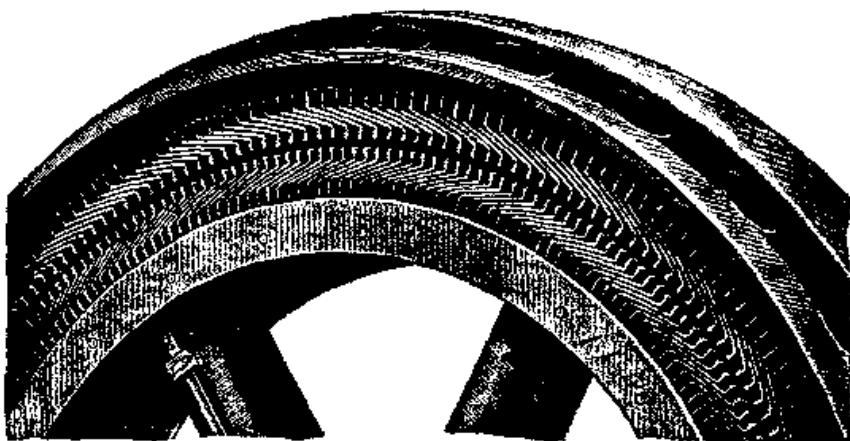
Фиг. 59. Возвратная волнообразная обмотка съ вилками:



Фиг. 60. Возвратная волнообразная обмотка съ вилками.

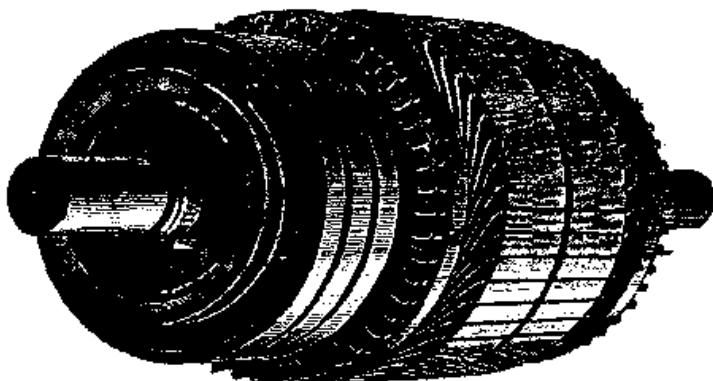
число такихъ стержней получается въ четырехполюсной обмоткѣ фиг. 64 съ 50 стержнями, которая разрѣзана въ шести

мѣстахъ. Первоначальную обмотку постояннаго тока можно узнать по чернымъ пунктирнымъ линіямъ. При разрѣзаніи образовалось 12 концовъ. Шесть изъ нихъ соединены не симметрично такъ, что изъ прямой обмотки постояннаго тока образовалась возвратная обмотка переменнаго тока. Другіе шесть концовъ служать началами и концами трехъ



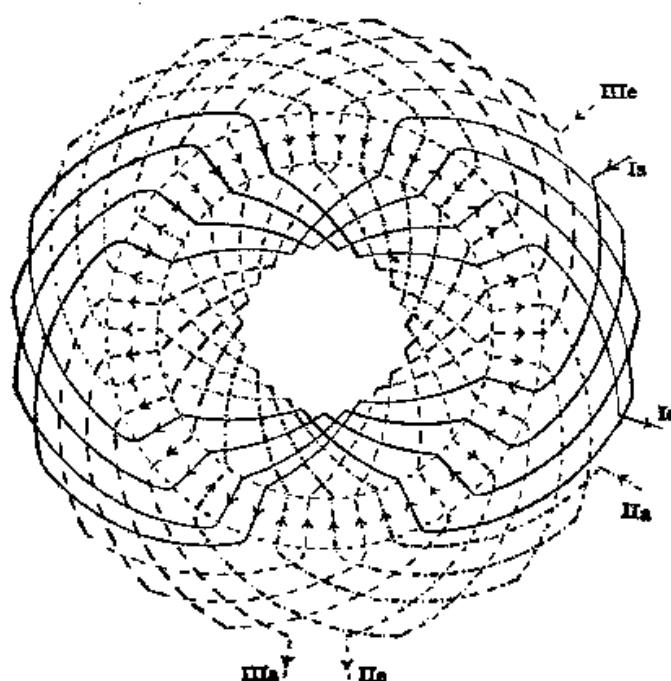
Фиг. 61. Возвратная волнообразная обмотка съ дугами (Сименсъ-Шуккертъ).

фазъ. Если разрѣзать эту обмотку въ точкѣ *A* и вставить сюда такую же часть обмотки, какая помѣщается между точками *B* и *C*, то получится шестиполюсная обмотка, и т. п. Подобные обмотки нормально примѣняются рѣдко.

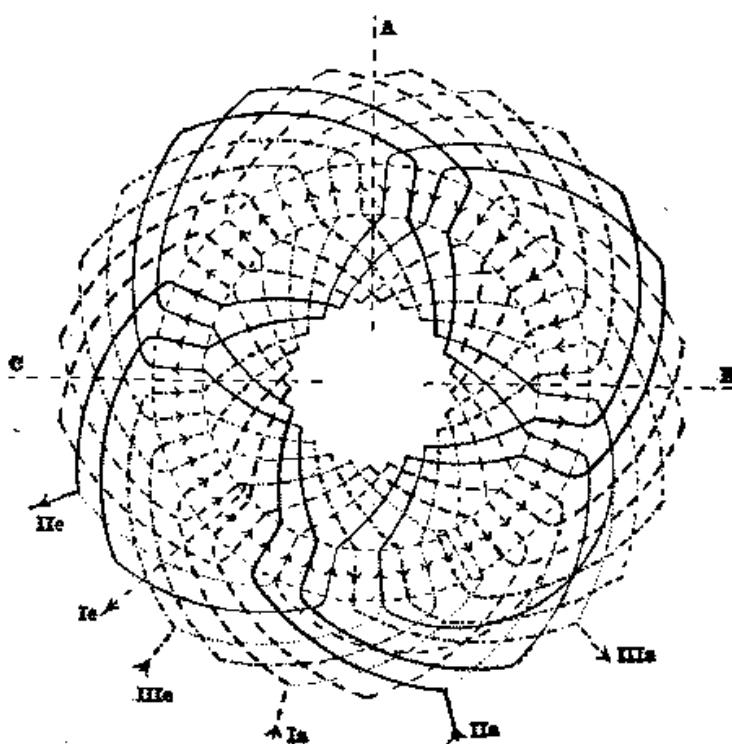


Фиг. 62. Возвратная полнообразная (бочковидная) обмотка (Вс. Комп. Эл.).

Въ большихъ двигателяхъ низкаго напряженія, гдѣ съченіе одного стержня недостаточно для фазнаго тока, наматываются для каждой пары полюсовъ самостоятельную обмотку и соединяютъ ихъ между собой параллельно. Стержней съ большими съченіями вообще избѣгаютъ изъза возникающихъ въ массахъ

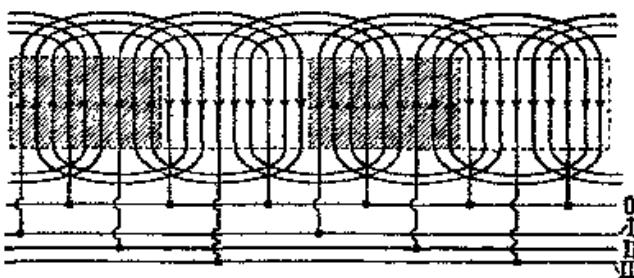


Фиг. 63. Обмотка постоянного тока разрѣзанная въ 3-хъ точкахъ.



Фиг. 64. Обмотка постоянного тока разрѣзанная въ 6-ти точкахъ.

ихъ токовъ Фуко. Фиг. 65 показываетъ параллельное соединение отдельныхъ петлеобразныхъ обмотокъ. При этомъ обмотка соответствующая парѣ полюсовъ, очевидно, должна быть рассчитана на полное напряженіе двигателя. Въ двигателяхъ съ большимъ числомъ полюсовъ можетъ быть, конечно, применено послѣдовательно - параллельное соединеніе группъ полю-



Фиг. 65.

совъ. Очень простое параллельное включеніе можно получить въ прямой волнообразной обмоткѣ съ дугами (фиг. 52) и (фиг. 53.). Нужно только разрѣзать обмотку на граничъ первого и послѣдняго полюса и соединить концы параллельно. Этимъ пользуются при большихъ двигателяхъ для избѣжанія высокихъ напряженій въ обмоткѣ ротора.

Круговые диаграммы.

15. Асинхронный двигатель какъ трансформаторъ.

Асинхронный двигатель при неподвижномъ роторѣ представляетъ ничто иное, какъ трансформаторъ, и именно, при разомкнутомъ роторѣ — ненагруженный, а при замкнутомъ на короткое — коротко-замкнутый трансформаторъ. Но и при любомъ режимѣ работы, т. е. при любомъ скольженіи, онъ несмотря на непостоянство числа периодовъ ротора, все же подобенъ трансформатору, работающему при безындукционной нагрузкѣ. Это будетъ ясно изъ слѣдующаго. Изъ уравненія (11) и (13) имеемъ

$$W_2 = m r_2 \beta_2 \frac{1-s}{s} \dots \dots \dots \quad (44)$$

Положивъ

$$s = \frac{r_1}{r_2 + r} \dots \dots \dots \quad (45)$$

получимъ

$$W_2 = m r J_2^2 \dots \dots \dots \quad (46)$$

То же имѣть мѣсто и для m -фазнаго трансформатора, работающаго на безъиндукціонное сопротивленіе r . При холостомъ ходѣ двигателя (пренебрегая трениемъ о воздухъ, трениемъ щетокъ о кольца и—въ подшипникахъ) скольженіе $s=0$. Этому соответствуетъ, изъ равенства (45), $r=\infty$. Это значить, что при холостомъ ходѣ, несмотря на замкнутую обмотку ротора, двигатель соответствуетъ трансформатору съ разомкнутой вторичной цѣпью. Это въ одинаковой мѣрѣ относится и къ неподвижному двигателю съ разомкнутымъ роторомъ, а следовательно въ электрическомъ отношеніи нѣть никакого различія, стоитъ ли двигатель при разомкнутомъ роторѣ, или работаетъ въ холостую при замкнутомъ роторѣ (безъ тренія). Въ действительности треніе всегда существуетъ, и оно служить двигателю нагрузкой. Въ этомъ состояніи скольженіе очень мало—и двигатель подобенъ трансформатору съ большимъ виѣшимъ сопротивленіемъ. Если замкнуть роторъ на короткое и задерживать его, то $s=1$. По форм. (45) $s=1$, когда $r=0$, следовательно такое состояніе двигателя соответствуетъ трансформатору при короткомъ замыканіи его. Вторичное напряженіе на зажимахъ трансформатора при безъиндукціонной нагрузкѣ равно

$$r \mathcal{J}_2 = P_2$$

Вставивъ это выраженіе въ уравн. (26), получимъ

$$W_2 = m P_2 \mathcal{J}_2,$$

т.-е. мощность равна произведенію напряженія на зажимахъ на силу тока во всѣхъ m фазахъ, такъ же, какъ въ трансформаторѣ при безъиндукціонной нагрузкѣ. Такимъ образомъ видимъ, что асинхронный двигатель въ электрическомъ отношеніи во всемъ аналогиченъ трансформатору, работающему на безъиндукціонную нагрузку. Поэтому къ нему примѣнимы и диаграммы трансформатора.

16. Диаграмма трансформатора при безъиндукціонной нагрузкѣ.

На фиг. 66 представлена диаграмма токовъ и магнитныхъ полей трансформатора при безъиндукціонной нагрузкѣ. I_1 и I_2 суть вектора первичного и вторичнаго токовъ, сдвинутыхъ другъ относительно друга на уголъ φ , болѣшій 90° и менѣшій 180° . Каждый токъ ведаетъ одну изъ составляющихъ общаго

для обѣихъ обмотокъ потока Φ . Составляющая отъ первичнаго тока

$$\overline{OA} = \frac{0,4\pi I_1 w_1}{R}, \dots \dots \dots \quad (47)$$

а отъ вторичнаго тока

$$\overline{OB} = \frac{0,4\pi I_2 w_2}{R}, \dots \dots \dots \quad (48)$$

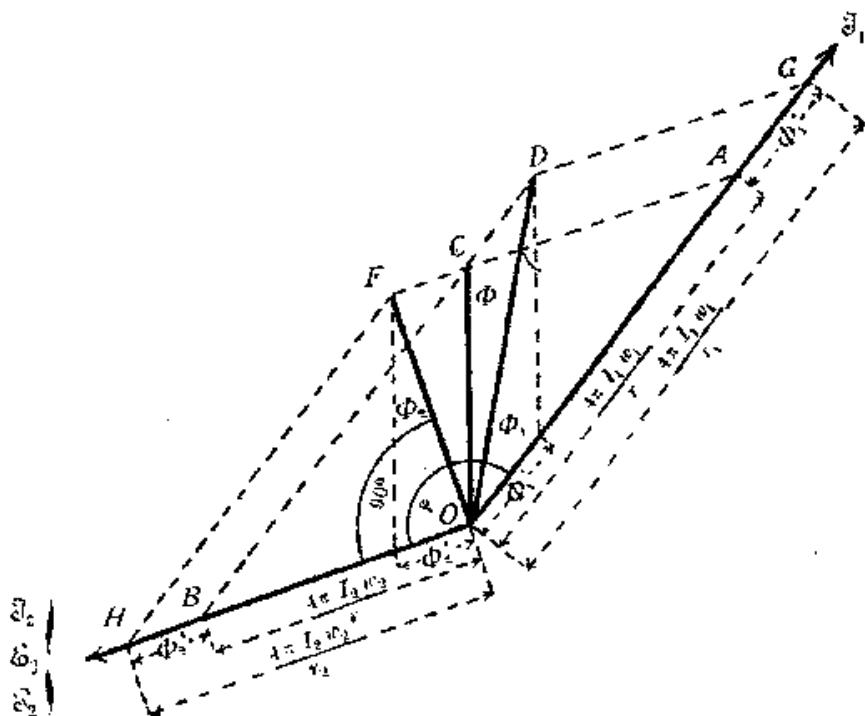
гдѣ R общее сопротивление магнитной цѣпи для потока Φ . Кроме того, первичный токъ создаетъ первичный потокъ разсѣянія

$$\Phi_1' = \frac{0,4\pi I_1 w_1}{R_1'} = \overline{AG} \dots \dots \dots \quad (49)$$

а вторичный токъ—вторичный потокъ разсѣянія

$$\Phi_2' = \frac{0,4\pi I_2 w_2}{R_2'} = \overline{BH} \dots \dots \dots \quad (50)$$

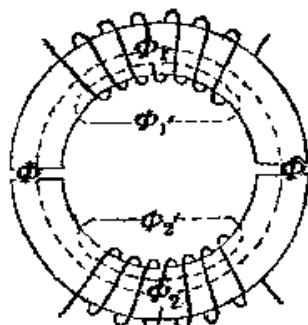
гдѣ R_1' и R_2' —сопротивленія соотвѣтственно первичному и вторичному потоку разсѣянія.



Фиг. 86.

Каждый изъ этихъ потоковъ разсѣянія существуетъ самостоитељно, вслѣдствіе чего и находится въ фазѣ съ создающимъ ихъ токомъ.

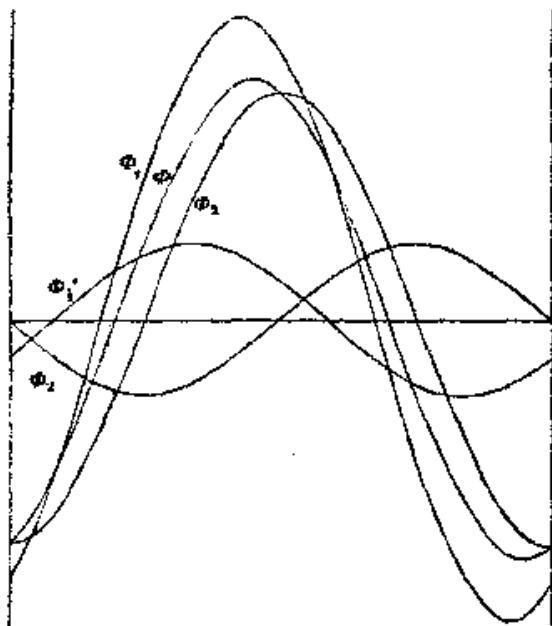
Въ желѣзѣ статора проходитъ общій потокъ Φ и потокъ разасѣянія Φ_1' , которые, складываясь геометрически (по правилу параллелограмма силъ), образуютъ первичный потокъ Φ_1 . Въ желѣзѣ ротора накладываются потоки Φ и Φ_2' и образуютъ вторичный потокъ Φ_2 .



Фиг. 67.

Потоки Φ , Φ_1' , Φ_2' , Φ_1 , Φ_2 существуютъ въ дѣйствительности и могутъ быть обнаружены. Составляющая же \overline{OA} и \overline{OB} несуществуетъ самостоятельно и поэтому носятъ название фиктивныхъ потоковъ. На фиг. 67 показано дѣйствительное распределение потоковъ; это распределеніе можно получить при помощи желѣзныхъ опилокъ, если изготовить сердечникъ трансформатора по типу фиг. 67, изъ немагнитнаго материала и наложить первичную и вторичную обмотки отдельно.

Фиг. 68 изображаетъ измѣненіе этихъ потоковъ во времени. Сдвигъ фазъ между ними соотвѣтствуетъ угламъ между амплитудами на диаграммѣ. Мгновенные значенія потоковъ складываются алгебраически. Между магнитными



Фиг. 68.

сопротивленіями существуетъ такое же соотношеніе, какъ между сопротивленіями для токовъ, а именно:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_1'} \quad \dots \quad (51)$$

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_1'} \quad \dots \dots \dots \quad (52)$$

Умноживъ равенство (51) на $0,4\pi I_1 w_1$, получимъ

$$\frac{0,4\pi I_1 w_1}{R_1} = \frac{0,4\pi I_1 w_1}{R} + \frac{0,4\pi I_1 w_1}{R_1'} \quad \dots \dots \dots$$

И по уравн. (47) и (49)

$$\frac{0,4\pi I_1 w_1}{R_1} = \overline{OA} + \overline{AG} = \overline{OG} \quad \dots \dots \dots \quad (53)$$

Умножая равенство (52) на $0,4\pi I_2 w_2$, получимъ подобнымъ же образомъ

$$\frac{0,4\pi I_2 w_2}{R_2} = \overline{OH} \quad \dots \dots \dots \quad (54)$$

Отношеніе поля разсѣянія къ соответствующему фиктивному полю называется коэффиціентомъ разсѣянія Гейланда (τ_1, τ_2).

Первичный коэффиціентъ разсѣянія

$$\tau_1 = \frac{\overline{GA}}{\overline{AO}} = \frac{R}{R_1'} \quad \dots \dots \dots \quad (55)$$

а вторичный

$$\tau_2 = \frac{\overline{HB}}{\overline{BO}} = \frac{R}{R_2} \quad \dots \dots \dots \quad (56)$$

т.-е. первичный или вторичный коэффиціентъ разсѣянія равень отношению магнитнаго сопротивленія для общаго потока къ соответственнымъ сопротивленіямъ потокамъ разсѣянія.

Отношеніе всей, создаваемой первичнымъ или вторичнымъ токомъ, составляющей потока къ фиктивному потоку называется коэффиціентомъ разсѣянія Гопкинсона (v_1, v_2), следовательно

$$v_1 = \frac{\overline{GO}}{\overline{AO}} = \frac{R}{R_1} \quad \dots \dots \dots \quad (57)$$

$$v_2 = \frac{\overline{HO}}{\overline{BO}} = \frac{R}{R_2} \quad \dots \dots \dots \quad (58)$$

Изъ этихъ равенствъ, на основаніи равенствъ (51) и (52), получаются соотношенія между коэффиціентами разсѣянія Гопкинсона и Гейланда

$$v_1 = R \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1'} \right) = 1 + \frac{R}{R_1'} = 1 + \tau_1 \quad \dots \dots \dots \quad (59)$$

$$v_2 = R \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_2'} \right) = 1 + \frac{R}{R_2'} = 1 + \varepsilon_2 \quad \dots \quad (60)$$

Для каждого изъ составляющихъ потоковъ \bar{OG} и \bar{OH} и для потоковъ разсѣянія Φ_1' и Φ_2' будемъ различать слѣдующіе коэффициенты самоиндукціи:

$$L_1 = \frac{4\pi w_1^2}{R_1} \quad L_2 = \frac{4\pi w_2^2}{R_2}$$

$$L_1' = \frac{4\pi w_1^2}{R_1'} \quad L_2' = \frac{4\pi w_2^2}{R_2'}$$

а коэф. самоиндукціи для фиктивныхъ потоковъ \bar{OA} и \bar{OB} :

$$L_{1f} = \frac{4\pi w_1^2}{R} \quad L_{2f} = \frac{4\pi w_2^2}{R}$$

Принимая во вниманіе ур. (51) и (52), получимъ

$$L_{1f} = 4\pi w_1^2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right) = L_1 - L_1' \quad \dots \quad (61)$$

$$L_{2f} = 4\pi w_2^2 \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right) = L_2 - L_2' \quad \dots \quad (62)$$

Общему потоку соответствуетъ коэффициентъ взаимной индукціи

$$M = \frac{4\pi w_1 w_2}{R} \quad .$$

Отсюда слѣдуетъ:

$$M^2 = \frac{(4\pi)^2 w_1^2 w_2^2}{R^2} = L_{1f} \cdot L_{2f} = (L_1 - L_1') (L_2 - L_2') \quad . \quad (63)$$

Behn-Eschenburg далъ этому соотношению слѣдующій видъ:

$$M^2 = L_1 L_2 - \varepsilon L_1 L_2 = L_1 L_2 (1 - \varepsilon) \quad \dots \quad (64)$$

ε — есть, слѣдовательно, коэффициентъ разсѣянія, учиты-вающей совокупное вліяніе первичнаго и вторичнаго разсѣянія. Связь съ другими коэффициентами разсѣянія получается слѣ-дующимъ образомъ:

$$1 - \varepsilon = \frac{M^2}{L_1 L_2} = \frac{R_1 R_2}{R^2} = \frac{1}{v_1 v_2} \quad ,$$

Откуда

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{v_1 v_2} \quad \dots \quad (65)$$

Изъ уравн. (59) и (60) имѣемъ

$$v_1 v_2 = (1 + \tau_1) (1 + \tau_2) = 1 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 \quad \dots \quad (66)$$

Обозначимъ $\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 = \tau \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (67)$

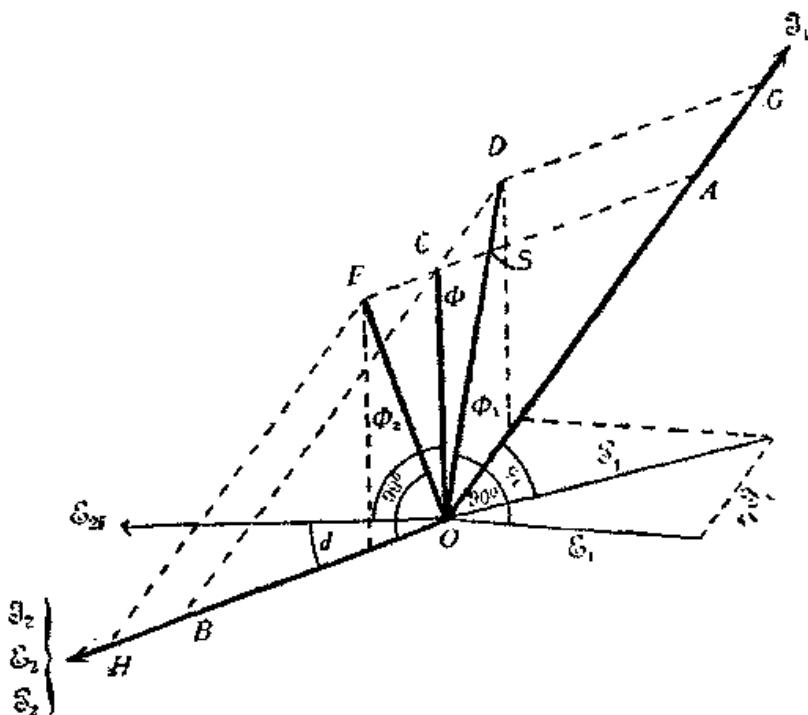
Тогда $v_1 v_2 = 1 + \tau \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (68)$

Коэффициентъ τ , следовательно, учитываетъ общее разсѣяніе трансформатора.

Изъ ур. (65) и (68) имѣемъ

$$\epsilon = 1 - \frac{1}{1 + \tau} = \frac{\tau}{1 + \tau} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (69)$$

Такова зависимость между различными коэффициентами разсѣянія, встречающимися въ литературѣ.



Фиг. 69.

Намъ осталось ввести еще въ діаграмму вектора напряженій. Для преодолѣнія эл.-дв. силы, индукируемой первичнымъ потокомъ Φ , и отстающей отъ него на 90° , необходимо напряженіе \mathcal{E}_1 , составляющее напряженія на зажимахъ двигателя P_1 (фиг. 69). Другой составляющей этого напряженія будетъ ваттное паденіе напряженія $r_1 \mathcal{E}_1$, находящееся въ фазѣ съ токомъ.

Напряженіе на зажимахъ F_1 является геометрической суммой этихъ векторовъ; токъ \mathfrak{J}_1 отстаетъ отъ напряженія P_1 на уголъ φ_1 . Индукируемая въ обмоткѣ ротора вторичнымъ потокомъ Φ_2 эл.-дѣ. сила \mathfrak{E}_2 отстаетъ отъ него на 90° , но такъ какъ асинхронный двигатель представляетъ въ электрическомъ отношеніи трансформаторъ работающій при безъиндукціонной нагрузкѣ, то вторичный токъ \mathfrak{J}_2 и вторичное напряженіе P_2 совпадаютъ съ \mathfrak{E}_2 .

Слѣдуетъ различать эл.-дѣ. силу \mathfrak{E}_2 , индукируемую потокомъ Φ_2 и, неудачно называемую вторичной эл.-дѣ. силой, эл.-дѣ. силу \mathfrak{E}_2 , индукируемую въ обмоткѣ ротора общимъ потокомъ Φ ; \mathfrak{E}_2 направлена перпендикулярно къ Φ . Эту эл.-дѣ. силу мы ввели въ формулы для вращающаго момента въ главѣ 8. Токъ \mathfrak{J}_2 , эл.-дѣ. сила \mathfrak{E}_2 и напряженіе на зажимахъ P_2 отстаютъ отъ \mathfrak{E}_2 на уголъ δ .

17. Круговая діаграмма Гейланда.

Мы видѣли, что асинхронный двигатель при любомъ состояніи работы соответствуетъ трансформатору при безъиндукціонной нагрузкѣ. Уголь BOF , слѣдовательно, постояненъ и равенъ прямому, и геометрическія мѣста нѣкоторыхъ точекъ діаграммы суть окружности. Этимъ впервые воспользовался Гейландъ для построенія круговой діаграммы, принесшей большую пользу для развитія трехфазного асинхронного двигателя.

Для построенія подобной діаграммы поступимъ слѣдующимъ образомъ.

Проведемъ черезъ точку A на фиг. 66 прямую параллельную OF до пересѣченія съ продолженіемъ OD въ точкѣ T (фиг. 70). Тогда получимъ, какъ это видно изъ фиг. 66 и 70, слѣдующія соотношенія:

$$\frac{\overline{CS}}{\overline{SA}} = \frac{\overline{DS}}{\overline{SO}} = \frac{\overline{GA}}{\overline{AO}} = \frac{\frac{4\pi I_1 w_1}{R_1^{-1}}}{\frac{4\pi I_1 w_2}{R}} = \frac{R}{R_1} = \tau_1 \quad . . . \quad (70)$$

$$\frac{\overline{FC}}{\overline{CA}} = \frac{\overline{FC}}{\overline{BO}} = \frac{\frac{4\pi I_2 w_2}{R_2^{-1}}}{\frac{4\pi I_2 w_3}{R}} = \frac{R}{R_2} = \tau_2 \quad . . . \quad (71)$$

$$\frac{\overline{AC}}{\overline{AS}} = \frac{\overline{AS} + \overline{OS}}{\overline{AS}} = 1 + \frac{\overline{CS}}{\overline{SA}} = 1 + \tau_1 \quad . . . \quad (72)$$

$$\frac{AF}{AC} = \frac{AC + CF}{AC} = 1 + \frac{FC}{CA} = 1 + \tau_2 \dots \dots \quad (73)$$

$$\frac{AC}{AS} \cdot \frac{AF}{AC} = \frac{AF}{AS} = (1 + \tau_1)(1 + \tau_2) = 1 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 \dots \dots \quad (74)$$

Изъ ур. (67) имеемъ $\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 = \tau$

Откуда

$$\frac{AF}{AS} = 1 + \tau \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (75)$$

Изъ фиг. (70) имеемъ:

$$\frac{AF}{AS} = \frac{AS + SF}{AS} = 1 + \frac{SF}{AS}$$

Изъ подобія $\triangle SFO$ и AST получаемъ:

$$\frac{SF}{AS} = \frac{SO}{ST} = \tau \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (76)$$

Магнитныя сопротивления R и R_1' зависятъ отъ размѣровъ двигателя и отъ магнитной проницаемости ржевза и воздуха. Такъ какъ эти величины одинаковы для R и R_1' , то въ отношеніе $\frac{R}{R_1'}$ они и не найдуть; откуда получается, что τ зависитъ только отъ соотношенія размѣровъ машины.

То же самое относится и къ τ_2 . Такъ какъ τ зависитъ только отъ τ_1 и τ_2 , то и τ , а слѣдовательно и $\frac{SO}{ST}$, зависитъ только отъ соотношенія размѣровъ двигателя. Для данного двигателя, такъ образомъ, τ и $\frac{SO}{ST}$ постоянны. Сами же отрѣзки SO и ST при постоянной первичной эл.-дв. силѣ постоянны; углы OFS и SAT прямые, а слѣдовательно окружности, описанныя на SO и на ST , какъ на диаметрахъ, пройдутъ: первая черезъ F , а вторая—черезъ A , т.-е. онѣ суть геометрическія мѣста концовъ векторовъ \overline{OF} и \overline{OA} . Изъ фиг. 66

$$\overline{OA} = \frac{4\pi I_1 w_1}{R}$$

пропорционально первичному току. Итакъ, мы получили диаграмму, въ которой прямая, проведенная изъ центра O до пересѣченія съ окружностью, представляетъ собою величину пропорциональную первичному току I_1 .

Рассмотримъ крайніе теоретически возможные случаи, а именно, когда вторичное сопротивление равно бесконечности и—нулю. Первый случай имѣть мѣсто, когда двигатель стоитъ, и обмотка ротора разомкнута, или—при холостомъ ходѣ безъ всякаго тренія,—когда роторъ вращается синхронно съ полемъ. При этихъ условіяхъ вторичный токъ равенъ нулю, а, слѣдовательно, нѣть и вторичнаго потока разсѣянія. Вслѣдствіе этого вторичный потокъ Φ_2 совпадаетъ съ общимъ потокомъ Φ , а амплитуда первичнаго потока равна алгебраической суммѣ амплитудъ общаго поля и первичнаго поля разсѣянія:

$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_1';$$

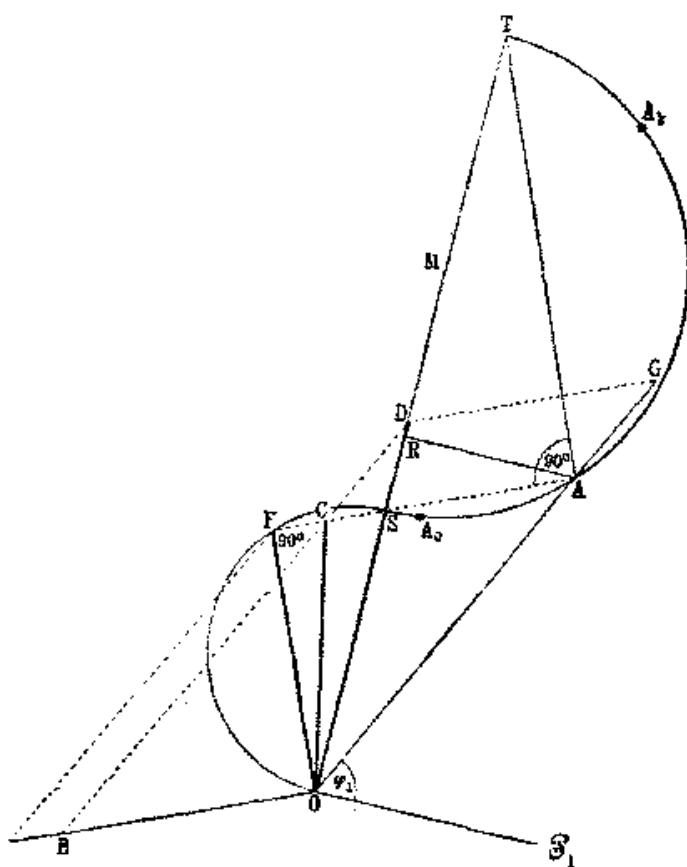
на діаграммѣ, при этомъ, точка C совпадаетъ съ S . Вслѣдствіе этого точка G совпадаетъ съ D , а A —съ S . Слѣдовательно, вся діаграмма совмѣщается въ линію OD . Въ другомъ крайнемъ случаѣ, когда вторичное сопротивление равно нулю, т. е. роторъ двигателя удерживается неподвижнымъ, сдвигъ фазъ $\frac{\pi}{2}$ между первичнымъ и вторичнымъ токомъ равенъ 180° . Это возможно лишь тогда, когда общее поле Φ равно нулю и $\Phi_1 = \Phi_1'$ т. е. весь первичный потокъ представляетъ собою потокъ разсѣянія. Въ этомъ случаѣ точка C совпадаетъ съ O и точка A и G лежать на продолженіи OD . Діаграмма и въ этомъ случаѣ стится въ одну прямую линію.

Такъ какъ въ обоихъ крайнихъ случаяхъ векторъ OA первичнаго тока совпадаетъ съ линіей OD , то уголъ $\gamma_1 = 90^\circ$. Послѣднее возможно при отсутствіи въ двигателѣ потерь въ желѣзѣ и въ мѣди. Въ дѣйствительности этого не можетъ быть, а потому концы векторовъ первичнаго тока при холостомъ ходѣ при разомкнутомъ роторѣ и при короткомъ замыканіи лежать не на прямой OD , а попадаютъ въ точки A_o и A_k (фиг. 70). Второй предельный случай не имѣть мѣста на практикѣ еще и потому, что при короткомъ замыканіи ротора сопротивление обмотки его не равно нулю. Точка A_k , слѣдовательно, лежить далеко отъ T . При всякихъ нагрузкахъ двигателя конецъ вектора первичнаго тока лежитъ на окружности между A_o и A_k .

При увеличеніи нагрузки отъ холостого хода до остановки точка C будетъ подвигаться отъ A_o до A_k .

Предположение постоянства первичной эл.-дв. силы E не соответствуетъ дѣйствительности, такъ какъ обыкновенно постояннымъ является напряженіе на зажимахъ двигателя. Эл.-дв. сила же уменьшается тѣмъ больше, чѣмъ большее паденіе напряженія въ статорѣ, т. е. чѣмъ больше первичная сила тока. Дѣйствительная геометрическая мѣста точекъ C, F, A не будутъ полуокружностями. Опять, однако, показываетъ, что эта діаграмма даетъ достаточно точные результаты и для постояннаго напряженія, если разматривать E_1 , какъ векторъ напряженія P_1 и соответственно уголъ AOP_1 , какъ первичную

разность фазъ φ_1 ¹⁾). Если опустить перпендикуляръ изъ точки A на диаметръ ST , то отрѣзки AR и RO будуть составляющими вектора тока AO . Первый изъ нихъ параллеленъ вектору напряженія P_1 и, слѣдовательно, находится въ фазѣ съ нимъ. Онъ представляетъ ваттный токъ \dot{J} соз φ_1 . Отрѣзокъ RO , перпендикулярный къ P_1 , представляетъ безваттный токъ $\dot{J}_1 \sin \varphi_1$. Слѣдовательно, при теоретическомъ холостомъ ходѣ весь токъ безваттный и служить для создания магнитнаго поля Φ_1 , которому по нашему предположенію постоянно. OS является



Фиг. 70.

¹⁾ Осанна (Zeitschr. f. Elektrotechnik 1890, стр. 223) построилъ полную диаграмму, принимая во вниманіе паденіе напряженія въ статорѣ, т. е. для постояннаго приложеннаго напряженія. Но эта диаграмма сравнительно съ обычной, построенной для постояннай эл.-дв. силы, очень сложна, и, какъ показало точное изслѣдованіе, даетъ результаты не лучше, чѣмъ обычная. Вообще всѣ графические методы суть методы приближенные, строго справедливые лишь для синусоидальныхъ токовъ, напряженія и позей. Послѣднее не имѣть мѣста даже и въ томъ случаѣ, если кривая напряженія синусоида, вслѣдствіе того, что кривая намагничиванія вѣ прямая линія.

такимъ образомъ, постояннымъ назначивающимъ токомъ, который мы назовемъ черезъ \mathcal{J}_2 .

По фиг. 66 имѣемъ

$$AC = OB = \frac{0,4\pi L_2 w_2}{R},$$

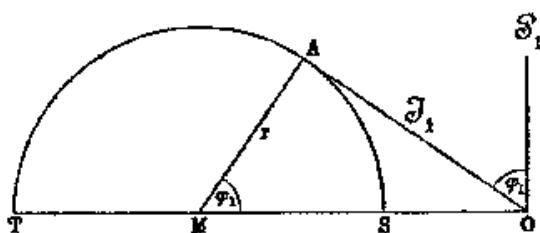
т.-е. AC пропорционаленъ вторичной силѣ тока и отложенъ въ томъ же масштабѣ, какъ и OA , при условіи равенства чиселъ витковъ статора и ротора ($w_1 = w_2$). Въ противномъ случаѣ масштабы обратно пропорциональны числамъ витковъ. При теоретическомъ короткомъ замыканіи, когда A совпадаетъ съ T и C съ O , числа первичныхъ и вторичныхъ ампервитковъ равны. Это справедливо и при действительномъ короткомъ замыканіи A_k и приблизительно справедливо для наибольшей нормальной нагрузки. Послѣднее соображеніе очень важно при расчетѣ двигателя, такъ какъ, имѣя вторичный токъ и сопротивление ротора, мы получимъ потери въ мѣди ротора, а по нимъ, изъ ур. (11), опредѣлимъ скольженіе, соответствующее данной нагрузкѣ. Изъ подобія треугольниковъ AOS и CDS (фиг. 70) имѣемъ, что AS пропорционаленъ вторичному току \mathcal{J}_2 , но въ иномъ масштабѣ. Этотъ масштабъ опредѣлится изъ первичнаго тока при короткомъ замыканіи или при наибольшей нормальной нагрузкѣ, такъ какъ числа ампервитковъ при этомъ приблизительно одинаковы (см. гл. 31 и 40).

Для построенія діаграммы даннаго двигателя нужно имѣть по крайней мѣрѣ двѣ точки окружности. Удобно брать для этого точку холостого хода A_0 и короткаго замыканія A_k . Изъ середины прямой, соединяющей эти двѣ точки, восставляютъ перпендикуляр до пересѣченія съ основной линіей (OT). Чтобы не вычислять угла φ_1 , для нанесенія точекъ A_0 и A_k вычисляютъ ваттную составляющую тока $\mathcal{J}_1 \cos \varphi_1$ дѣленіемъ подводимой мощности на напряженіе у зажимовъ и проводятъ прямую параллельную OT на разстояніи этой составляющей. Точки A^o и A_k находятся пересѣченіемъ этой параллели съ окружностями радиусовъ \mathcal{J}_0 и \mathcal{J}_k . Для построенія діаграммы расчетываемаго двигателя, нужно вычислить τ_1 , τ_2 и τ . Тогда будетъ известно отношеніе $\frac{SO}{ST}$. На ST , какъ на диаметръ, строимъ полуокружность. Для определенія масштаба необходимо знать только намагничивающій токъ OS (относительно его расчета см. главу 38).

18. Найменший коэффициентъ мощности.

Изъ разсмотрѣнной діаграммы можно найти соотношеніе между токомъ статора OA и угломъ сдвига фазы его φ_1 , косинусъ которого представляетъ коэффициентъ мощности. На фиг. 71 изображена полуокружность съ векторомъ тока \mathcal{J}_1 и

напряженiemъ P_1 . Если прослѣдить измѣненіе угла φ_1 при возрастаніи нагрузки отъ холостого хода до остановки двигателя, то увидимъ, что онъ сначала уменьшается, достигаетъ наименьшей величины, когда векторъ тока становится касательнымъ къ окружности, затѣмъ увеличивается. Соответственно этому коэффиціентъ мощности увеличивается, достигаетъ максимума и снова уменьшается. На фиг. 21 изображена кривая зависимости $\cos\varphi_1$ отъ мощности, а на фиг. 22—отъ скольженія для 2-хъ сильного двигателя. Наибольшая величина $\cos\varphi_1$ соотвѣтствуетъ 2,8 лоп. с. и 0,1 скольженія.



Фиг. 71.

Изъ фиг. 71 получается простое соотношеніе между наибольшимъ коэффиціентомъ мощности $\cos\varphi_{1(\max)}$ и коэффиціентомъ разсѣянія. Такъ какъ касательная перпендикулярна къ радиусу, то изъ $\triangle OAM$ имѣемъ:

$$\cos\varphi_{1(\max)} = \frac{MA}{MO} = \frac{r}{r+SO} = \frac{1}{1+\frac{SO}{r}}$$

и такъ какъ

$$\frac{SO}{r} = \frac{SO}{ST} = 2 \cdot \frac{SO}{ST} = 2\tau,$$

то

$$\cos\varphi_{1(\max)} = \frac{1}{1+2\tau} \quad \dots \quad (77)$$

Нтакъ, наибольшій коэффиціентъ мощности зависитъ исключительно отъ общаго разсѣянія двигателя и онъ тѣмъ больше, чѣмъ разсѣяніе меныше.

19. Вращающий момент и мощность.

Если мы временно пренебрежемъ потерями въ желѣзѣ, то вся энергія, подводимая къ статору, за вычетомъ тепловыхъ потерь въ немъ, будетъ передаваться ротору. Мощность подводимая къ статору пропорциональна отрѣзу AK (фиг. 70).

Передаваемую ротору мощность W_1 получимъ, вычитая тепловыя потери $r_1 \dot{\vartheta}_1^2$ изъ отрѣзка AR . Раздѣливъ полученнуя разность на угловую скорость ω_1 , получимъ врачающій моментъ M . Это вычитаніе можетъ быть произведено графически, при чмъ AR слѣдуетъ уменьшить на величину, пропорціональную потерямъ, или при постоянномъ r_1 , пропорціональную $\dot{\vartheta}_1^2$. Пусть этотъ отрѣзокъ будетъ AH (фиг. 72). Докажемъ, что онъ пропорціоналенъ $\dot{\vartheta}_1^2$. Проведя черезъ H прямую параллельную OT до пересѣченія съ AT , получимъ треугольникъ AHG , подобный треугольнику SRA , такъ какъ оба они прямоугольные и углы при G и A равны между собой. Изъ треугольника ORA :

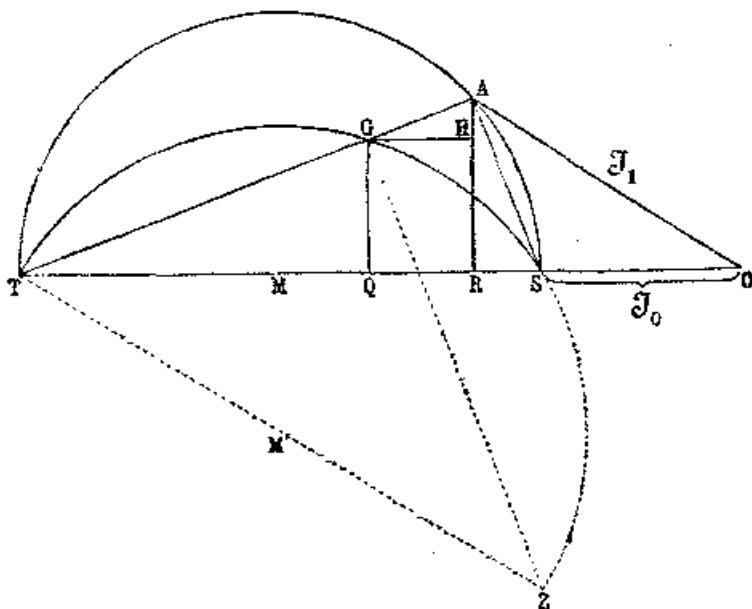
$$\dot{\vartheta}_1^2 = AR^2 + (\mathcal{J}_0 + SR)^2 = AR^2 + \mathcal{J}_0^2 + 2\mathcal{J}_0 SR + SR^2.$$

Далѣе

$$AR^2 + SR^2 = AS^2,$$

Откуда

$$\dot{\vartheta}_1^2 = AS^2 + \mathcal{J}_0^2 + 2\mathcal{J}_0 SR.$$



Фиг. 72.

Изъ треугольника AST имѣемъ

$$AS^2 = ST \cdot SR,$$

и по уравненію (76)

$$AS^2 = \frac{\mathcal{J}_0}{\zeta} \cdot SR,$$

поэтому

$$\mathfrak{J}_1^2 = \frac{\mathfrak{J}_o^2}{\tau} \cdot SR + \mathfrak{J}_o^2 + 2\mathfrak{J}_o \cdot SR,$$

откуда

$$SR = \frac{\mathfrak{J}_1^2 - \mathfrak{J}_o^2}{\mathfrak{J}_o \left(\frac{1}{\tau} + 2 \right)}$$

Пренебрегая въ числительѣ величиной \mathfrak{J}_o^2 сравнительно съ \mathfrak{J}_1^2 , получимъ, что RS , а елъдовательно и AH , пропорционально \mathfrak{J}_1^2 , такъ какъ всѣ остальные величины постоянны. При малыхъ нагрузкахъ квадратомъ \mathfrak{J}_o пренебречь нельзя. Однаго ошибки, которая получается отъ допущенія, что AH равно $r_1 \mathfrak{J}_1^2$ можетъ быть отчасти исправлена. Какъ упомянуто на стр. 59 диаграмма построена въ предположеніи постоянства эл.-дв. силы E_1 . Но на практикѣ мы имѣемъ постоянное напряженіе у зажимовъ, т. е. эл.-дв. сила съ возрастаніемъ силы тока уменьшается, вслѣдствіе омического паденія напряженія. Особенно значительно паденіе напряженія въ опытѣ короткаго замыканія, служащаго для построенія диаграммы; происходящая отъ этого ошибка въ большей своей части компенсируется ошибкой отъ пренебреженія токомъ \mathfrak{J} .

Если выразить AH въ ваттахъ и въ томъ же масштабѣ, какъ AR , то HR или GQ будутъ пропорциональны вращающему моменту выраженному въ ваттахъ. Остается только найти геометрическое мѣсто точекъ G , по которому можемъ опредѣлить вращающій моментъ для любой нагрузки. При теоретическомъ холостомъ ходѣ (S) и короткомъ замыканіи (T) вращающій моментъ равенъ нулю. Проведя окружность черезъ точки T , G , S , получимъ искомое геометрическое мѣсто. Дѣйствительно GZ параллельно AS , такъ какъ $\angle TGZ = \angle TAS$, какъ вписаные въ полуокружность прямые. Отсюда $\angle QGZ = \angle RAS = \angle HGA$.

Это справедливо для любого положенія точки A на этой окружности, и слѣдовательно TFS — геометрическое мѣсто точки G .

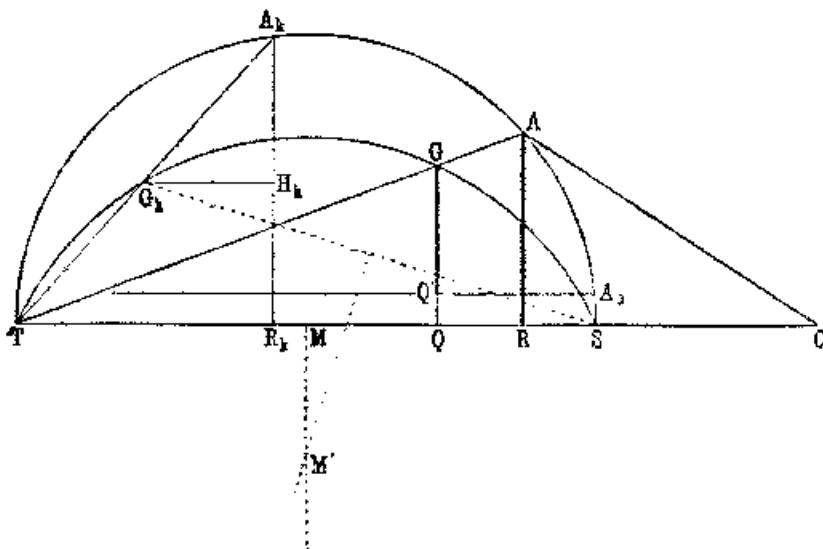
Вращающій моментъ, такимъ образомъ, изобразится перпендикуляромъ, опущеннымъ изъ точки пересѣченія этой окружности съ AT на OT . Для построенія этой окружности нужно знать одну изъ точекъ ея. Для построенія круга токомъ \mathfrak{J}_1 , мы пользуемся опытомъ короткаго замыканія (точка A_k); если отложить отъ точки A_k въ масштабѣ (въ ваттахъ) величину $AR = mr_1 \mathfrak{J}_k^2$ на прямой A_kR_k (фиг. 73), получимъ точку H_k . Проведя черезъ H_k прямую параллельную OT до пересѣченія съ прямой A_kT , получимъ точку G_k искомой окружности. Центръ ея M' опредѣляется пересѣченіемъ перпендикуляровъ, восстановленныхъ изъ серединъ хордъ G_kS и TS .

Примемъ теперь еще во внимание потери въ желѣзѣ и потери на треніе.

Такъ какъ потери эти переходятъ въ теплоту, то онъ не могутъ влиять на вращающій моментъ (за исключениемъ незначительного момента, вызываемаго токами Фуко и гистерезисомъ, см. гл. 11).

Слѣдовательно для получения полезнаго кращающаго момента двигателя необходимо уменьшить перпендикуляръ GQ на величину этихъ потерь.

Въ виду того, что при измѣненіи нагрузки двигателя отъ холостого хода до полной—число оборотовъ его нормально измѣняется не болѣе, чѣмъ на 6% , то потери на треніе о воадухъ и въ подшипникахъ можно считать постоянными. Предполагая, что двигатель работаетъ при постоянномъ напря-



Фиг. 73.

женіи на его зажимахъ, можно и потери въ желѣзѣ считать постоянными¹⁾. Прибавляя сюда еще потери въ мѣди отъ намагничивающаго тока, незначительно отличающагося отъ тока холостого хода, получимъ общія потери, близкія къ потерямъ холостого хода. Мы можемъ ихъ учесть разъ навсегда, проведя черезъ точку A_0 прямую, параллельную ST (фиг. 73), и отмѣрять вращающій моментъ отъ нея. Дѣйствительный вращающій моментъ получимъ равнымъ GQ' въ ваттахъ, если измѣримъ это расстояніе въ томъ же масштабѣ, что и AK и раздѣлимъ на угловую скорость ω_1 . Такъ какъ мы пришли во вниманіе тре-

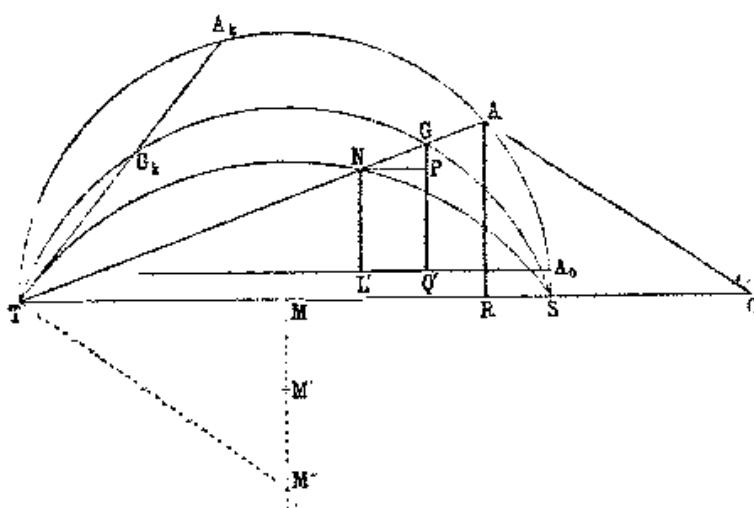
¹⁾ Слѣдуетъ добавить, что паденіе напряженія въ обмоткѣ статора въ предѣлахъ нормальной нагрузки двигателя обычно не велико, такъ какъ потери въ желѣзѣ пропорціональны эл.-дв. силѣ, а не напряженію на зажимахъ.

Прим. редактора.

ніе, то GQ' представляетъ моментъ, соответствующій не дѣйствительной мощности W_2 , а—полезной W_u . Для получения первого проводимъ прямую параллельную ST вину отъ нея на разстояніи величины потерь въ же лѣзѣ и въ мѣди при холостомъ ходѣ.

Полезная мощность двигателя W_u можетъ быть такъ же получена непосредственно изъ діаграммы.

Передаваемая ротору мощность GQ' распадается на двѣ части: на потери въ мѣди ротора $\pi r_2 J_2^2$ и полезную мощность. Первые представлены на діаграммѣ фиг. 74 отрѣзкомъ GP , а слѣдовательно полезная мощность пропорціональна отрѣзку PQ' или NL' . Теперь легко доказать, что геометрическимъ мѣстомъ для точекъ N является такъ же окружность, проходящая черезъ точки S и T . Такъ какъ полезная мощность при теоретическомъ холостомъ ходѣ и корот-



Фиг. 74.

комъ замыканіи равна нулю, то окружность пройдетъ черезъ точки S и T . Но полезная мощность равна нулю и при дѣйствительномъ короткомъ замыканіи. Итакъ, если съ возрастаніемъ нагрузки до остановки двигателя точка A перемѣстится въ A_k , а— G въ— G_k , то N по внутренней окружности перейдетъ въ T , такъ какъ все три точки лежать на одной прямой. Точка N должна совпастъ съ T и находиться на TA . Это возможно, когда TA касательна къ кругу въ точкѣ T . Центръ круга M' находится, слѣдовательно, на пересѣченіи перпендикуляровъ, восстановленныхъ къ касательной въ точкѣ T и къ TS изъ ея середины. Измѣряя NL' въ масштабѣ AR , получимъ полезную мощность въ ваттахъ.

Для получения дѣйствительной мощности W_2 необходимо, какъ и для вращающаго момента, провести параллель къ ST

внизу отъ нея на разстояніи величины суммы потерь въ желѣзѣ и въ мѣди, соотвѣтствующихъ холостому ходу.

20. Скользеніе.

Скользеніе можетъ быть также найдено изъ діаграммы. Въ главѣ 15 мы видѣли, что асинхронный двигатель въ электрическомъ отношеніи совершенно подобенъ трансформатору при безъиндукціонной нагрузкѣ. Поэтому вторичный токъ

$$\mathcal{J}_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{r_2} \quad \dots \dots \dots \quad (78)$$

гдѣ \mathcal{E}_2 электродвижущая сила, индукируемая вторичнымъ потокомъ Φ_2 . Тогда

$$\mathcal{E}_2 = \frac{2\pi}{V^2} c_2 w_2 \Phi_2 \quad \dots \dots \dots \quad (79)$$

и по ур. (5)

$$\mathcal{E}_2 = \frac{2\pi}{V^2} c_1 s w_2 \Phi_2 \quad \dots \dots \dots \quad (80)$$

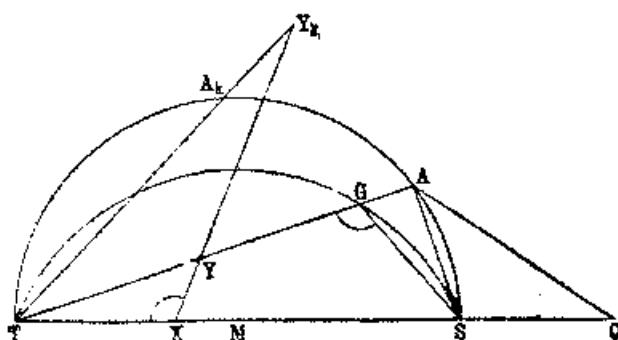
и

$$\mathcal{J}_2 = \frac{2\pi}{V^2 r_2} c_1 s w_2 \Phi_2 \quad \dots \dots \dots \quad (81)$$

Откуда

$$s = K \frac{\mathcal{J}_2}{\Phi_2}, \quad \dots \dots \dots \quad (82)$$

гдѣ K —коэффиціентъ пропорціональности.



Фиг. 75.

Какъ мы видѣли въ главѣ 17, отрѣзокъ SA пропорціоналенъ \mathcal{J}_2 , и $-AT$ пропорціоналенъ Φ_2 (фиг. 75), слѣдовательно скользеніе пропорціонально отношенію этихъ отрѣзковъ, при отсутствіи паденія напряженія въ статорѣ. При существованіи же па-

денія наприженія, скольжение, по сказанному въ предыдущей главѣ, опредѣляется точкой G , т. е. оно пропорціонально $\frac{SG}{GT}$.

Проведемъ линію XY такъ, чтобы $\angle TXY = \angle TGS$. Тогда треугольники TXY и TGS подобны, и скольжение s пропорціонально отношению $\frac{XY}{XT}$. Но такъ какъ XT постоянно, а съ перемѣщеніемъ точки A мѣняется только $X\Gamma$, то скольжение пропорціонально $X\Gamma$. Для установлена масштаба вспомнимъ, что при точкѣ короткаго замыканія A_k скольжение равно 1. Поэтому продолжимъ прямую XY допересѣченія съ TA_k въ точкѣ Y_k . Отрѣзокъ XY_k — есть единица масштаба для скольженія. Удобнѣе всего слѣдить оттъ отрѣзокъ равнымъ единицѣ длины, проведя прямую параллельную $X\Gamma$ такъ, чтобы ея длина XY_k равнялась, напримѣрь, 1 метру. Если тогда при какой-либо нагрузкѣ отрѣзокъ $X\Gamma$ равенъ 2 см., то скольжение равно 0,02 или 2% .

Можно еще проще получить положеніе линіи скольженія, зная, по ур. (82), что она прямая. При возрастаніи нагрузкѣ отъ холостого хода до остановки двигателя точка A движется отъ S къ A_k , при этомъ скольжение растетъ отъ 0 до 1. Если вращать двигатель въ противоположную сторону (ω_2 — отрицательно), то скольжение станетъ больше единицы. При возрастаніи его до бесконечности, по ур. (26), врашающій моментъ (для $s = \infty$) равенъ нулю. Такъ какъ послѣдній на діаграммѣ изображается перпендикуляромъ, опущеннымъ изъ точки G , то онъ обратится въ нуль при совпаденіи точекъ G и T . При этомъ векторъ TA , на которомъ лежать G , станетъ касательнымъ къ кругу врашающихъ моментовъ въ точкѣ T . Такъ какъ для момента, равнаго нулю, скольжение равно ∞ , а при короткомъ замыканіи (A_k) — равно единицѣ, то линія скольженія должна пересѣться съ касательной къ кругу въ бесконечности, т. е. быть ей параллельной, а въ пересѣченія съ TA_k — дать отрѣзокъ, равный единицѣ. Это будетъ прямая XY_k .

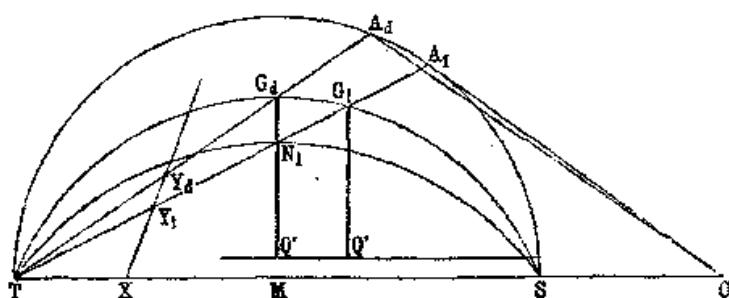
Итакъ, линію скольженія можно найти, не строя угла при X . Нужно только провести касательную къ кругу вращ. моментовъ въ точкѣ T и къ ней любую параллельную до пересѣченія съ линіей TA_k . $X\Gamma_k$ будетъ единицей масштаба скольженій.

21. Наибольшій врашающій моментъ и наибольшая мощность.

Изъ круговой діаграммы легко можно опредѣлить наибольшій врашающій моментъ и наибольшую мощность. Очевидно наибольшая мощность будетъ $Q'N$ (фиг. 76), а наибольшій моментъ $Q'G_a$.

Первая соотвѣтствує току въ статорѣ OA ; и скольженію XY , второй — току OA_k и скольженію XY_k . Какъ видно, мощность съ

увеличением тока статора достигает максимума раньше, чѣмъ вращающій моментъ. Объясняется это темъ, что мощность представляеть произведеніе вращающаго момента на угловую скорость, а при увеличеніи нагрузки послѣдня убываетъ мед-



Фиг. 76.

леніе, чѣмъ возрастаетъ вращающій моментъ. Поэтому при токѣ OA_1 — мощность будетъ наибольшая, тогда какъ соответствующій вращ. моментъ $Q'G_1$ меньше максимальнаго $Q'G_d$.

Въ главѣ 8 мы уже видѣли, что величиной наибольшаго момента опредѣляется предѣль перегрузки двигателя. На фиг. 21 приведены кривыя, полученные изъ круговой диаграммы, зависимостей характерныхъ для двигателя величинъ отъ мощности для двухсильнаго двигателя, а на фиг. 22 приведены кривыя зависимостей тѣхъ же величинъ отъ скольженія. Какъ видно, наибольшая мощность, равная 4,5 лоп. силамъ, получается при скольженіи 0,28 и силѣ тока въ 32 ампера. При дальнѣйшемъ возвраткѣ тока, вслѣдствіе увеличенія нагрузки, мощность падаетъ, и при $s = 0,45$ и 43 амперахъ вращающій моментъ достигаетъ максимума. Если увеличивать нагрузку дальше, то вращающій моментъ будетъ падать, и онъ станетъ недостаточнымъ для преодолѣнія нагрузки, число оборотовъ и мощность начнутъ падать, и двигатель остановится.

На фиг. 20, изображающей тѣ же кривыя, что и на фиг. 21, но въ увеличенномъ масштабѣ и лишь въ предѣлахъ нормальной нагрузки, нанесены точки, полученные непосредственно изъ опыта торможеніемъ.

Онѣ даютъ возможность судить о практической пригодности круговой диаграммы. Какъ видно, совпаденіе ихъ съ диаграммой вполнѣ достаточное, кромѣ скольженія. Для большей точности опыта былъ примѣненъ трехфазный генераторъ съ синусоидальной формой кривой напряженія, который приводился въ движение двигателемъ постояннаго тока, питавшимся отъ аккумуляторной батареи. Такимъ образомъ были созданы наилучшія условія опыта. Несовпаденіе диаграммныхъ величинъ скольженія съ опытными получалось и при испытаніи другихъ двигателей.

22. Примѣръ приложениія круговой диаграммы.

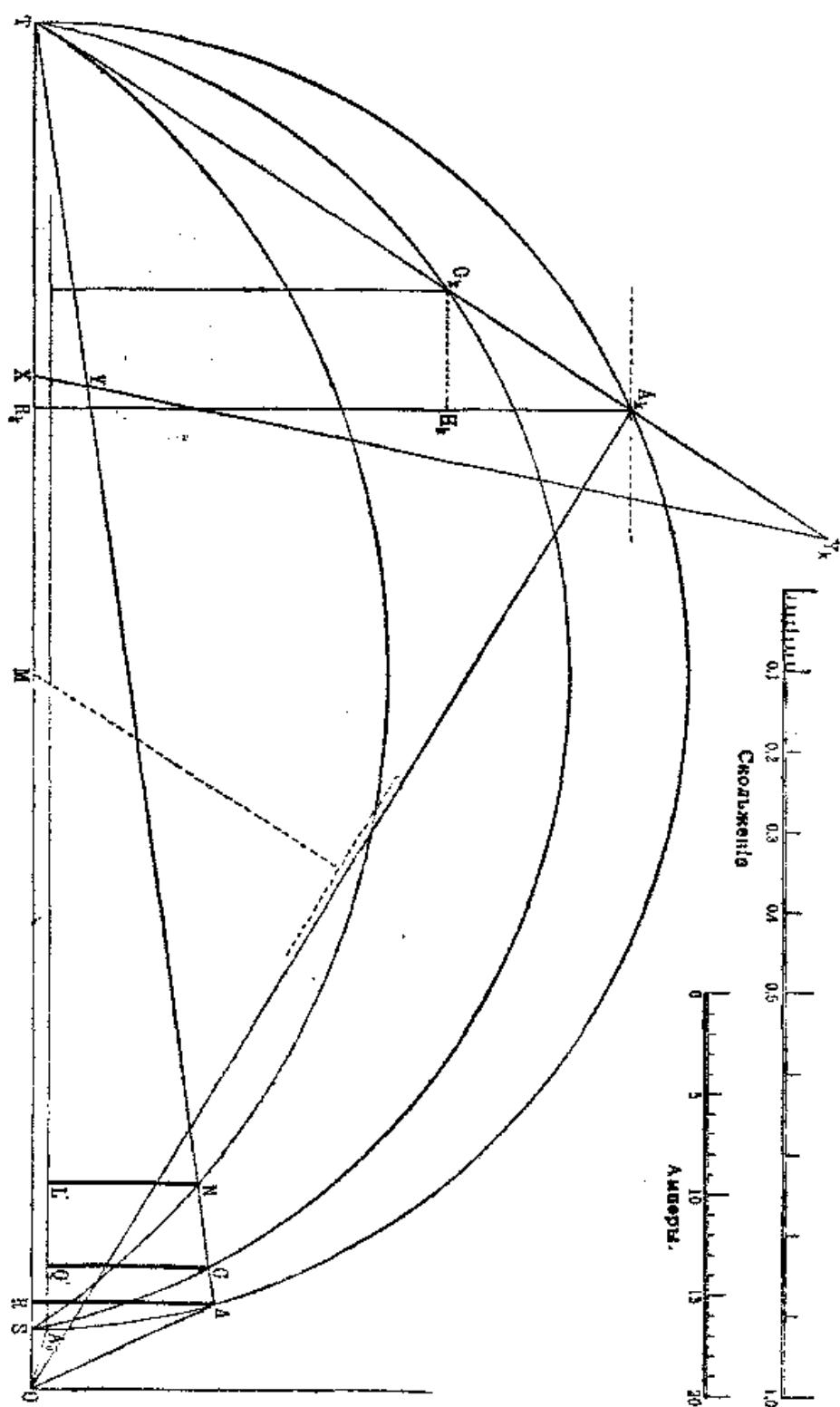
При изслѣдованиіи описанного выше двухфазнаго двигателя были измѣрены слѣдующія величины:

	Холостой ход.	Короткое замыканіе.
Фазное напряженіе при соединеніи звѣздой	66,5 в.	66,5 в.
Сила тока	3,1 амп.	56,8 амп.
Полная подводимая мощность	160 ват.	5890 ват.
Средняя мощность, потребляемая одной фазой	53,3 ват.	1963 ват.
Коэффиціентъ мощности ($\cos \varphi_1$)	0,26	0,523
Сопротивление обмотки одной фазы статора $0,186 \Omega$	—	—
Число паръ полюсовъ 2	—	—
Число періодовъ 50	—	—
Отсюда получается полный ваттный токъ	0,8 амп.	29,6 амп.

Масштабъ тока данъ на фиг. 77. Въ этомъ масштабѣ проведены въ разстояніяхъ $SA_o = 0,8$ и $A_kR_k = 29,6$ параллели къ OT . Изъ O радиусами $OA_o = 3,1$ и $OA_k = 56,8$ слѣданы засѣчки и получены точки холостого хода A_o и короткаго замыканія A_k . Центръ круга полученъ пересѣченіемъ перпендикуляра, восстановленнаго изъ середины A_oA_k съ основной линіей OT (пунктирная линія). При короткомъ замыканіи первичная тепловыя потери на фазу будутъ: $0,186 \cdot 56,8^2 = 600$ ваттъ. Дѣленіемъ на фазное напряженіе 66,5 получается ваттная составляющая тока 9 амп. Послѣднюю наносимъ въ масштабѣ тока на A_kR_k (A_kH_k). Получаемъ точку G_k , принадлежащую кругу вращ. моментовъ, центръ котораго найдется на основаніи предыдущаго. Возставляя перпендикуляръ къ TA_k въ точкѣ T , найдемъ центръ круга мощноти.

Для полученія AR, GQ' и NL' въ ваттахъ необходимо умножить масштабъ тока на $3 \cdot 66,5 = 199,5$, т.-е. единица масштаба тока равна 199,5 ваттамъ. Для перевода GQ' и NL' въ лошадиные силы нужно полученные числа еще разделить на 736, т. е. единица масштаба тока $= 0,272$ лошад. силы. Для полученія величины вращающаго момента по величинѣ GQ' , нужно ее разделить на $\omega_1 = 2\pi e_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 25 = 157$, а для полученія вращ. момента въ килограммометрахъ—еще умножить на 75. Такимъ образомъ одно дѣленіе масштаба токовъ равно $\frac{0,272 \cdot 75}{157} = 0,1296$ килограммометра. Для точки A получимъ: потребляемый токъ $OA = 10$ амп., потребляемая мощность $AR = 1800$ ваттъ, вращающей моментъ $GQ' =$

ки A получимъ: потребляемый токъ $OA = 10$ амп., потребляемая мощность $AR = 1800$ ваттъ, вращающей моментъ $GQ' =$



Фиг. 77.

1,01 кгр.-метра и полезная мощность $NL' = 2$ лоп. силы. Скольжение для этой точки $= XY$. Для определения его численной величины разделим XY_k на 100 частей, какъ изображено на масштабѣ. Такъ какъ $XY = 6,8$ такихъ частей, то скольжение составляетъ 0,068 или 6,8%.

Пускъ въ ходъ двигателей и регулированіе числа оборотовъ.

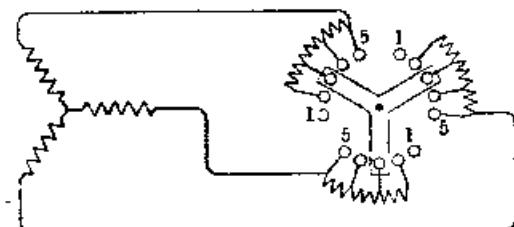
24. Пусковые реостаты.

Примѣненіе пусковыхъ реостатовъ для асинхронныхъ двигателей вызывается тремя причинами: 1) достижение наибольшаго возможнаго начальнаго момента; 2) уменьшеніе силы тока при пускѣ въ ходъ; 3) предохраненіе отъ перенапряженій при включеніи двигателя.

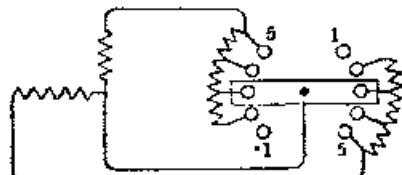
Увеличеніе начальнаго вращающаго момента, какъ указано въ главѣ 9, можетъ быть достигнуто увеличеніемъ сопротивленія вторичной цѣпи. Правильно выбравъ послѣднее, можно получить максимальный врац. моментъ при троганіи съ мѣста, соответствіенно кривой C фиг. 14. Это сопротивленіе опредѣляется изъ ур. (27) для $\varepsilon = 1$ и будетъ $r_2 = 2\pi c_1 L_2'$ (ср. гл. 9, фиг. 16 и гл. 21). Во избѣжаніе при этомъ пониженія коэф. пол. дѣятствія, сопротивленіе вторичной цѣпи увеличивается лишь на время пуска въ ходъ (фиг. 15). Для этого роторъ снабжается кольцами и щетками, при посредствѣ которыхъ въ пѣль ротора можетъ включаться сопротивление. При достижениіи нормального режима работы роторъ замыкается на короткое.

Одновременно съ увеличеніемъ вторичнаго сопротивленія уменьшается пусковой токъ, какъ видно изъ равенства (32). Во многихъ случаяхъ при пускѣ въ ходъ не требуется имѣть наибольшаго врац. момента, а достаточно незначительного увеличенія его. Въ такихъ случаяхъ сопротивленіе пускового реостата берется большимъ, и онъ дѣлается регулируемымъ. На фиг. 73 показанъ такой реостатъ для трехфазнаго, а на фиг. 79—для двухфазнаго двигателя. Когда рукоятка стоитъ на kontaktѣ 1, пѣль ротора разомкнута. Если поставить рукоятку на kontaktѣ 2, то будетъ включенъ весь реостатъ. При дальнѣйшемъ же ея передвиженіи реостатъ выключается частями, и по достижениіи kontaktа 5, обмотка ротора замыкается на короткое. Если необходимый начальный врац. моментъ невеликъ, то двигатель начнетъ вращаться уже при положеніи ручки на первомъ kontaktѣ, т. е. при незначительной силѣ тока. Если необходимый моментъ больше, то двигатель начнетъ вращаться на второмъ kontaktѣ, но уже при большей силѣ тока. Если этого недостаточно, то

рукоятку передвигають дальше, пока не получится сопротивление, соотвѣтствующаго необходимому врашающему моменту.



Фиг. 78.



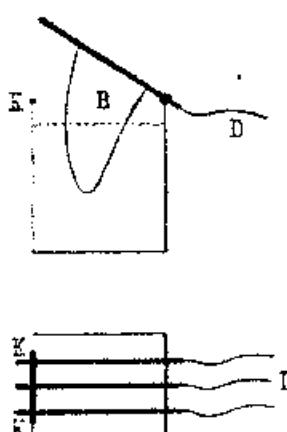
Фиг. 79.

Если двигатель не идетъ и при всемъ выведенномъ реостатѣ, то онъ вообще не можетъ развить достаточнаго враш. момента, т. е. онъ для данного случая слабъ.

Реостаты, представленные на фиг. 78 и 79 изготавливаются изъ проволоки для сопротивлений.

Тепловыя потери въ немъ и въ обмоткѣ ротора $V = m r_2 \dot{\theta}_2^2$ находятся при какомъ-нибудь скольженіи s по уравн. (10), (11) или (12), смотря по тому, исходимъ ли мы изъ врашающаго момента передаваемой или отдаваемой мощности.

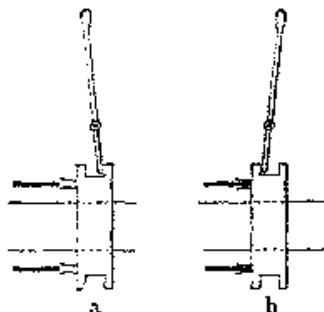
Постепенное уменьшение пускового сопротивленія достигается жидкимъ пусковымъ реостатомъ, въ противоположность вышеописанному, гдѣ оно происходитъ скачками. На фиг. 80 представлена схематически такой реостатъ въ формѣ, изготавляемой фирмой Вс. К. Эл. Въ желѣзномъ сосудѣ, наполненномъ обыкновенной водой или слабымъ растворомъ соды, расположены три желѣзныхъ пластины, изолированные другъ отъ друга и отъ сосуда и могущія вращаться около оси. Къ каждой пластинѣ подходитъ проводъ отъ щетки ротора. Если пластины вынутъ изъ жидкости, то вторичная цѣль двигателя разомкнута. По мѣрѣ ихъ погруженія, сопротивленіе уменьшается. По достижениіи двигателемъ нормального числа оборотовъ роторъ его замыкается на короткое посредствомъ контактовъ у пластинъ и у корпуса реостата (K).



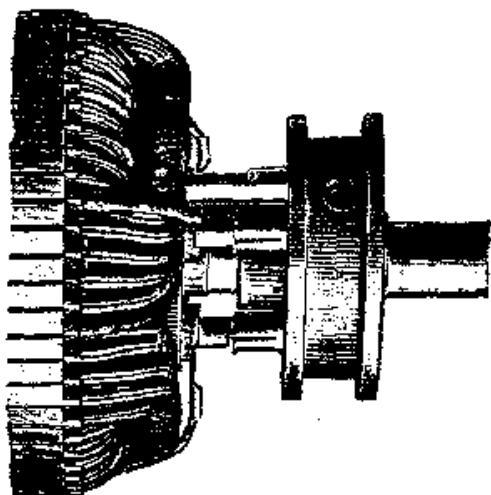
Фиг. 80.

Въ большихъ двигателяхъ, гдѣ сопротивление ротора очень мало и сопротивлениемъ контакта щетокъ и соединительныхъ проводовъ пренебречь нельзя, для короткаго замыканія ротора дѣлаютъ особое приспособленіе на самомъ роторѣ: на валу ротора насаживаютъ подвижное кольцо изъ хорошо проводящаго металла, какъ показано на фиг. 81 и 82.

Въ положениі *a* (фиг. 81) токъ ротора проходитъ черезъ щетки въ пусковой реостатъ, въ положениі же *b* роторъ замкнутъ на короткое. При такомъ устройствѣ не слѣдуетъ забывать при остановкѣ двигателя переставлять кольцо въ положеніе *a*.



Фиг. 81.



Фиг. 82.

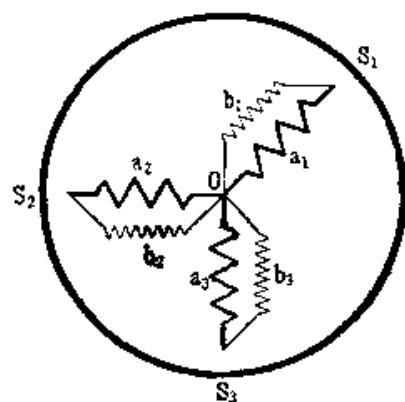
жение *a*, такъ какъ иначе при следующемъ пускѣ въ ходъ реостатъ окажется замкнутымъ на короткое и не будетъ дѣйствовать. На Фиг. 62 представлена другая конструкція. Соединенные съ обмоткой контакты прилегаютъ къ внутренней поверхности передвижного кольца. Во избѣженіе изнашиванія колецъ и потеръ на треніе щетокъ о нихъ, послѣднія послѣ короткаго замыканія отводятся отъ колецъ. Замыканіе ротора на короткое и подниманіе щетокъ совершаются обыкновенно посредствомъ одного общаго приспособленія, при чмъ замыканіе на короткое предшествуетъ поднятю щетокъ, и, наоборотъ, опусканіе щетокъ предшествуетъ размыканію ротора.

Пусковые реостаты, изображенные на фиг. 78—82 необходимы въ тѣхъ случаяхъ, когда токъ, потребляемый двигателемъ при пускѣ въ ходъ, не долженъ превосходить тока при нормальной нагрузкѣ. Если же такого ограниченія не имѣется и при пускѣ въ ходъ нужно получить максимальный враш. моментъ, то достаточно имѣть одно определенное не секционированное сопротивление. То же самое достигается и при помощи двигателей съ двойной обмоткой ротора (строится Всеобщей Комп. Эл.). Подъ фазовой обмоткой помѣщается короткозамкнутая обмотка, сопротивление которой какъ разъ достаточно для пуска въ ходъ съ необходимымъ начальнымъ враш. моментомъ. Находящаяся надъ ней фазовая обмотка присоединена къ короткозамыкателю, который приводится въ дѣйствіе или отъ руки, какъ на фиг. 82, или автоматически центробѣжнымъ регуляторомъ, какъ на фиг. 83.

При пускѣ въ ходъ дѣйствуетъ только короткозамкнутая обмотка. По достижениіи же двигателемъ опредѣленного числа ¹⁾ оборотовъ центробѣжная сила массы M на рычагѣ H преодолѣваетъ силу натяженія пружины F . Вслѣдствіе этого масса M передвигается къ краю шкива и вращаетъ кольцо съ укрѣпленными на немъ контактами C , замыкающими концы D фазовой обмотки. При выключеніи двигателя и уменьшеніи числа оборотовъ сила пружины F получаетъ перевесъ, вращаетъ кольцо съ контактами C въ обратную сторону и размыкаетъ фазовую обмотку.



Фиг. 83.



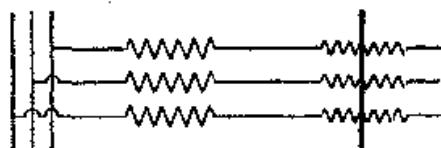
Фиг. 84.

Ту же цѣль преслѣдуютъ и двигатели съ роторами со встрѣчнымъ включеніемъ (Сименсъ и Гальске) (фиг. 84). Каждая фаза обмотки представляетъ замкнутую цѣль Oab . Обмотка b имѣеть настолько большое сопротивленіе, что общее сопротивленіе $a+b$ даетъ необходимый врачающей моментъ, или обмотки a и b включены навстрѣчу, такъ что дѣйствуетъ только разность эл.-дв. силъ. Но достижениіи опредѣленного числа оборотовъ обмотки присоединяются къ точкамъ S_1 , S_2 и S_3 замыкателя или отъ руки по фиг. 82, или автоматически по фиг. 83. Вслѣдствіе этого обмотки a и b включены паралельно, и сопротивленіе каждой фазы равно $\frac{ab}{a+b}$.

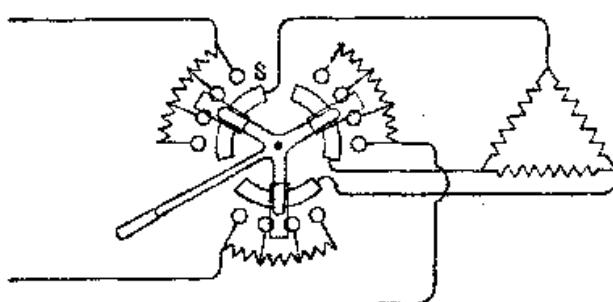
Двигатели съ роторами съ двойными обмотками того и другого типа даютъ при пускѣ въ ходъ два толчка тока: первый въ моментъ включенія двигателя и второй при замыканіи ротора на короткое. Толчки эти были бы очень велики при большихъ двигателяхъ, а потому подобные приспособленія употребляются лишь при двигателяхъ средней мощности. Ихъ выгода заключается въ томъ, что при примененіи центробѣжнаго регулятора они не требуютъ никакого обслуживания.

¹⁾ Немногомъ менѣе нормальнаго. // рим. ред.

Въ тѣхъ случаяхъ, когда должно быть выполнено второе требование, именно, уменьшениe потребленія тока, следовательно, гдѣ пускъ происходит безъ нагрузки, могутъ примѣняться и большиe двигатели съ короткозамкнутымъ роторомъ. Для уменьшения толчковъ тока при включеніи употребляются реостаты въ цѣпи статора. Ихъ роль уменьшить первичную эл.-дв. силу на величину паденія напряженія въ нихъ. По ур. (32) началь-ный вращ. моментъ пропорционаленъ квадрату первичного тока, а следовательно, если сопротивление подобрано такъ, что при включеніи его получается половина того тока, который бы былъ бы безъ реостата, то начальный вращ. моментъ получается въ че-тыре раза меньшій. При двигателяхъ съ единенiemъ обмотки статора звездой и доступной нейтральной точкой можно при-мѣнить реостаты фиг. 78—80. Въ этомъ случаѣ они включаются между обмоткой и нейтральной точкой (фиг. 85). Нейтральная точка находится въ реостатѣ. Въ двигателяхъ съ недоступной нейтральной точкой или съ со-единенiemъ фазъ треугольни-комъ реостатъ включается пе-редъ двигателемъ, и фазы въ рео-стать должны оставаться изолированными другъ отъ друга и послѣ замыканія ротора на короткое (фиг. 86). Токъ каждой фазы проходитъ отъ соответствующаго контакта черезъ контактную щетку къ контактной полосѣ S къ статору двигателя. Въ та-кихъ случаяхъ вместо безъиндукционныхъ сопротивлений мо-гутъ быть примѣнены въ качествѣ реостатовъ для статора и



Фиг. 85.



Фиг. 86.

реактивныe катушки, такъ какъ адѣсъ необходимо лишь умень-шить приложенное къ статору напряженіе. Ошибочно было бы употреблять индукционные сопротивления для включевія въ цѣпь ротора, такъ какъ увеличивая самоиндукцію вторичной цѣпи двигателя мы уменьшаемъ его наибольшій врачающей мо-ментъ и начальный вращ. моментъ (см. форм. 30 и 33).

Кромѣ безъиндукционныхъ и индукционныхъ сопротивлений для цѣлей пониженія напряженія приложенного къ статору

могутъ быть примѣнены и трансформаторы. Трансформаторъ можетъ быть и секціонированный. По достижениіи опредѣленнаго числа оборотовъ двигатель присоединяется непосредственно къ сѣти, а трансформаторъ выключается.

Уменьшеніе пускового тока пониженіемъ напряженія можетъ быть произведено еще слѣдующимъ образомъ. Двигатель, который при нормальной работе имѣеть соединеніе обмотокъ статора треугольникомъ,пускаютъ въ ходъ при соединеніи звѣздой и, по достижениіи соответственнаго числа оборотовъ, переключаютъ на соединеніе треугольникомъ. Если, напр., двигатель включается на 190 в. треугольникомъ, то фазное напряженіе равно 190 в. Если соединить его звѣздой, то при включеніи на сѣть съ напряженіемъ въ 190 вольтъ фазное напряженіе равно только 110 вольтамъ. Сила тока такимъ образомъ

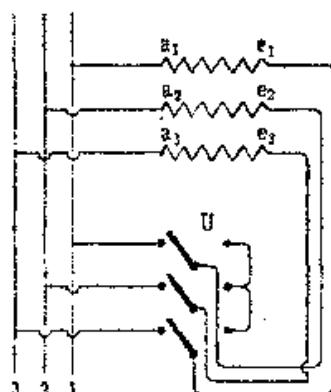
уменьшится въ отношеніи $\frac{190}{110}$, а начальный вращающій мо-

ментъ уменьшится въ квадратъ этого отношенія. Такое пересоединеніе производится трехполюснымъ переключателемъ U (фиг. 87). При пускѣ въ ходъ онъ включается направо и производить соединеніе статора звѣздой. Когда двигатель достигъ нормальнаго числа оборотовъ переключатель врубается нальво.

Обратно, пускъ въ ходъ при соединеніи треугольникомъ примѣняется тогда, если требуется получить больший начальный вращающій моментъ чѣмъ нормальный, а величина пускового тока не имѣеть значенія. Въ данномъ случаѣ двигатель, работающій нормально при соединеніи звѣздой, для пуска въ ходъ включается треугольникомъ. Теперь фазное напряженіе въ 1,73 раза больше, токъ растетъ въ этомъ же отношеніи, а вращающій моментъ — въ квадратъ отношенія.

Очевидно, что повышеніе напряженія въ цѣляхъ увеличенія начального вращающій момента можетъ быть достигнуто и трансформаторомъ. По достижениіи требуемаго числа оборотовъ двигатель присоединяется къ сѣти, а трансформаторъ выключается.

Каждый двигатель требуетъ определенного времени для достижениія нормальнаго числа оборотовъ, при прочихъ равныхъ условіяхъ, чѣмъ большаго времени, чѣмъ больше моментъ инерціи ротора. Съ другой стороны необходимъ чѣмъ больший вращающій моментъ, чѣмъ большее ускореніе требуется дать ротору, т.-е. чѣмъ быстрѣе онъ долженъ достигнуть нормальной скорости. Поэтому въ цѣляхъ наименьшаго потребленія тока недостаточно только включить въ роторъ реостатъ, но



Фиг. 87.

необходимо включать его медленно и постепенно, чтобы дать время установиться соответствующимъ данному сопротивлению оборотамъ. Въ такихъ случаяхъ полено имѣть въ первичной цѣпь амперметръ и слѣдить за тѣмъ, чтобы сила тока не превосходила определенного предѣла. Ручка реостата передвигается дальше, послѣ того какъ сила тока начнетъ падать. Опытный монтеръ производить правильный пускъ въ ходъ и безъ амперметра. Чтобы не зависѣть отъ надежности персонала, снабжаютъ реостатъ червячной передачей, такъ что на передвиженіе его рычага съ одного контакта на другой требуется слѣдить ручкой передачи нѣсколько оборотовъ.

Иногда, когда требуется обеспечить возможно меньшіе толчки тока при пускѣ въ ходъ примѣняютъ два реостата: въ роторъ и въ статоръ, соединяя ихъ въ одинъ аппаратъ, такъ что при вращеніи ручки сначала выключается постепенно сопротивление въ статорѣ, а затѣмъ — въ роторѣ.

Лучшимъ способомъ пуска въ ходъ двигателя съ большими начальными моментомъ можно считать пускъ въ ходъ при пониженній частотѣ питающаго двигателя тока. Какъ мы видѣли въ главѣ 9 (ур. 33—35) начальный моментъ обратно пропорционаленъ числу периодовъ подводимаго тока. Къ еожалѣнію, уменьшеніе числа периодовъ возможно только въ рѣдкихъ случаяхъ, именно, когда генераторъ работаетъ только на одинъ или нѣсколько двигателей, пускаемыхъ одновременно въ ходъ, или, если существуетъ запасная машина, на которую двигатели могутъ переключаться при пускѣ. Въ этомъ случаѣ роторъ замыкается на короткое (если онъ вообще не коротко замкнутый) и генератору дается нормальное возбужденіе. Какъ только генераторъ начнетъ вращаться онъ посыпается въ двигатель токъ короткаго замыканія, приближительно равный нормальному, такъ какъ ваттное сопротивление неподвижного двигателя съ коротко - замкнутымъ роторомъ очень мало сравнительно съ безваттнымъ.

Послѣднее измѣняется пропорционально числу периодовъ, какъ и эл.-дв. сила, такъ что токъ короткаго замыканія, при одинаковомъ возбужденіи генератора, мало зависитъ отъ периодовъ съ увеличеніемъ числа оборотовъ генератора, т. е.. числа периодовъ, сила тока и врашающей моментъ падаетъ, а эл.-дв. сила возрастаетъ. Двигатель все это время находится вблизи синхронизма.

Двигатели, которые должны при пускѣ въ ходъ преодолѣвать большой моментъ инерціи, и мощность которыхъ лишь не многимъ меньше мощности генератора, невозможно пускать въ ходъ при полномъ возбужденіи послѣдняго. Въ такомъ случаѣ пускаютъ генераторъ тихимъ ходомъ (1—2 оборота въ сек.), а затѣмъ возбуждаютъ его. Если имѣется особый генераторъ для пуска въ ходъ, то по достижениіи двигателемъ нормального числа оборотовъ его переключаютъ на рабочий генераторъ.

При большихъ двигателяхъ высокаго напряженія въ цѣль статора иногда включаются реостаты съ цѣлью защиты отъ возможныхъ перенапряженій при включеніи и выключеніи. Явленія, сопровождающія размыканіе цѣпи переменнаго тока, не вполнѣ аналогичны явленіямъ при размыканіи цѣпи постояннаго тока. При размыканіи появляется вольтова дуга, которая по мѣрѣ удаленія kontaktовъ другъ отъ друга быстро ослабѣваетъ и прекращается при переходѣ тока черезъ нуль, такъ какъ при слѣдующемъ возрастаніи онъ не въ состояніи пробить слой воздуха. При размыканіи же тока во время его прохожденія черезъ нуль перенапряженіе не можетъ быть. Послѣднее получается, если размыканіе совершается въ тотъ моментъ, когда токъ имѣеть максимумъ или близокъ къ нему. Но и въ такомъ случаѣ перенапряженіе возможно лишь тогда, когда токъ настолько слабъ, что не образуетъ вольтовой дуги. Кромѣ того перенапряженіе можетъ явиться слѣдствіемъ заряднаго тока, такъ какъ обмотки высокаго напряженія, вслѣдствіе тщательной изоляціи ихъ отдѣльныхъ фазъ другъ отъ друга и отъ желѣзного остова, обладаютъ не малой емкостью. Появленіе подобныхъ перенапряженій можетъ быть устранено, если включение или выключение производить не мгновенно, а постепенно, при помощи безындукціоннаго (жидкаго реостата). Для этой цѣли можно также примѣнять и регулируемыя реактивныя катушки, если нѣть опасности появленія резонанса между увеличенной самоиндукціей двигателя и емкостью кабелей линіи. Во всѣхъ подобныхъ случаяхъ желательно примѣнять предохранители напряженій.

Перенапряженія можно избѣжать и включениемъ и выключениемъ обмотки статора при коротко-замкнутомъ роторѣ. Этимъ устраивается мгновенное измѣненіе магнитнаго состоянія, такъ какъ токъ въ роторѣ производить обратное току статора намагничивающее дѣйствіе. Кромѣ того, вслѣдствіе взаимной индукціи между роторомъ и статоромъ получается уменьшеніе самоиндукціи и увеличеніе ваттнаго сопротивленія двигателя съ замкнутымъ роторомъ. Для того, чтобы при такомъ включении двигатель не потреблялъ полнаго тока короткаго замыканія, замыкаютъ роторъ при включении не на короткое, а черезъ нѣкоторое сопротивленіе. Обычно въ качествѣ такого сопротивленія употребляется пусковой реостатъ, на которомъ устанавливается упорный штифтъ, такъ что размыкать совершенно ротора нельзя, а можно лишь ввести полное сопротивление реостата. При этомъ, однако, при выключении для остановки двигателя требуется выключать цѣль статора.

Такой способъ включения примѣнимъ, очевидно, и для трансформаторовъ. Включивъ во вторичную цѣль трансформатора до включенія его въ сѣть, напримѣръ, нѣсколько лампочекъ накаливанія, мы можемъ по ихъ каленію въ моментъ включенія трансформатора въ сѣть наблюдать повышение напряженія.

24. Регулирование числа оборотовъ.

Главный недостатокъ асинхронного двигателя сравнительно съ шунтовымъ двигателемъ постоянного тока состоять въ томъ, что для первого не существуетъ простого способа регулирования числа оборотовъ въ широкихъ предѣлахъ. Такъ какъ асинхронные двигатели стремятся вращаться синхронно съ поlemъ и отстаютъ отъ него лишь на величину скольженія, то изменение числа оборотовъ возможно только или изменениемъ числа периодовъ подводимаго тока, т. е. числа оборотовъ поля, или изменениемъ скольженія.

Первый способъ возможенъ при присоединеніи двигателя или двигателей къ особому генератору, число оборотовъ которого можно изменять. Регулированіе будетъ происходить одновременно для всѣхъ двигателей. Увеличить скольжение, какъ видно по форм. (9), можно только увеличеніемъ вторичныхъ потерь, что достигается увеличеніемъ сопротивленія цѣпи ротора. Но съ этимъ связано и понижение коэффициента полезнаго дѣйствія. При этомъ размѣры регулировочнаго реостата должны быть достаточны для отвода всей теплоты, въ немъ развивающейся. Обычные пусковые реостаты этому условію не удовлетворяютъ. Включеніе беззатратнаго сопротивленія въ роторъ не достигаетъ цѣли, такъ какъ, по уравн. (9), увеличеніе скольженія достигается лишь увеличеніемъ потерь во вторичной цѣпи. Увеличеніе самоиндукціи влечетъ за собой лишь уменьшеніе врашающаго момента.

Нераарывно связанныя съ увеличеніемъ скольженія потери могутъ быть устраниены, если токъ ротора отвести не въ реостатъ, а въ другой двигатель, соединенный съ первымъ и работающий съ нимъ на ту же нагрузку. Получается такъ называемое каскадное включеніе двигателей, примѣняемое въ некоторыхъ случаяхъ (электрическія жел. дороги, прокатные станы и т. п.).

Такимъ образомъ возможно уменьшить число оборотовъ двухъ каскадомъ соединенныхъ двигателей вдвое сравнительно съ тѣмъ, которое они имѣли бы, будучи приключены непосредственно къ сѣти. При одинаковой мощности каскадная система развиваетъ двойной вращающий моментъ сравнительно съ вращающимъ моментомъ каждого двигателя въ отдельности, такъ какъ число оборотовъ пѣтъ при этомъ вдвое меньшее.

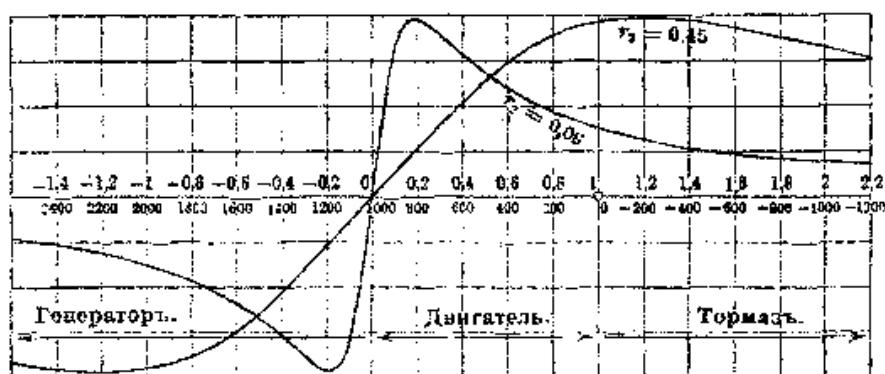
Изменение числа оборотовъ вдвое достигается также переключенiemъ обмотки статора на половинное число полюсовъ. По уравненію 1 число оборотовъ поля, къ которому стремится роторъ, будетъ $n_1 = \frac{c_1}{p}$, т. е. синхронное число оборотовъ при постоянномъ числѣ периодовъ обратно пропорционально числу паръ полюсовъ. Проще всего переключеніе на

половинное число полюсовъ производится у статоровъ съ кольцевой обмоткой. Но въ этомъ случаѣ коэффиціентъ мощности и вращающій моментъ получаются настолько плохими, что такое устройство на практикѣ не получило примѣненія. Только позже Behn - Eschenburg'у удалось въ двигателяхъ завода Эрликона получить практическіи пригодное переключеніе барабанной обмотки и не только на половинное, но и на промежуточное число оборотовъ.

Асинхронная машина въ необычныхъ условіяхъ работы.

25. Асинхронная машина въ качествѣ генератора.

Въ главѣ 8 фиг. 14 представлена зависимость вращающаго момента асинхронного двигателя отъ скольженія (согласно ур. 26) только для положительныхъ величинъ скольженія. Если по тому же уравненію вычислимъ вращающіе моменты и для отрицательныхъ скольженій s , то получимъ отрицательную вѣтвь кривой изображенную на фиг. 88 влево отъ оси ординатъ. Но если вращающій моментъ M отрицателенъ, то отрицательной должна быть и электрическая мощность W_1 , такъ какъ она, по уравн. (6), равна $\omega_1 M$. Далѣе по уравн. (38), слѣдуетъ, что при отрицательномъ скольженіи и механическая мощность, передаваемая



Фиг. 88.

на валъ, также отрицательна, такъ какъ вращающій моментъ M отрицателенъ, а разность $1-s$ положительна. Такимъ образомъ теперь всѣ соотношенія противоположны тѣмъ, которые были при положительной величинѣ скольженія, другими словами, машина не доставляетъ больше механической мощности, а ей должна быть таковая сообщена для вращенія ротора съ отрицательнымъ скольженіемъ. Наоборотъ машина доставляетъ

электрическую мощность, т. е. она посыпает токъ въ цѣль. Изъ определенія скольженія

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$$

следуетъ, что оно отрицательно, если $\omega_2 > \omega_1$, т.-е. если вращать роторъ винѣшней силой быстрѣе магнитнаго поля. Такимъ образомъ асинхронная машина при скорости выше синхронной работаетъ генераторомъ. Ея вращающій моментъ теперь отрицательный, измѣняется по абсолютной величинѣ своей такъ же, какъ при работе двигателемъ. Частота тока, посыпаемаго въ сѣть такимъ генераторомъ та же, что и частота въ сѣти. Если бы этого не было, то токъ генератора и токъ сѣти интерферировали бы, т.-е. токъ шелъ бы попрерывно путь машины въ цѣль и обратно. Но токъ путь сѣти въ машину не можетъ идти, такъ какъ вращающій моментъ отрицателенъ, а следовательно частота тока генератора должна быть одинакова съ частотой сѣти, независимо отъ числа оборотовъ ротора. Такимъ образомъ генераторъ находится въ полной зависимости отъ сѣти. Если въ сѣти токъ прекратится, то и машина перестанетъ доставлять токъ. Дѣйствительно; если исчезнетъ вращающееся магнитное поле, т.-е. $n_1 = 0$, то скольжение $s = \infty$. Но при бѣзконечно большомъ скольженіи, вращающій моментъ, по уравн. (26), равенъ нулю.

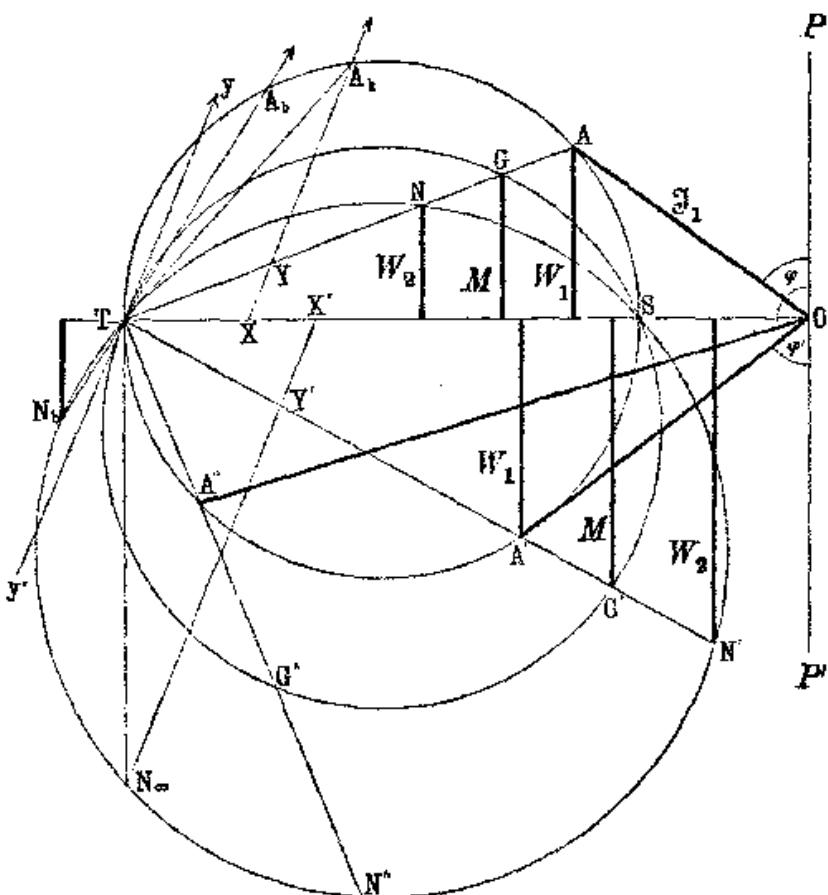
Физически процессъ отдачи тока объясняется такъ же, какъ при шунтовомъ двигатѣль, который мы начали вращать со скоростью большей той, которая у него была при работе двигателемъ. Вѣдьма вращенія ротора въ статорѣ разынвается обратная электродвижущая сила, направленная противоположно напряженію сѣти. Пока число оборотовъ ротора меньше, чѣмъ вращающагося поля, эл.-дв. сила эта меньше напряженія сѣти. Напр вращенія ротора съ большей скоростью обратная электродвижущая сила получаетъ преобладаніе, и токъ идетъ въ сѣть.

Такимъ образомъ въ асинхронномъ генераторѣ только сила тока и мощность, но не число периодовъ тока зависятъ отъ числа оборотовъ и для возможности отдачи изъ тока ему необходима сѣть, опредѣляющая число периодовъ. Подобный генераторъ въ противоположность синхронному можетъ быть включенъ въ сѣть безъ необходимости уравниванія фазъ напряженій и безъ синхронизированія. Если асинхронная машина приключается къ сѣти, вращаясь со скоростью ниже синхронной, то она потребляетъ токъ и работаетъ двигателемъ; будучи же приключена къ сѣти при скорости выше синхронной, она сама посыпаетъ токъ въ сѣть; при синхронизмѣ же она является индифферентной, т.-е. не работаетъ ни двигателемъ, ни генераторомъ, и береть изъ сѣти только токъ для намагничиванія¹⁾.

¹⁾ Это не совсѣмъ правильно: при синхронизмѣ асинхронная машина береть изъ сѣти энергию, необходимую для покрытія потерь въ желѣзе и потерь въ обмоткѣ статора.

Прим. ред.

Соотношение между исѣми величинами, кромъ скольженія, для генератора получается изъ той же круговой діаграммы, если весь трикруга въ ней начертить полностью, какъ сдѣлано на фиг. 89. При холостомъ ходѣ ($s = 0$) точка A (конецъ вектора \mathfrak{J}_1) совпадаетъ съ S , при работе двигателемъ она перемѣщается по верхней части овружности отъ S до A_k , а при работе генераторомъ—по нижней части отъ S черезъ A' до T .



Фиг. 89.

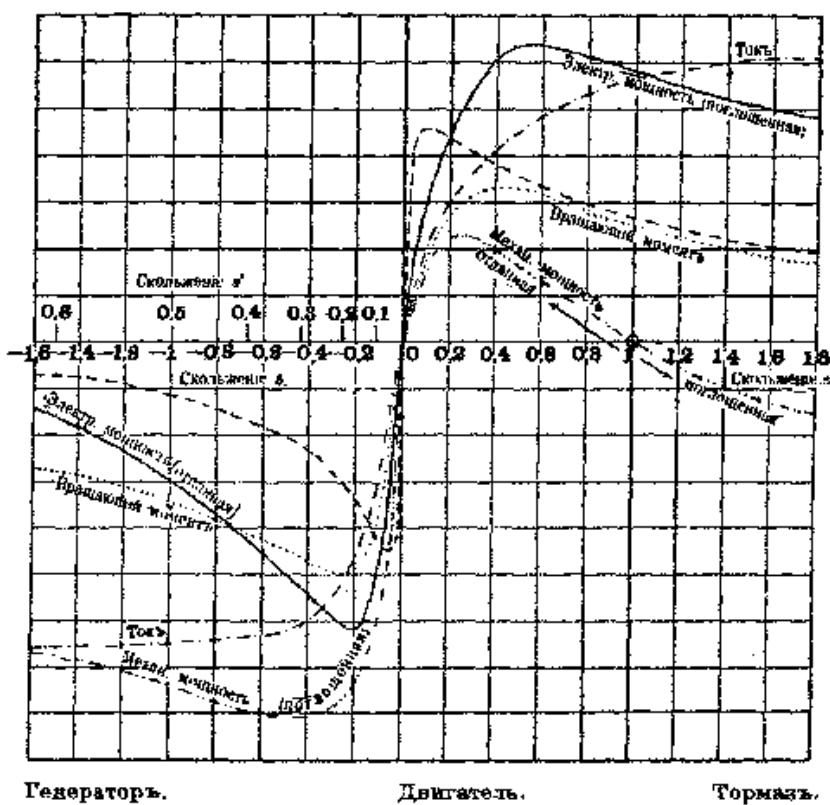
Токъ \mathfrak{J}_1' , посылаемый въ сѣть, изобразится векторомъ $O.A'$, уголъ сдвига его φ относительно приложеннаго къ машинѣ напряженія P больше 90° , откуда и слѣдуетъ, что токъ идетъ въ сѣть. Его электрическая мощность

$$W_1 = P \cdot \mathfrak{J} \cos (180 - \varphi') = -P \cdot \mathfrak{J} \cos \varphi',$$

гдѣ φ' сдвигъ фазъ между \mathfrak{J}_1' и P' . Такъ какъ P' противоположно приложеному къ двигателю напряженію P , то P' пред-

ставляетъ обратную электродвижущую силу машины. Перпендикуляръ, опущенный изъ A' на OT представляетъ какъ и въ двигатель ваттную составляющую тока, или въ соотвѣтствующемъ масштабѣ доставляемую электрическую мощность. Перпендикуляръ M изъ точки G' круга моментовъ даетъ врачающій моментъ. Перпендикуляръ M_2 изъ точки N' круга мощности даетъ механическую мощность (пренебрегая потерями въ желѣзѣ), необходимую для вращенія ротора со скоростью выше синхронной, т.-е. поглощаемую машиной механическую мощность W_2 . Изъ диаграммы видно, что врачающій моментъ имѣеть максимумъ, какъ намъ известно уже изъ фиг. 88.

Коэффиціентъ мощности ($\cos \varphi'$), электрическая и механическая мощности имѣютъ также максимумы. На фиг. 90 показано



Фиг. 90.

измененіе этихъ величинъ въ зависимости отъ скольженія. Но скольжение адѣсъ находится инымъ способомъ, чѣмъ для двигателя, такъ какъ соображенія главы 20 не примѣнимы для нижней части диаграммы, где кругъ электрической мощности лежитъ внутри круга моментовъ, а послѣдній внутри круга механической мощности. Но мы получимъ подобныя же соотношенія, введя вместо скольженія

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_2}, \dots \quad (83)$$

которое отрицательно для выше-синхронного режима, другое скольжение, которое положительно, а именно

$$s' = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2} = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \quad \dots \dots \dots \quad (84)$$

Здѣсь въ знаменатель входитъ не скорость поля ω_1 , а скорость ротора ω_2 . Такъ какъ при такомъ режимѣ работы машины $\omega_2 > \omega_1$, то s' положительно. Введя s' въ выражение для потерь въ роторѣ (ур. 8), получимъ:

$$V = W_1 - W_2 = (\omega_1 - \omega_2) M = -s' \omega_2 M \quad \dots \dots \dots \quad (85)$$

$$V = -s' W_2 \quad \dots \dots \dots \quad (86)$$

Потери здѣсь отрицательны, такъ какъ механическая мощность W_2 сообщается машинѣ, а не получается отъ нея. Изъ равенства (85)

$$M = -\frac{V}{s' \cdot \omega_2} \quad \dots \dots \dots \quad (87)$$

Введя s' въ выражение для W_1 (ур. 6), получимъ

$$W_1 = \omega_1 M = \omega_2 (1 - s') M \quad \dots \dots \dots \quad (88)$$

Для механической мощности сохранимъ тоже выражение (глава 7), а именно

$$W_2 = \omega_2 M,$$

Такъ какъ при выше-синхронномъ режимѣ $s' < 1$ и положительно, то два послѣднія равенства показываютъ, что подводимая механическая мощность W_2 больше отдаваемой электрической W_1 . Равенства (85) и (88) аналогичны равенствамъ (9) и (38) для двигателя.

Чѣмъ быстрѣе вращается роторъ, т.-е. чѣмъ больше ω_2 , тѣмъ ближе s' къ единицѣ; при

$$\omega_2 = \infty \quad s' = 1.$$

Тогда, по ур. (86),

$$V = -W_2 \quad \dots \dots \dots \quad (89)$$

и, по ур. (88),

$$W_1 = 0,$$

т.-е. вся сообщаемая машинѣ механическая мощность превра-

щается въ роторѣ въ теплоту, а отдаваемая электрическая мощность равна нулю. Эти крайніе случаи показываютъ, что къ s' могутъ быть примѣнены тѣ же разсужденія, какъ къ s въ гл. 20, т.-е. что скольженіе s' изобразится прямой $X'N_{\infty}$, параллельной касательной Ty' къ кругу моментовъ по проходящей че-реѣ точку N_{∞} , для которой электрическая мощность равна нулю. Что электрическая мощность въ точкѣ N_{∞} равна нулю слѣдуетъ изъ того, что перпендикуляръ позь этой точки касается круга мощности въ точкѣ T , въ то время какъ подводимая мощность, вся превращаемая въ теплоту, по уравн. (89) равна $N_{\infty} T$. Такъ какъ, по предыдущему, электрическая мощность равна нулю при $s' = 1$, то отрѣзокъ $X'N_{\infty}$ представляеть единицу для скольженія. Раздѣлимъ его на 100 частей и если отрѣзокъ $X'Y'$ равенъ, напр., 12 частямъ, то скольженіе s' для точки N' равно 0,12. Спрашивается, какая связь существуетъ между s и s' . Изъ равенствъ (83) и (84) слѣдуетъ, что для $\omega_2 = \infty$, $s = -\infty$ и $s' = 1$. Такимъ образомъ точкѣ N_{∞} соотвѣтствуетъ безконечно большая скорость ротора и скольжение $s = \infty$. Вообще же получаемъ слѣдующую связь между s и s' :

По уравн. (84)

$$\omega_2 - \omega_1 = \omega_2 s'$$

Подставивъ въ уравн. (83), имѣмъ

$$s = -\frac{\omega_2}{\omega_1} s'$$

Изъ уравн. (83)

$$s = 1 - \frac{\omega_2}{\omega_1},$$

слѣдовательно

$$s = (s - 1) s'$$

Отсюда

$$s' = \frac{s}{s - 1} \quad \dots \dots \dots \quad (90)$$

или

$$s = \frac{s'}{s' - 1} \quad \dots \dots \dots \quad (91)$$

Для предыдущаго примѣра, гдѣ $s' = 0,12$,

$$s = \frac{0,12}{-0,88} = -0,136.$$

Если желаютъ определить связь величинъ W_1 , W_2 , M со скольженіемъ s , то измѣряютъ въ круговой ліаграммѣ s' по

прямой $X'N_{\infty}$ и по послѣднему уравненію вычисляютъ s . Такимъ образомъ получены кривыя фиг. 90. Прарыя части кривыхъ до скольженія $s = 1$ идентичны кривымъ фиг. 22, полученнымъ изъ діаграммы фиг. 77. Части, лежащія вѣво отъ нуля, представляютъ зависимость отъ отрицательного скольженія, т.-е. для выше-синхроннаго режима работы машины. Здѣсь, кромѣ того, нанесены величины s' отъ 0 до 0,6. Въ этихъ кривыхъ приняты во вниманіе и потери на треніе и потери въ желѣзѣ, такъ какъ M и W , измѣрялись не отъ диаметра OT , а отъ параллели A_0L' (фиг. 77). При увеличеніи скорости ротора потери, очевидно, будутъ больше, чѣмъ при синхронной скорости, такъ какъ онърастутъ быстрѣе скорости.

Рассмотримъ еще характерный случай, когда роторъ вращается съ двойною скоростью поля $\omega_2 = 2\omega_1$. Для этого случая $s = -1$ и $s' = 0,5$. Соответствующую этой работе точку найдемъ на діаграммѣ фиг. 89, раздѣливъ пополамъ линію скольженія $X'N_{\infty}$ и проведя черезъ точку дѣленія линію TN'' . Послѣдняя пересѣтъ кругъ электрической мощности въ точкѣ A'' . Векторъ $A''O = S_1''$ есть сила тока, посылаемая при этой скорости въ еѣть.

Какъ было сказано раньше, для включения асинхроннаго генератора въ сѣть совпаденіе фазъ, какъ у синхроннаго генератора, не нужно, и онъ не можетъ выпасть изъ синхронизма. Зато онъ имѣеть весьма важный недостатокъ. Изъ діаграммы и кривыхъ фиг. 90 слѣдуетъ, что его сила тока зависитъ отъ коэффиціента мощности, т.-е. сила тока, посылаемая генераторомъ въ сѣть при опредѣленной скорости ротора, связана съ опредѣленнымъ ствигомъ фазъ. Послѣдний зависитъ не отъ приемниковъ въ сѣти, какъ при синхронномъ генераторѣ, а отъ самой машины. Въ подобномъ генераторѣ нельзя регулировать напряженія, такъ какъ у него нѣть самостоятельнаго возбужденія. Вѣтъстніе этого область примѣненія подобныхъ генераторовъ ограничена. Нельзя устроить самостоятельную станцію съ одними асинхронными генераторами, такъ какъ для нихъ необходима сѣть съ токомъ определенаго числа периодовъ.

Асинхронный двигатель на подъемникѣ можетъ работать генераторомъ при опусканіи груза, если скорость превзойдетъ синхронную. Подобное имѣеть мѣсто при спускѣ съ горы вагона электрической желѣзной дороги съ асинхроннымъ двигателемъ. Благодаря отдачѣ тока въ сѣть, движеніе при этомъ затормаживается.

26. Асинхронная машина въ качествѣ тормаза.

При измѣненіи нагрузки асинхроннаго двигателя отъ холостого хола до остановки, точка A передвигается по верхней части окружности (фиг. 89) отъ точки B до точки корот-

каго замыканія A_k , где $s = 1$. Тепловые потери $V = sW_1$ (ур. 10) при $s = 1$ равны всей подводимой электрической мощности, а механическая мощность равна нулю. Если скольжение больше единицы, что по определению $s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$ будет при отрицательном ω_2 , т.-е. при вращеніи ротора противъ магнитнаго поля, то тепловые потери стануть больше подводимой электрической мощности W_1 . Послѣднее возможно лишь тогда, когда машина сообщается не только электрическая, но и механическая мощность, и обѣ обращаются въ роторъ въ теплоту. Дѣйствительно изъ ур. (7)

$$W_1 = \omega_2 M$$

следуетъ, что при отрицательной угловой скорости ротора ω_2 механическая мощность отрицательна, такъ какъ M по уравн. (26), при положительномъ s , всегда положительно. Это же слѣдуетъ изъ кривыхъ фиг. 88. Итакъ асинхронная машина при скольженіи большемъ единицы дѣйствуетъ какъ поглощающій работу тормазъ. Что скольжение по лѣвой сторону точки A_k больше единицы выражается тѣмъ, что линія скольженія X_A_k должна быть продолжена за точку A_k для пересѣченія съ векторомъ TA_b . Подводимая электрическая мощность выражается для этой точки перпендикуляромъ изъ A_b на OT . Но векторъ TA_b , продолженный въ обратную сторону, пересекаетъ и кругъ механической мощности въ точкѣ N_b . Перпендикуляръ N_b , опущенный изъ этой точки на продолжение диаметра, отрицателенъ и представляеть, следовательно, механическую мощность, которую необходимо затратить для вращенія ротора въ направленіи обратномъ полю, и которая также превращается въ теплоту.

На фиг. 90 вправо отъ скольженія, равнаго единицѣ, показано измѣненіе вращающаго момента, электрической и механической мощностей. Какъ видно, послѣдняя лежитъ ниже оси абсциссъ, такъ какъ въ противоположность работе двигателя, она не отдается, а затрачивается. Изъ диаграммы (фиг. 89) видно, что машина работаетъ тормазомъ влѣво отъ точки A_k до тѣль порь пока векторъ TA_b не совпадаетъ съ касательной Tu къ вругу моментовъ. Въ этомъ случаѣ онъ пересекаетъ линію скольженія въ бесконечности, т.-е. $s = -\infty$. Изъ ур. (26) слѣдуетъ, что для $s = -\infty$ вращающій моментъ $M = 0$.

Случай вращенія ротора противъ вращенія поля встрѣчается на практикѣ, напр., тогда, когда врановыи двигатель не можетъ далѣе поднимать груза, и послѣдний начинаетъ опускаться, или поднимающейся въ гору вагонъ съ асинхроннымъ двигателемъ опускается обратно.

Сопоставивъ все вышесказанное, мы должны различать три режима работы асинхронной машины въ предѣлахъ отъ $s = +\infty$ до $s = -\infty$. На диаграммѣ эти три режима ограни-

чены точками S , A_k и T . На фиг. 90 они ограничены жирно-начерченными ординатами.

Эти режимы суть:

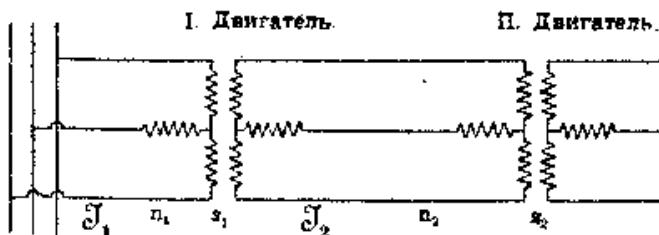
I. При измѣненіи скольженія отъ нуля до единицы, т.-е. при измѣненіи числа оборотовъ ротора отъ синхронизма до нуля, асинхронная машина работаетъ двигателемъ. Она потребляетъ электрическую энергию и доставляетъ механическую.

II. При измѣненіи скольженія отъ $+1$ до $+ \infty$, т.-е. при вращеніи ротора въ направлениі обратномъ полю, она дѣйствуетъ какъ тормазъ. Она потребляетъ электрическую и механическую энергию, превращая ихъ въ тепловую.

III. При измѣненіи скольженія s отъ 0 до $- \infty$ (или s' отъ 0 до 1), т.-е. при измѣненіи числа оборотовъ отъ синхронного выше до $+ \infty$, она работаетъ генераторомъ, потребляя механическую энергию и отдавая электрическую..

27. Каскадное включение асинхронныхъ двигателей.

Въ электрическихъ вагонахъ съ двумя асинхронными двигателями очень часто примѣняется такъ называемое каскадное включение, причемъ только одинъ двигатель получаетъ токъ непосредственно изъ сѣти, второй же—изъ ротора первого. На фиг. 91 представлена схема такого включения.



Фиг. 91.

Если число периодовъ тока, подводимаго къ I двигателю c_1 , а s_1 его скольженіе, то число периодовъ тока, подводимаго къ статору II двигателя изъ ротора I будетъ (по уравн. 5)

$$c_2 = s_1 \cdot c_1$$

Вслѣдствіе электрической связи обоихъ двигателей имъютъ мѣсто слѣдующія соотношенія. Пусть n_1 число оборотовъ поля I-го двигателя, n_2 — его ротора, p_1 — число паръ полюсовъ, то по ур. (4)

$$n_2 = n_1 (1 - s_1),$$

а такъ какъ по ур. (1)

$$n_1 = \frac{c_1}{p_1},$$

то

$$n_2 = \frac{c_1}{p_1} (1 - s_1) \quad \dots \dots \dots \quad (92)$$

Если n_3 — число оборотовъ поля II двигателя, n_4 — его ротора, s_2 — скольженіе, а p_2 — число паръ полюсовъ, то подобнымъ же образомъ

$$n_4 = n_3 (1 - s_2) \quad \dots \dots \dots \quad (93)$$

и такъ какъ

$$n_3 = \frac{c_2}{p_2} = \frac{s_1 c_1}{p_2} \quad \dots \dots \dots \quad (94)$$

то

$$n_4 = s_1 \frac{c_1}{p_2} (1 - s_2) \quad \dots \dots \dots \quad (95)$$

Исключивъ s изъ уравненій (95) и (92), имѣемъ:

$$n_2 = \frac{c_1}{p_1} - \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{n_4}{1 - s_2} \quad \dots \dots \dots \quad (96)$$

Первый членъ правой части равенъ n_1 , а второй преобразуется при помощи равенства (93), тогда

$$n_2 = (n_1 - n_2) \frac{p_1}{p_2} \quad \dots \dots \dots \quad (97)$$

Если числа полюсовъ равны, то

$$n_2 = (n_1 - n_2) \quad \dots \dots \dots \quad (98)$$

Изъ уравненія (96) также слѣдуетъ, что

$$s_2 = 1 - \frac{p_2 n_4}{c_1 - c_1 n_2} \quad \dots \dots \dots \quad (99)$$

Выведемъ соотношеніе между мощностями обоихъ двигателей. Пусть:

W_1 — электрическая мощность, подведенная къ двигателю I,
 W_2 — механическая мощность, отдаваемая двигателемъ I,
 W_3 — электрическая мощность, подведенная къ двигателю II,
 W_4 — механическая мощность, отдаваемая двигателемъ II,
 Γ — потери во вторичныхъ пыняхъ.

Если работаетъ одинъ первый двигатель, то V состоить только изъ тепловыхъ потерь въ цѣли его ротора. При каскадномъ же включеніи, пренебрегая потерями въ мѣди и желѣзѣ, имѣемъ:

$$V_1 = W_3 \dots \dots \dots \quad (100)$$

такъ какъ подводимая ко второму двигателю электрическая мощность W_3 исходить только изъ ротора первого.

По главѣ 7 имѣемъ

$$V_1 = s_1 W_1$$

Подобнымъ образомъ для II двигателя

$$V_2 = s_2 W_3 \dots \dots \dots \quad (101)$$

По уравн. (100)

$$V_2 = s_2 V_1 \dots \dots \dots \quad (102)$$

Далѣе по главѣ 7

$$V_1 = \frac{s_1}{1 - s_1} \cdot W_2 \dots \dots \dots \quad (103)$$

II по аналогіи для II двигателя,

$$V_2 = \frac{s_2}{1 - s_2} \cdot W_4 \dots \dots \dots \quad (104)$$

Изъ уравн. (102) и (103) слѣдуетъ

$$V_2 = \frac{s_1 s_2}{1 - s_1} \cdot W_2 \dots \dots \dots \quad (105)$$

На основаніи двухъ послѣднихъ уравненій имѣемъ

$$W_4 = s_1 \frac{1 - s_2}{1 - s_1} \cdot W_2 \dots \dots \dots \quad (106)$$

Но, какъ известно,

$$s_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{и} \quad s_2 = \frac{n_3 - n_4}{n_3}.$$

Подставляя эти значения въ уравн. (106), получаемъ:

$$\frac{W_4}{W_2} = \frac{n_1 - n_2}{n_3} \cdot \frac{n_4}{n_2} \dots \dots \dots \quad (107)$$

а подставляя сюда ур. (97), получимъ:

$$\frac{W_4}{W_2} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{n_4}{n_2} \dots \dots \dots \quad (108)$$

Такимъ образомъ отдаваемая обоими двигателями мощность $W_2 + W_4$ распредѣляется между ними пропорционально произведеніямъ изъ ихъ числа полюсовъ на число оборотовъ; при равныхъ числахъ полюсовъ — пропорционально числамъ оборотовъ.

Изъ послѣдняго уравненія имѣемъ:

$$n_2 = n_4 \cdot \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{W_2}{W_4} \dots \dots \dots \quad (109)$$

Это значитъ, что при постоянныхъ числахъ полюсовъ, т.-е. для данныхъ двигателей, число оборотовъ I двигателя измѣняется только при измѣненіи оборотовъ II или при измѣненіи отношенія ихъ мощностей.

Если мощности должны быть одинаковы, т.-е., $W_2 = W_4$, то должно быть

$$\frac{n_4}{n_2} = \frac{p_1}{p_2} \dots \dots \dots \quad (110)$$

Другими словами, двигатели развиваютъ одинаковую мощность, если числа ихъ оборотовъ обратно пропорциональны числамъ ихъ паръ полюсовъ. Если числа паръ полюсовъ равны, то двигатели развиваютъ одинаковую мощность при равныхъ числахъ оборотовъ. Подобный случай имѣть мѣсто тамъ, где двигатели работаютъ на одинъ общий валъ, или если они установлены на двухъ сеяхъ вагона съ одинаковыми диаметрами колесъ. Для этого случая ($W_2 = W_4$) изъ уравн. (106)

$$s_2 = 2 - \frac{1}{s_1} \dots \dots \dots \quad (111)$$

или

$$s_1 = \frac{1}{2 - s_2} \dots \dots \dots \quad (112)$$

Это уравненіе устанавливаетъ соотношеніе между скольженіями обоихъ двигателей при равенствѣ чиселъ оборотовъ. Изъ этого уравненія слѣдуетъ, что при $s_1 = 0,5$, т.-е. при $n_2 = \frac{n_1}{2}$, скольжение II двигателя $s_2 = 0$, т.-е. онъ идетъ синхронно, а это возможно только при холостомъ ходѣ. Но такъ какъ по предыдущимъ разсужденіямъ мощности и обороты обоихъ двигателей равны, то первый двигатель долженъ работать въ холостую, несмотря на то, что скорость его равна половинѣ синхронной скорости. Такимъ образомъ такая каскадная система при нагрузкахъ стремится достигнуть числа оборотовъ вдвое меньшаго, чѣмъ для каждого двигателя въ отдельности. Въ

етомъ уменьшениі числа оборотовъ и заключается цѣль каскаднаго включения асинхронныхъ двигателей.

Но и для случая, когда двигатели работаютъ съ неравнымъ числомъ оборотовъ n_2 и n_4 и неравнымъ числомъ полюсовъ, получается уравненіе аналогичное уравн. (112), именно, исключая n изъ уравненій (95) и (96), имѣемъ:

$$s_1 = \frac{1}{1 + \frac{n_2}{n_4} \cdot \frac{p_1}{p_2} (1 - s_2)} \quad \dots \quad (113)$$

Это уравненіе даетъ возможность выразить врачающій моментъ, электрическую и механическую мощности каскадной системы черезъ скольженіе s_1 первого двигателя. Даляе, такъ какъ скорость вращенія поля 1 двигателя опредѣляется по числу полюсовъ и periodовъ тока, то можно найти число оборотовъ всей системы.

Если оба двигателя соединены такъ, что могутъ имѣть лишь одинаковое число оборотовъ ($n_1 = n_2$), то, для синхронизма, изъ послѣдняго уравненія получаемъ:

$$s_1 = \frac{1}{1 + \frac{p_1}{p_2}} = \frac{p_2}{p_2 + p_1}$$

Изъ этого равенства и уравн. (94) слѣдуетъ:

$$n_3 = \frac{V}{p_1 + p_2}$$

и такъ какъ при синхронизмѣ $n_4 = n_3$, то это и есть синхронное число оборотовъ обоихъ роторовъ (теоретический холостой ходъ); для $p_1 = p_2$ имѣемъ $n_4 = n_3 = \frac{V}{2p_1}$.

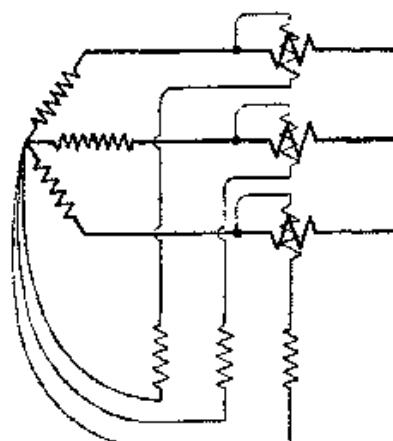
Іспитаніе асинхронныхъ двигателей.

28. Ізмѣреніе электрической мощности и коэффиціента мощности.

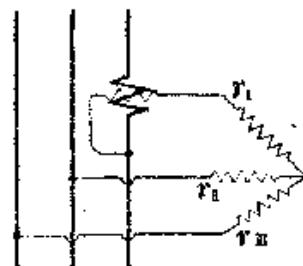
Для опыта определенія коэффиціента полезнаго дѣйствія и коэф. мощности необходимо измѣрить потребляемую двигателемъ мощность. Такъ какъ обычно потребление мощности тремя фазами неодинаково, и особенно въ небольшихъ двигателяхъ, то необходимо имѣть три ваттметра, включаемые по схемѣ чертежа 92, если фазовые обмотки соединены звѣздой.

Измѣряя одновременно фазные токи и напряженія, получаемъ и коэффиціентъ мощности дѣленіемъ мощности одной фазы

на ен вольть-амперы. Если полученные, такимъ образомъ, величины неодинаковы, то для коеф. мощности принимается среднее изъ полученныхъ значеній. При постоянной нагрузкѣ двигателя и при постоянномъ напряженіи на зажимахъ достаточно одного ваттметра, включаемаго последовательно въ каждый изъ проводовъ. При одинаковомъ потреблении мощности въ фазахъ, въ чмъ можно убѣдиться по равенству въ нихъ токовъ и напряженій, достаточно произвести измѣреніе въ одной фазѣ. Равенство только токовъ или только напряженій не служить признакомъ одинакового потребления мощности въ фазахъ. Если сопротивленія вольтовыхъ обмотокъ ваттметра одинаковы (фиг. 92), то нѣть необходимости присоединять ихъ къ нулевой точкѣ двигателя. Соединяя ихъ между собой, мы также получимъ нулевую точку. Этимъ слѣдуетъ пользоваться, если нулевая точка двигателя недоступна, или если фазы его соединены треугольникомъ. Если имѣется



Фиг. 92.



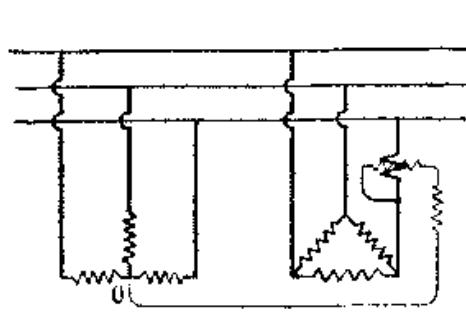
Фиг. 93.

только одинъ ваттметръ, то нулевую точку получаютъ при помощи вспомогательныхъ сопротивлений (фиг. 93). Каждое изъ нихъ (r_h и r_{hi}) должно равняться общему сопротивлению вольтовой обмотки ваттметра и добавочного сопротивлениія (r_1).

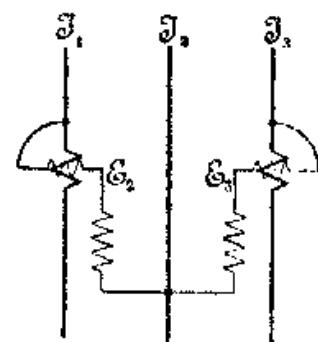
Въ такихъ случаяхъ слѣдуетъ и фазное напряженіе измѣрять, создавая искусственную нулевую точку. По напряженію въ сѣти можно вычислить фазное напряженіе, зная соотношеніе между ними. При синусоидальной формѣ кривыхъ тока и напряженія оно равно 1,732. При соединеніи звѣздой гармоническія третьяго порядка появятся въ линейномъ напряженіи (напряженіе между фазами) лишь тогда, когда нулевые точки генератора и двигателя соединены между собою или замкнуты, что иногда примѣняется при установкахъ высокаго напряженія. Въ противномъ случаѣ эти составляющія пропадаютъ въ самой обмоткѣ генератора и не попадаютъ въ сѣть. Тоже справедливо и для гармониче-

сихъ 9 и 15 порядковъ. Напротивъ члены 5, 7 и 11 порядковъ встрѣчаются вездѣ. Членами еще высшихъ порядковъ по ихъ малости можно пренебречь.

Итакъ, для определенія коэф. мощности необходимо измѣрять фазное напряженіе. Если двигатель не имѣть нейтральной точки, или она недоступна, необходимо примѣнить методъ искусственной нейтральной точки, какъ указано выше. Вместо создания искусственной нейтральной точки можно пользоваться нейтральной точкой приключенного къ той же сѣти двигателя или трансформатора (фиг. 99). Но это допустимо, если въ немъ имѣется действительная нейтральная точка, т.-е. когда въ немъ все три фазы одинаково нагружены, а токъ вольтовой обмотки ваттметра очень малъ сравнительно съ фазнымъ токомъ.



Фиг. 94.



Фиг. 95.

Для измѣрения мощности двигателя съ неравномерной нагрузкой фазъ и неравными напряженіями можно пользоваться методомъ двухъ ваттметровъ (фиг. 95). Мгновенная мощность трехфазного тока

$$w = i_1 e_2 \pm i_2 e_3,$$

гдѣ i и e мгновенные значения соотвѣтственныхъ токовъ и напряженій. Для получения действующихъ значений слѣдуетъ принять во вниманіе сдвигъ фазъ между ними. Такимъ образомъ, полная дѣйств. мощность трехфазного тока

$$W = \mathfrak{J}_1 \mathfrak{E}_2 \cos \alpha \pm \mathfrak{J}_2 \mathfrak{E}_3 \cos \gamma.$$

При этомъ сумма показаний обоихъ ваттметровъ берется при отклоненіи ихъ въ одну сторону, разность же при отклоненіи въ противоположныя стороны. Послѣднее бываетъ, когда уголъ α или γ больше 90° . Если сдвигъ тока относительно фазного напряженія при соединеніи звѣздой равенъ φ , то

$$\alpha = \varphi + 30^\circ \quad \text{и} \quad \gamma = \varphi - 30^\circ.$$

Если α больше 90° , т.-е. φ больше 60° , то соответственный ваттметр дает отклонение в обратную сторону, и его показания слѣдует вычитать из показаний другого ваттметра. Если ваттметры имѣют одностороннюю шкалу, то, при отклонении в обратную сторону, необходимо переключить тонкую или толстую обмотку ваттметра.

Методъ двухъ ваттметровъ примѣнимъ и въ случаѣ различныхъ формъ кривыхъ тока и линейного напряженія, такъ какъ на величину мощности и на показанія ваттметра влияютъ только тѣ гармоническія линейного напряженія, какія имѣются въ токѣ. Для определенія же коэффиціента мощности необходимо измѣрять фазное напряженіе.

Если въ двигателе съ соединеніемъ фазъ звездой нейтральная точка соединена съ таковой же источникомъ тока (генератора или трансформатора) или другого двигателя или если онъ обѣ заземлены, то при не вполнѣ синусоидальной формѣ кривой напряженія методъ двухъ ваттметровъ не примѣнимъ, такъ какъ онъ даетъ невѣрные результаты. Въ этомъ случаѣ въ обмоткѣ двигателя могутъ быть токи высшихъ (8 и 9) порядковъ, которые не учитываются ваттметрами, такъ какъ ихъ неѣть въ линейномъ напряженіи. Въ такомъ случаѣ и измѣреніе однимъ ваттметромъ съ искусственной нейтральной точкой (фиг. 93) даетъ невѣрные результаты, если нейтральная точка не соединена съ землей или съ нейтральнымъ проводомъ. Но при существованіи действительной нейтральной точки неѣть необходимости дѣлать измѣренія по этому способу.

При синусоидальной формѣ кривой и равномѣрной нагрузкѣ фазъ можно вычислить коэффиціентъ мощности по одинимъ показаніямъ двухъ ваттметровъ, не измѣряя тока и напряженія, по слѣдующей формулѣ:

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2} \quad \quad (114)$$

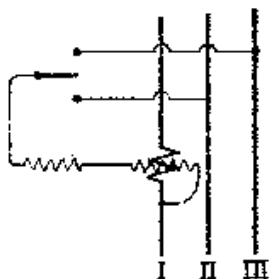
гдѣ x_1 и x_2 показанія ваттметровъ; отсюда

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}.$$

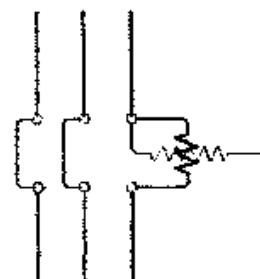
Это соотношеніе справедливо и тогда, когда толстая обмотка включена въ проводникъ 1 (фиг. 96), а тонкая обмотка можетъ переключаться на второй и третій проводники. При отступлениі формъ кривыхъ отъ синусоиды формула (114) даетъ невѣрные результаты. Но имѣ можно пользоваться для определенія отклоненія данной формы кривой отъ синусоиды, сравнивая действительный коэффиціентъ мощности съ вычисленнымъ по форм. (114).

При постоянной нагрузкѣ двигателя методъ двухъ ваттметровъ можетъ быть осуществленъ и при одномъ ваттметрѣ.

переключениемъ его безъ перерыва тока изъ одной фазы въ другую (по схемѣ фиг. 97). Можно также измѣрить однимъ



Фиг. 96.



Фиг. 97.

ваттметромъ послѣдовательно нагрузку трехъ фазъ по схемѣ фиг. 92—93.

29. Опредѣленіе механической мощности и коэффиціента полезнаго дѣйствія.

Опредѣленіе полезной мощности, необходимой для вычи-
сленія коэффиціента полезнаго дѣйствія, производится при по-
мощи тормаза или аналогичнаго механическаго приспосо-
бленія, или соединеніемъ двигателя съ генераторомъ. Иамъряя
электрическую мощность отдаваемую послѣднимъ и принимая
во вниманіе его коэффиціентъ полезнаго дѣйствія, получимъ
полезную мощность двигателя. При соединеніи ременной пере-
дачей нужно установить не существуетъ ли замѣтнаго сколь-
женія ремня. Скольженіе выражается такъ:

$$s = \frac{v_1 - v_2}{v_1},$$

гдѣ v_1 — окружная скорость шкива двигателя, а v_2 — генера-
тора. По уравненію 11

$$V = \frac{s}{1 - s} W_2,$$

получимъ потери V отъ скольженія, причемъ W_2 потребляемая
генераторомъ механическая мощность.

При непосредственномъ соединеніи двигателя съ генера-
торомъ скольженія, очевидно, не существуетъ. Способъ опре-
дѣленія полезной мощности изъ круговой диаграммы опытомъ
короткаго замыканія и холостого хода былъ указанъ въ
главѣ 19. Если короткое замыканіе при нормальному напря-
женіи не осуществимо, вслѣдствіе недостатка источника тока,

то необходимо сдѣлать памѣренія для меньшихъ напряженій, построить кривыя и продолжить ихъ до величинъ, соотвѣтствующихъ нормальному напряженію. Такимъ образомъ очевидно получимъ лишь приближенныя величины (ср. гл. 33).

Большія точныя величины для построенія діаграммы получаются, если вмѣсто короткаго замыканія возьмемъ точку соотвѣтствующую наибольшей нагрузкѣ (фиг. 72). По ней и точкѣ холостого хода можно построить окружность. Кругъ моментаў получится, если отложить отрѣзокъ AH = мощности при этой нагрузкѣ $m_1 \mathfrak{F}_1^2$. Пересѣченіемъ параллели HG съ AP найдемъ точку G , принадлежащую кругу моментовъ. Кругъ мощностей найдется подобнымъ же образомъ постѣ определенія потерь въ мѣди однимъ изъ приведенныхъ въ стѣдующей главѣ способовъ. Отсюда опредѣлится ваттная составляющая тока ротора. Отложивъ отрѣзокъ GP , равный послѣдней (фиг. 74), проводятъ параллель PN . Точка N пересѣченія съ AT принадлежитъ кругу мощностей.

Наконецъ мощность W_n и коэффиціентъ полезнаго дѣйствія можно опредѣлить якожденіемъ отдѣльныхъ потерь. Если при некоторой нагрузкѣ общее потребленіе мощности Q , то полезная мощность, по главѣ 12,

$$W_n = Q - R - G - H - V,$$

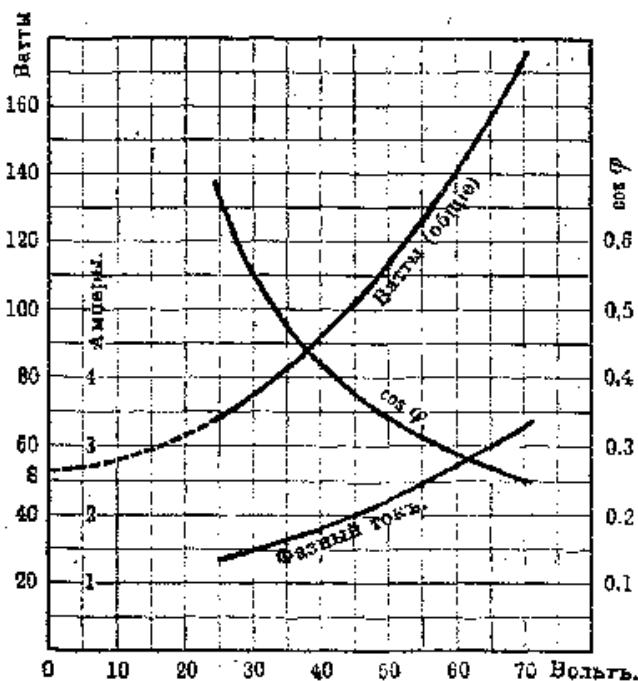
гдѣ R — потери на треніе, G — потери въ желѣзѣ, потери въ мѣди статора H и ротора V . Сумму $R + G$ называютъ потерями холостого хода и онѣ приблизительно равны мощности, потребляемой двигателемъ при холостомъ ходѣ. Опытное определеніе отдѣльныхъ потерь будетъ разсмотрѣно въ стѣдующихъ главахъ, а ихъ вычисленіе въ главахъ 40—42.

30. Потери холостого хода.

Потребленіе энергіи при холостомъ ходѣ складывается изъ потерь R на треніе о воздухъ, въ иодиципникахъ и въ щеткахъ (если онѣ имѣются), потерь въ желѣзѣ статора и ротора G , потерь въ мѣди статора H и въ мѣди ротора V . Потерями холостого хода обычно называютъ только потери на треніе и въ желѣзѣ $R + G$, такъ какъ онѣ при всѣхъ нагрузкахъ, въ предѣлахъ нормальной работы почти постоянны. Потери же въ мѣди $H + V$ при холостомъ ходѣ входятъ въ потери въ мѣди при любой нагрузкѣ, а потому, если учитывать ихъ для холостого хода, то при определеніи потерь въ мѣди для нагрузкокъ слѣдуетъ вычитать потери въ мѣди холостого хода изъ общихъ потерь. Вообще же онѣ такъ малы, что ими можно пренебречь. При расчетѣ двигателя важно знать отдельно потери на треніе R и потери въ желѣзѣ G , такъ какъ онѣ зависятъ отъ различныхъ факторовъ, напр., при шестиполюсномъ и восьмиполюс-

ночь двигателяхъ съ одинаковыми желѣзными массами и при одинаковыхъ магнитныхъ насыщенияхъ потери въ желѣзе одиные и тѣ же, потери же на треніе въ первомъ случаѣ больше, вслѣдствіе большаго числа оборотовъ.

Самый старый способъ раздѣленія потерь состоять въ томъ, что измѣряется мощность, потребляемая двигателемъ при холостомъ ходѣ при постоянной частотѣ тока, но при различныхъ напряженіяхъ отъ нормального вплѣз до такого, при которомъ потребляемая мощность наименьшая, но двигатель еще не останавливается; затѣмъ строится кривая "мощностей" (фиг. 98), которая продолжается до пересѣченія съ осью ординатъ (на черт. пунктиръ).



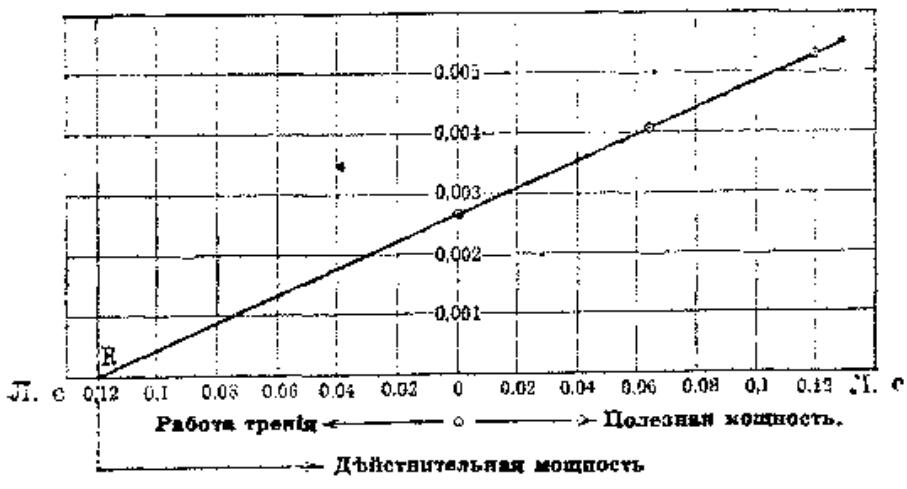
Фиг. 98.

Уменьшеніе расхода мощности происходит вслѣдствіе уменьшенія потерь въ желѣзе съ уменьшеніемъ намагничивания, въ то время какъ потери на треніе почти постоянны, такъ какъ число оборотовъ почти постоянно.

Кривая эта пересѣкаетъ ось ординатъ въ точкѣ S , т.-е. потери OS соответствовали бы холостому ходу двигателя, при напряженіи нуль, при которомъ потерь въ желѣзе не было бы, а были бы лишь потери на треніе. Но опытъ показываетъ, что действительные потери на треніе всегда больше потерь, опредѣленныхъ этимъ способомъ. Причина заключается въ томъ, что потери на треніе непостоянны, а уменьшаются съ уменьшеніемъ напряженія, особенно, если постѣднее станетъ меньше нѣкоторой опредѣленной величины. Но положеніе точки N

зависит непосредственно от нижней части кривой, такъ какъ S получается при ея продолжении. Уменьшение потерь на трение съ напряженiemъ имѣть несолько причинъ. Во-первыхъ, число оборотовъ при напряженіи ниже определенного значительно падаетъ, такъ какъ тогда врачающій моментъ такъ малъ, что трение представляетъ уже замѣтную нагрузку, вслѣдствіе чего скольжение значительно возрастаетъ, во-вторыхъ, вслѣдствіе уменьшения магнитныхъ силъ условія работы подшипниковъ другія, въ-третьихъ, исчезаютъ вибраціи, вызываемыя периодическими намагничиваніемъ. Хотя послѣднія не представляютъ, строго говоря, потерь на трение, но все же должны быть отнесены по существу къ потерямъ механическимъ.

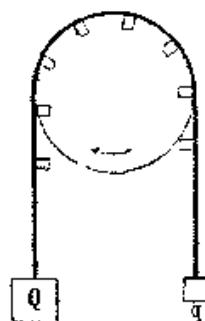
Точно определить потери на трение при нормальныхъ условіяхъ работы можно по слѣдующему способу, предложеному авторомъ. Согласно гл. 12 (Ур. 41—42) при очень малыхъ нагрузкахъ асинхронного двигателя, какъ дѣйствительная мощность W_2 , такъ и врачающій моментъ пропорциональны скольженію. Хотя въ этихъ уравненіяхъ принять во вниманіе только моментъ отъ индуцированныхъ въ роторѣ токовъ, а отъ остаточного магнитизма не учтень, все же пропорциональность остается, такъ какъ, по главѣ 11, врачающій моментъ отъ остаточного магнитизма пропорционаленъ скольженію. Изъ фиг. 21 также видно, что скольжение въ началѣ представляетъ прямую. Положеніе этой прямой можно найти, измѣряя скольжение при холостомъ ходѣ и очень малой нагрузкѣ ($0,064 PS$; $0,12 PS$ на фиг. 99). Нанеся эти точки въ координатной системѣ проводимъ



Фиг. 99.

черезъ нихъ прямую до пересеченія съ осью абсциссъ въ точкѣ R , въ которой скольжение, а значитъ и дѣйствительная мощность, равно нулю. Такъ какъ при холостомъ ходѣ мощность падетъ только на трение, то отрезокъ RO (выѣво отъ нуля) представляетъ дѣйствительные потери на трение въ

масштабъ полезной мощности. Какъ видно потери на трение въ этомъ примѣрѣ, относящемся къ вышеупомянутому двухспальному двигателю, равны $0,12 PS$ или 88 ваттамъ. Измѣреніе полезной мощности и скольженія въ данномъ случаѣ должно произволиться точно. Для измѣренія скольженія едѣдуетъ примѣнить одинъ изъ непосредственныхъ способовъ, указанныхъ въ главѣ 32. Измѣреніе полезной мощности производится при помощи простого тормаза, или посредствомъ ремня или шнура наложенного на шкивъ. Чтобы ремень не соскальзывалъ его необходимо снабдить полосками изъ жести, прикрепленными къ краямъ ремня и выступающими съ боковъ шкива, какъ показано на фиг. 100. Если для равновѣсия тормаза (или ремня) требуется съ одной стороны грузъ G , съ другой Q , то полезная мощность.



Фиг. 100.

гдѣ d —диаметръ шкива, а n_2 —число оборотовъ ротора въ секунду.

Для такихъ измѣреній особенно пригодны индукционные тормаза.

При продолжительныхъ опытахъ слѣдуетъ иметь въ виду, что трение въ подшипникахъ измѣняется съ временемъ, не только постѣ короткой, но и постѣ продолжающейся годами работы. Такія измѣненія сказываются въ особенности по истечениіи короткаго времени, вслѣдствіе нагреванія масла, расширенія подшипниковъ и т. д., такъ что при большихъ двигателяхъ стационарное состояніе достигается часто лишь послѣ 10-ти-часовой работы.

Потери на трение¹⁾ двигателя можно приблизительно определить, приводя его въ движеніе съ нормальнымъ числомъ оборотовъ при помощи небольшого вспомогательного двигателя. При этомъ испытуемый двигатель долженъ быть включено въ нормальное напряженіе, чтобы магнитное состояніе его соответствовало нормальнѣй работе. Для устраненія собственного вращающаго момента обмотка ротора его должна быть разомкнута, такъ что этотъ способъ можетъ быть примененъ лишь къ двигателямъ съ колышками. Если измѣрить мощности потребляемыя вспомогательнымъ двигателемъ при

¹⁾ Такъ называемый методъ выбѣга, основанный на томъ, что двигатель на ходу выключается изъ сѣти и продолжаетъ вращаться, пока его живая сила не будетъ поглощена трениемъ, даетъ первоые результаты, такъ какъ при этомъ отсутствуетъ намагничивание, и окончательный результатъ опредѣляется въ зависимости отъ трения при малыхъ скоростяхъ, между тѣмъ какъ нужна зависимость отъ трения при нормальной скорости. Если же присоединить двигатель къ сѣти, то живая сила будетъ поглощаться не только трениемъ, но и токами Фуко, т. е. результатъ будетъ опять невѣренъ.

его нагрузокъ испытуемымъ двигателемъ и при холостомъ ходѣ, то разность этихъ мощностей представляетъ потери на треніе въ испытуемомъ двигателе. При этомъ, конечно, слѣдуетъ оба двигателя соединить такимъ образомъ, чтобы не было потерь въ самомъ спѣщеніи ихъ.

Вычитая цѣль мощности, идущей на холостой ходъ двигателя при разомкнутомъ роторѣ потери на треніе и потери въ мѣди статора, получимъ потери въ жељѣзѣ (статора и ротора). При описанномъ выше двухсильномъ двигателе на холостой ходѣ расходовалось 160 ваттъ, потери въ мѣдіи статора—5 ваттъ, а потери на треніе 88 ваттъ. Слѣдовательно потери въ жељѣзѣ равны $160 - 5 - 88 = 67$ ваттамъ. Для двигателей съ кольцами потери въ жељѣзѣ можно определить приближенно, размыкая мгновенно пѣнь ротора при холостомъ ходѣ двигателя и замѣчая мощность, потребляемую имъ тотчасъ постѣ размыканія. Мощность эта идеть лишь на покрытие потерь въ жељѣзѣ и потеря въ мѣдіи статора, такъ какъ работа тренія совершается за счетъ живой силы ротора. Потери въ мѣдіи статора могутъ быть вычислены по силѣ тока и сопротивленію обмотки. Определенный этимъ способомъ потери въ жељѣзѣ того же двигателя равнялись 62 ваттамъ.

Такъ какъ роторъ при холостомъ ходѣ вращается почти синхронно съ полемъ, а при нормальной нагрузкѣ имѣеть скольженіе не болѣе 0,08, то число периодовъ тока и потока въ роторѣ очень незначительно. Въ виду того, что потери на гистерезисъ зависятъ отъ первой степени, а на токи Фуко отъ второй степени числа периодовъ, то потери въ жељѣзѣ очень незначительны. Поэтому потери въ жељѣзѣ, измѣренные при холостомъ ходѣ, представляютъ лишь потери въ статорѣ. Потери въ двигателе при разомкнутомъ роторѣ, т.-е., когда онъ находится въ покое, казалось бы, должны бытъ значительно болѣе потерь въ жељѣзѣ при холостомъ ходѣ, такъ какъ частота потока въ роторѣ такъ же велика, какъ и въ статорѣ, но опытъ показать, что въ большинствѣ случаевъ потери эти того же порядка (для данного двигателя 72 ватта), а иногда и меныше, чѣмъ потери при холостомъ ходѣ. Причина въ томъ, что при вращеніи ротора въ зубцахъ происходитъ измѣненіе силы поля съ большой частотой. Индукція наибольшая тогда, когда край зубца статора приходится наль срединой зубца ротора, я—наименьшая при положеніи зубцовъ другъ противъ друга. Если, напр., статоръ имѣеть 48 зубцовъ, то при одиномъ оборотѣ каждый зубецъ ротора пройдетъ мимо 48 зубцовъ статора и, такимъ образомъ, испытаетъ $2 \cdot 48$ перемѣнъ между максимумомъ и минимумомъ. Индукція эта даетъ при 25 оборотахъ въ секунду $2 \cdot 48 \cdot 25 = 2400$ перемѣнъ или 1200 периодовъ намагничиванія. Если роторъ имѣеть 60 зубцовъ, то для зубцовъ статора будемъ имѣть $2 \cdot 60 \cdot 25 = 3000$ перемѣнъ или 1500 периодовъ. Отсюда слѣдуетъ, что потери въ зубцахъ должны быть значительны, несмотря на малый объемъ жељѣза въ нихъ.

31. Определение потерь в мъди.

Для определения потерь в мъди статора $m r_1 \mathcal{E}_1^2$ при любой нагрузке необходимо измерить сопротивление одной фазы обмотки статора r_1 и фазный токъ статора. Такимъ же образомъ можно определить и потери въ мъди ротора $V = m r_2 \mathcal{E}_2^2$, если у него обмотка фазовая. Хотя при включеніи амперметра въ цѣль ротора сопротивление ротора и увеличивается, но сила тока измѣняется отъ этого незначительно, такъ какъ при этомъ увеличивается и скольжение, а значитъ и вторичная эл. движ. сила. Конечно для r_2 нужно считать сопротивление одной обмотки безъ сопротивления амперметра. При малыхъ нагрузкахъ измѣреніе затруднено тѣмъ, что амперметръ слѣдуетъ за измѣнениемъ тока и не даетъ действующихъ значеній. При большихъ нагрузкахъ токъ ротора можно вычислить по формулѣ

$$\mathcal{J}_2 = \frac{\mathcal{E}_1 r_1}{w_2},$$

такъ какъ при этомъ первичные и вторичные ампервитки приблизительно равны между собою. Такимъ образомъ найдемъ, напр. для вышеупомянутаго въ гл. 34 двигателя, кривая котораго изображены на фиг. 20, при нагрузкѣ въ 2 лощ. с., токъ

$$\mathcal{J}_2 = \frac{10 \cdot 10^4}{50} = 20,8 \text{ амп.}$$

Отсюда получимъ масштабъ для вектора \overline{SA} въ круговой диаграммѣ фиг. (70 и 77), посредствомъ котораго для каждой нагрузки можно определить значения \mathcal{E}_2 изъ диаграммы. Тамъ гдѣ подобные способы определенія не примѣнимы, особенно при коротко-замкнутыхъ роторахъ, необходимо определить потери V въ мъди ротора по форм. 10

$$V = s W_1$$

или по форм 11

$$V = \frac{s}{1-s} W_2$$

W_1 —мощность передаваемая статоромъ ротору, т.-е. мощность потребляемая двигателемъ за вычетомъ потерь съ желѣзъ и потерь въ мъди статора, а W_2 —дѣйствительная мощность двигателя (включая потери на треніе). Первой формулой пользуются, когда желаютъ определить потери въ мъди ротора для определенной потребленной двигателемъ мощности, а вто-

рой—когда желаютъ определить V для определенной мощности двигателя.

Напримеръ изъ фиг. 20 по полезной мощности 2 лош. с. найдемъ действительную мощность 2,12 лош. с. Изъ той же фиг. скольженіе равно 0,059 и по послѣдней формулы

$$V = \frac{0,059}{0,941} \cdot 2,12 = 0,186 \text{ лош. с.} = 98 \text{ ватт.}$$

Если исходить изъ передаваемой ротору мощности W_1 , то получимъ потери слѣдующимъ образомъ. Потребленіе энергіи при полезной мощности въ 2 лош. силы по фиг. 20 равно 1800 ваттамъ, потери въ жеѣзѣ, по стр. 103, равны 67 ваттамъ, а потери въ мѣди статора при $\beta_1 = 10$ амп. будутъ

$$3 \cdot 0,186 \cdot 10^2 = 56 \text{ ватт.}$$

Поэтому

$$W_1 = 1800 - 67 - 56 = 1677 \text{ ватт.}$$

и

$$V = 0,059 \cdot 1677 = 99 \text{ ватт.},$$

т.е. результатъ такой же, какъ предыдущій.

Отсюда можно вычислить вторичный токъ, зная сопротивление обмотки ротора (щетокъ и соединительныхъ проводовъ):

$$\beta_2 = \sqrt{\frac{V}{3 r_2}} = \sqrt{\frac{99}{3 \cdot 0,08}} = 20,7 \text{ амп.}$$

Этотъ результатъ согласуется съ найденнымъ выше изъ условия равенства чиселъ первичныхъ и вторичныхъ ампервитковъ.

Если потери въ мѣди ротора нужны лишь для нахожденія коеф. пол. дѣйствія двигателя, то въ вышеприведенные формулы можно подставить вместо W_2 полезную мощность W_n , а вместо W —потребляемую мощность. Происходящая вслѣдствіе этого ошибка вліяетъ на коеффиціентъ полезнаго дѣйствія очень незначительно.

32. Измѣреніе скольженія.

Какъ видно изъ предыдущаго въ измѣреніи скольженія очень важна точность. Согласно главѣ 6

$$\sigma = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

гдѣ n_1 —число оборотовъ поля или синхронное число оборотовъ ротора, а n_2 —его дѣйствительное число оборотовъ. n_1 по-

лучается дѣленіемъ числа періодовъ подводимаго къ двигателю тока на число паръ полюсовъ. Число періодовъ опредѣляется по числу оборотовъ генератора или синхроннаго двигателя, приключеннаго къ той же сѣти. Если это невозможно, то оно опредѣляется частотомъ връмъ. Приблизительно оно можетъ быть опредѣлено по числу оборотовъ напрежащаго двигателя при его холостомъ ходѣ. Число оборотовъ ротора n_2 опредѣляется счетчикомъ. Такое опредѣленіе числа оборотовъ двигателя достаточно точно для опредѣленія мощности двигателя торможеніемъ. Но для опредѣленія скольженія въ двигателяхъ есть болѣшимъ числомъ оборотовъ (свыше 600) такой способъ недостаточенъ, такъ какъ ошибка въ числѣ оборотовъ вызываетъ относительную большую ошибку въ скольженіи. Покажемъ это на примѣрѣ. Синхронное число оборотовъ четырехполюснаго двигателя при 60 періодахъ будетъ 1500 въ минуту. Пусть при нѣкоторой нагрузкѣ опредѣленное счетчикомъ число оборотовъ 1475. Отсюда опредѣляется скольженіе

$$\gamma = \frac{1500 - 1475}{1500} = \frac{25}{1500} = 0,0167$$

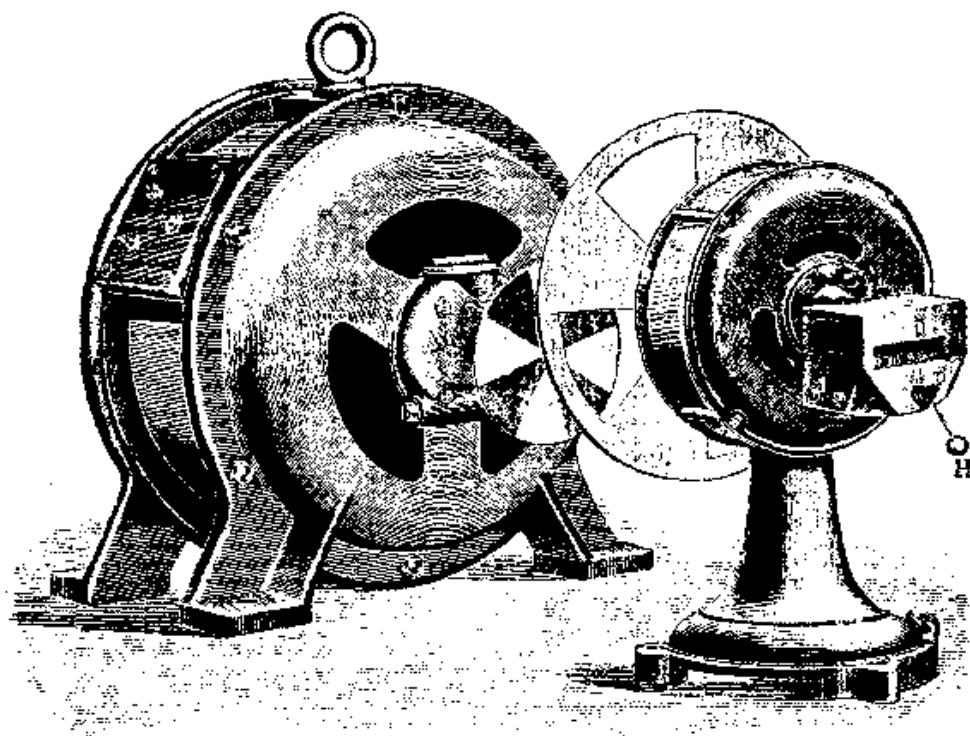
Если дѣйствительное число оборотовъ не 1475, а 1481, т.е. если ошибка въ отсчетѣ числа оборотовъ равна 0,4%, то дѣйствительное скольженіе

$$\gamma = \frac{1500 - 1481}{1500} = \frac{19}{1500} = 0,0127.$$

Слѣдовательно ошибка въ опредѣленіи скольженія равна 25%, въ то время какъ для числа оборотовъ она составляетъ только 0,4%. Поэтому слѣдуетъ измѣрять непосредственно разность числа оборотовъ поля и ротора, не находя отдельно уменьшаемаго и вычитаемаго. Первый способъ, дающій возможность это сдѣлать былъ предложенъ авторомъ и состоять въ слѣдующемъ.

На концѣ вала или на лобовой сторонѣ ротора насаживается дискъ съ бѣлыми и черными секторами и освѣщается вольтовой дугой, питаемой отъ той же сѣти, что и двигатель. Пока роторъ вращается синхронно съ полемъ сектора кажутся неподвижными. Какъ только роторъ начинаетъ отставать, то по известному стробоскопическому явлѣнію, сектора начинаютъ вращаться въ противоположную ротору сторону. Задавивъ какъ-либо вращающуюся роторъ скорѣе поля, мы увидимъ сектора вращающимися уже въ направленіи вращенія ротора. Если стробоскопическое изображеніе повернулось въ минуту на одинъ оборотъ, то роторъ отсталь отъ поля на одинъ оборотъ, т.е. $n_1 - n_2 = 1$. Такимъ образомъ, для опредѣленія скольженія необходимо только сосчитать число оборотовъ стробоскопического изображенія въ единицу времени. Такъ

какъ при наблюденіи числа полныхъ оборотовъ диска легко ошибиться, то лучше всего считать прохожденіе секторовъ че-резъ неподвижную точку пространства. При дискѣ съ четырьмя секторами четыре такихъ прохождения соответствуютъ разности оборотовъ въ единицу. Точнѣе всего измѣрять хронометромъ время, соответствующее опредѣленному числу такихъ про-хожденій. При большихъ скольженіяхъ (больше 0,06) отсчеты при четырехъ секторахъ затруднительны вслѣдствіе быстраго ихъ прохожденій. Въ этомъ случаѣ лучше взять дискъ съ однимъ или двумя секторами. Иногда невозможно измѣрить воль-тову дугу включенной въ одну и ту же сѣть съ двигателемъ не вызывать различія въ напряженіяхъ фазъ трехфазной сѣти.



Фиг. 101.

Тогда для освѣщенія диска можно пользоваться и лампой накаливанія. При этомъ необходимо лишь замѣнить помѣ-щеніе, такъ какъ колебанія сплы свѣта лампы накаливанія незначительны.

На томъ же принципѣ основанъ измѣритель скольженія автора. Онъ состоитъ изъ маленькаго синхроннаго двигателя, который трогается съ мѣста безъ особыхъ приспособленій. На одномъ концѣ его вала находится дискъ съ вырѣзанными секто-рами (фиг. 101), на другомъ счетный механизмъ. Послѣдній приводится въ дѣйствіе червячной передачей и можетъ включаться и выключаться рычагомъ *H*. Къ испытуемому двигателю прикрѣ-

пляется стробоскопический дискъ съ бѣлыми и черными секторами (его можно прильпить къ концу нала воскомъ). Если смотрѣть на него черезъ прорѣзы диска вращающагося асинхроннымъ двигателемъ, то сектора кажутся вращающимися. Число прохождений секторовъ черезъ неподвижную точку пространства можно легко сосчитать и такимъ образомъ опредѣлить разность $n_1 - n_2$. Одновременно по показаніямъ счетчика найдемъ число оборотовъ поля n_1 . Если двигатель счетчика и испытуемый двигатель имѣютъ одинаковыя числа полюсовъ, то отсчетъ по счетчику даетъ непосредственно n_1 . Иначе необходимо его вычислить, прибавивъ во вниманіе отношеніе числа полюсовъ. Число секторовъ диска должно быть выбрано такъ, чтобы произведенія изъ числа полюсовъ двигателя на число секторовъ его диска были для обоихъ двигателей одинаковы. Далѣе простымъ дѣленіемъ получимъ скольженіе; при этомъ способѣ не нужно измѣрять время. Только величины n_1 и $n_1 - n_2$ должны быть определены для одинакового промежутка времени. Для этого при началѣ стробоскопического отсчета включается и счетчикъ. Если дискъ испытуемаго двигателя имѣеть m секторовъ, то число прохожденій нужно раздѣлить на m для получения $n_1 - n_2$; если дискъ имѣеть одинъ секторъ, то число прохожденій даетъ прямо эту разность. Это рекомендуется въ случаѣ большого скольженія, когда отдельные сектора вращаются черезчуръ быстро. Дискомъ съ однимъ секторомъ можно памѣрить скольжение, значительно большее, чѣмъ при всѣхъ другихъ случаяхъ. При очень малыхъ скольженіяхъ, напр. при холостомъ ходѣ двигателя лучше примѣнить дискъ съ числомъ секторовъ большимъ числа полюсовъ и кратнымъ ему, что бы прохожденія слѣдовали быстрѣе и могли быть точнѣе отсчитаны.

Если включить амперметръ съ хорошимъ успокоеніемъ и малымъ моментомъ инерціи подвижной части ротора (между кольцами и пусковымъ реостатомъ), то число колебаний его покажетъ число периодовъ тока ротора. Если это приборъ съ подвижной рамкой для постояннаго тока (типа Цепрѣ-д'Арсонвала), то положительное направление тока вызоветъ отклоненіе вправо, отрицательное — влѣво. Сосчитавъ число отклоненій въ одну сторону, получимъ число периодовъ c_2 тока ротора. Скольжение опредѣлится по ур. (5) $s = \frac{c_2}{c_1}$, где c_1 — число периодовъ тока сѣти. Если примѣнить динамометрический приборъ, то отклоненія послѣдуютъ въ одну сторону. Тогда для определенія числа периодовъ тока ротора слѣдуетъ число отклоненій раздѣлить на два. Такъ же будуть дѣйствовать вольтметръ или амперметръ на малыя силы токовъ или телефонъ, приключенные къ двумъ кольцамъ. Въ телефонъ мы услышимъ каждую перемѣну направленія тока, такъ что ихъ число нужно раздѣлить на два для получения числа периодовъ. Телефонъ можно примѣнить также и при короткозамкнутыхъ роторахъ,

приєднуючи їго къ катушцѣ со многими витками, поміщаемої передъ лобової поверхнѣстю ротора. Поле разсіяння ротора проіндукує катушку і індуктує въ ней токъ съ чи-
сломъ періоду тока ротора.

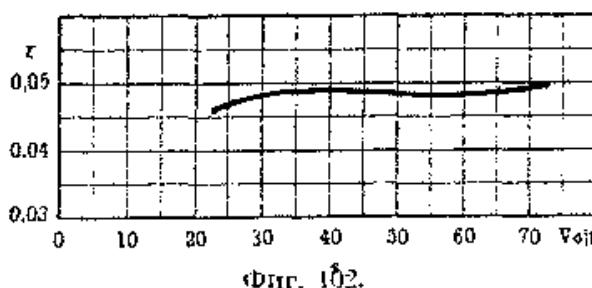
33. Ізміреніе магнітного розсіяння.

Согласно главѣ (17 уравн. 76) магнітное разсіяне т асинхрон-
аго двигателья опредѣляется отношеніемъ отрѣзка $SO : OT$.
Если діаграмма построена по опыту холостого хода и корот-
каго замыкання при по величинамъ токовъ и мощностей, измѣ-
ренныхъ при двухъ различныхъ нагрузкахъ, то : получится
измѣреніемъ соотвѣтствующихъ отрѣзковъ. Способа для не-
посредственного измѣренія этого коэффиціента не существуетъ,
потому что онъ не представляетъ отношенія двухъ дѣйстви-
тельно существующихъ полей. По уравненію (67)

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2.$$

Но въ главѣ 16 τ_1 опредѣляется какъ отношеніе первич-
наго поля разсіяння къ первичному фіктивному полю; подобо-
нымъ же образомъ опредѣляется τ_2 для ротора.

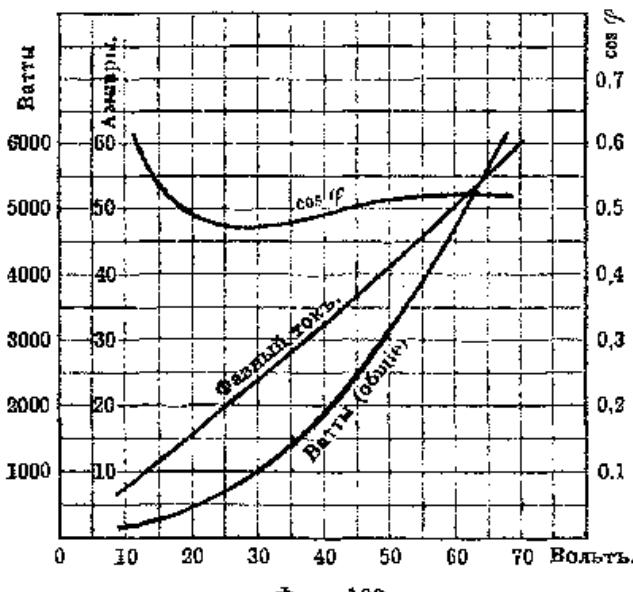
Въ случаѣ большихъ двигателья почти никогда невозможно
произвести опыт короткаго замыкання при полномъ напря-
женіи, потому что съѣть не въ состоянії доставить необходимаго
тока. Поэтому является вопросъ, какую ошибку мы стѣ-
ляемъ, если построимъ діаграмму по опыту короткаго замы-
кання при неполномъ напряженіи и по холостому ходу и опре-
дѣлимъ ная нея коэффиціентъ разсіяння. Отвѣтъ даетъ кривая
фиг. 102, представляющая зависимость коэффи. разсіяння отъ
напряженія. Эта кривая получена построениемъ круговыхъ діа-
граммъ для величинъ взятыхъ изъ кривыхъ холостого хода
фиг. 98 и короткаго замыкання фиг. 103. Какъ видно т измѣ-
няется очень мало между напряженіемъ 35 и 70 вольтъ, илже
же 85 вольтъ онъ быстро падаетъ.



Фиг. 102.

Теперь ясно, что заявленіе о независимости коэффиціента
разсіяння отъ напряженія, высказанное въ главѣ 17, справедливо

лишь приблизительно. Причина этого въ томъ, что въ общее магнитное сопротивление входитъ не только сопротивление между зубьями пространства и каналовъ, но и сопротивление желѣза, особенно зубцовъ. Въ же желѣзѣ магнитная проницаемость измѣняется съ индукцией. Отсюда слѣдуетъ еще, что кривая фиг. 102 для различныхъ типовъ двигателей должна быть различна.



Фиг. 103.

Во всякомъ случаѣ можно утверждать, что между половиной и полнымъ рабочими напряженіемъ коэффиц. разсѣянія настолько постояненъ, что диаграмма, построенная для половины напряженія будетъ справедлива и для полнаго. Для определенія масштаба необходимо знать по крайней мѣрѣ токъ и мощность при холостомъ ходѣ или при какой-либо одной нагрузкѣ.

Расчетъ асинхронныхъ двигателей.

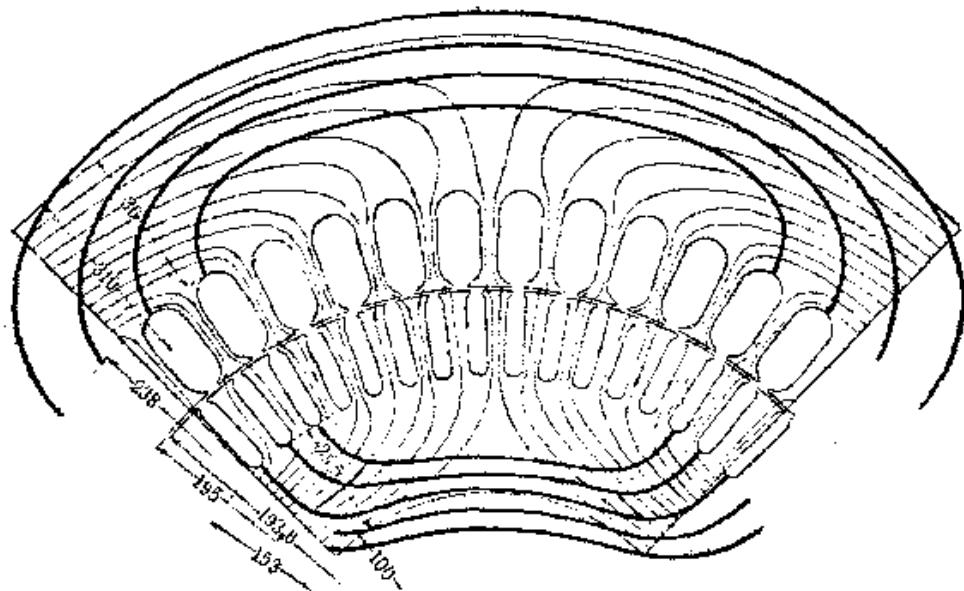
34. Расчетъ магнитной индукціи.

Какъ известно между эл. дв. силой \mathcal{E} , числомъ витковъ катушки n и амплитудой потока єю создаваемаго существуетъ соотношеніе:

$$\mathcal{E} = 4,44 \cdot n \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ вольтъ.}$$

При этомъ предполагается, что потокъ измѣняется синусоидально: $\phi = \Phi \sin \omega t$. Если потокъ не синусоидаленъ, то вместо коэффицента 4,44 войдетъ другой, зависящій отъ формы кри-

вой напряженія. Соотношеніе это справедливо, создается ли поле Φ токомъ рассматриваемой катушки или другими токами. Оно справедливо, поэтому, въ двигатель для потока Φ_1 , выходящаго изъ поверхности одного полюса (Фиг. 104), для вит-



Фиг. 104.

ковъ къ одной фазы одной пары полюсовъ и создаваемой этими катушками эл. дв. силы \mathcal{E} . На пару полюсовъ приходится витковъ

$$w = \frac{w_1}{p} \quad \dots \dots \dots \quad (115)$$

если w_1 —полное число витковъ одной фазы, и p —число паръ полюсовъ. Далѣе:

$$\mathcal{E} = \frac{\Phi_1}{p} \quad \dots \dots \dots \quad (116)$$

гдѣ Φ_1 —эл. дв. сила одной фазы. Подставляя эти величины, получимъ

$$\mathcal{E}_1 = 4,44 \cdot w_1 \cdot \Phi_1 \cdot 10^{-8} \text{ вольтъ.}$$

Такъ какъ каждая катушка состоитъ изъ несколькиихъ частей соотвѣтственно числу каналовъ (на фиг. 104 ихъ четыре), то часть магнитныхъ линій не охватывается внутренними частями катушки. Поэтому постѣднее уравненіе для катушекъ, расположенныхъ въ несколькихъ каналахъ, не вполнѣ точно, и необходимо ввести въ число витковъ, коэффиціентъ k учитывающій это обстоятельство. Нахожденіе этого коэффиціента для различ-

ныхъ чиселъ каналовъ—задача чисто математическая, а потому мы, не приводя самого хода вычислений, дадимъ здесь лишь результаты ихъ:

Число каналовъ на фазу и полюсъ.	k — для трехфазныхъ двигателей.	k — для двухфазныхъ двигателей.
1	1,000	1,000
2	0,966	0,924
3	0,960	0,911
4	0,958	0,906
5	0,957	0,904
8	0,955	0,900

Итакъ,

$$\Phi_1 = \frac{\mathcal{E}_1 \cdot 10^8}{4,44 c k w_1} \quad \dots \quad (117)$$

Примѣнимъ въ дальнѣйшемъ всѣ выведенныя раньше формулы къ примѣру двигателя, размѣры которого даны на фиг. 104. (На чертежѣ они выражены въ мм., въ формулы же входятъ въ см.) Данныя двигателя слѣдующія:

Число паръ полюсовъ $p = 2$,

Число фазъ $m = 3$,

Фазное напряженіе (соединеніе звѣздой) $\mathcal{E}_1 = 66,5$ вольтъ,

Число периодовъ полводимаго тока $c_1 = 50$,

Длина сердечника статора $l = 8,2$ см.,

Число всѣхъ каналовъ $z_1 = 18$ (въ статорѣ), $z_2 = 60$ (въ роторѣ),

Число кан. на фазу и пол. 4 " 5 " " ,

Число проводниковъ на кан. 13 " 5 " " ,

Число проводниковъ на фазу и полюсъ или витковъ на фазу и пару полюсовъ 52 въ статорѣ и 25 въ роторѣ,

Число витковъ на фазу $w_1 = 104$ (въ статорѣ), $w_2 = 50$ (въ роторѣ).

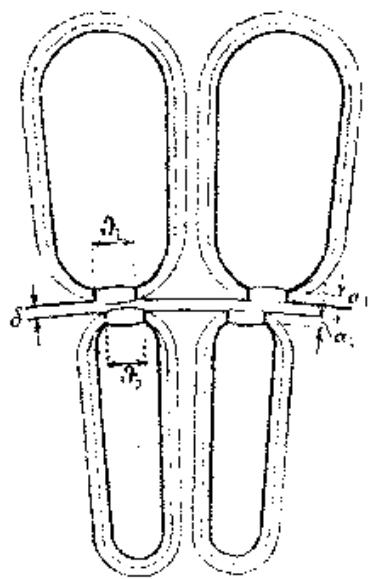
Поэтому

$$\Phi_1 = \frac{66,5 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,958 \cdot 104} = 301000.$$

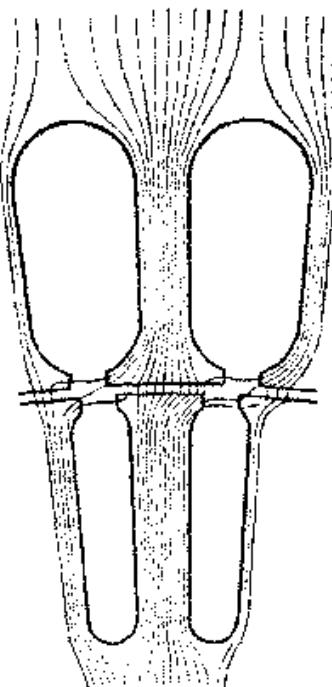
Отсюда получимъ индукцію B_i въ междужелѣзномъ пространствѣ дѣленіемъ потока на соответствующее сѣченіе. Послѣднее равно произведенію изъ дѣйствующихъ длины l и ширины b полюсной дуги. Дѣйствующая ширина дуги равна средней изъ дѣйствующей ширины полюсной дуги статора и дѣйств. ширины полюсной дуги ротора:

$$b = \frac{b_1 + b_2}{2}$$

Действующая ширина получается геометрическим вычитанием изъ постъпинъ не всей ширины Ѹ зазоровъ (между головками зубцовъ) (фиг. 105) а $\theta - b$, где b — длина между железнаго пространства, такъ какъ силовые линіи выходить



Фиг. 105.



Фиг. 106.

изъ зубцовъ, какъ указано на фиг. 106. Если D обозначаетъ внутренній диаметръ статора (или внешній диаметръ ротора), z_1 и z_2 — число каналовъ статора и ротора, $2p$ — число полюсовъ, то

$$b = \frac{\pi D - z (\theta - \delta)}{2p}.$$

Для двигателя съ закрытыми каналами второй членъ пропадаетъ и остается

$$b = \frac{\pi D}{2p},$$

для нашего примера размѣры зазоровъ между головками зубцовъ суть:

$$\begin{array}{ll} z_1 = 0,05 \text{ см.} & z_2 = 0,05 \text{ см.} \\ \theta_1 = 0,3 & \theta_2 = 0,3 \\ \delta = 0,06 \text{ см.} & \end{array}$$

Тогда

$$b_1 = \frac{19,5 \pi - 48 (0,3 - 0,06)}{4} = 12,4 \text{ см.}$$

$$b_2 = \frac{19,38 \pi - 60 (0,3 - 0,6)}{4} = 11,6 \text{ см.}$$

$$b = \frac{12,4 + 11,6}{2} = 12 \text{ см.}$$

Дѣйствующее сѣченіе между желѣзного пространства будетъ:

$$S_t = b \cdot l = 12 \cdot 8,2 = 98 \text{ см}^2.$$

Отсюда индукція въ междужелѣзномъ пространствѣ будетъ

$$B_t = \frac{301000}{98} = 3070.$$

Всѣ эти величины лучше всего собрать въ одну таблицу, что сдѣлано на страницѣ 121.

При этомъ мы оставили безъ вниманія, что не всѣ силовые линіи статора входятъ въ роторъ, а что часть ихъ замыкается между зубцами статора (первичное разсѣяніе). Но, во-первыхъ, число ихъ невелико и, во-вторыхъ, мы дѣлаемъ предположеніе въ неблагопріятную для насъ сторону.

Индукція въ зубцахъ B_z найдется дѣленіемъ потока на дѣйствительное сѣченіе зубца. Статоръ обыкновенно составляется изъ желѣзныхъ листовъ толщиною въ 0,5 мм., оклеенныхъ бумагой толщиною въ 0,05 мм. Значитъ по длине сердечника двигателя десять процентовъ составляетъ немагнитный матеріаль. Такъ какъ желѣзные листы не совсѣмъ одинаковы и обѣ стороны ихъ покрыты слоемъ окисловъ, то изъ геометрической длины вычитаютъ обычно 12% для полученія дѣйствительной длины желѣза. Въ нашемъ случаѣ она равна 7,2 см.

Дѣйствительное сѣченіе зубца статора и именно въ его серединѣ равно ¹⁾

$$S_{z_1} = \frac{21,7 \pi - 1,05 \cdot 48}{4} \cdot 7,2 = 32 \text{ см}^2.$$

и ротора

$$S_{z_2} = \frac{17,3 \pi - 0,5 \cdot 60}{4} \cdot 7,2 = 44 \text{ см}^2.$$

¹⁾ Ширина канала въ статорѣ равна 1,95 см., въ роторѣ 0,5 см.

Поэтому индукция въ зубцахъ статора равна

$$B_{z1} = \frac{301000}{32} = 9400,$$

въ зубцахъ ротора

$$B_{z2} = \frac{301000}{44} = 6850.$$

При вычислениі индукціи въ ярмѣ замѣтимъ, что при выходѣ изъ полюса потокъ раздѣляется пополамъ (фиг. 104). Въ формулы сїченіе ярма (статора) слѣдуетъ взять двойнымъ:

$$S_{k1} = 2 \cdot 3,6 \cdot 7,2 = 2 \cdot 26 \text{ см}^2.$$

и для сердечника ротора:

$$S_{k2} = 2 \cdot 2,65 \cdot 7,2 = 2 \cdot 19 \text{ см}^2.$$

Поэтому индукция въ ярмѣ статора будетъ:

$$B_j = \frac{301000}{2,26} = 5800$$

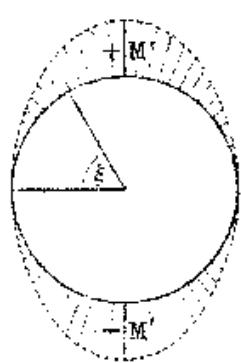
а въ сердечникѣ ротора

$$B_s = \frac{301000}{2,19} = 7900.$$

35. Магнитодвижущая сила асинхронного двигателя.

Въ предыдущей главѣ мы видѣли какъ вычисляется потокъ, выходящій изъ одного полюса. Этотъ потокъ создается магнитодвижущей силой катушекъ двухъ или трехъ фазъ, принадлежащихъ одной парѣ полюсовъ, въ зависимости отъ типа двигателя. Уже въ главѣ 3 было указано, что для достиженія возможно равномѣрнаго результирующаго поля три поля трехфазнаго двигателя должны быть размѣщены такъ, чтобы они отчасти находили другъ па друга. Для этой цѣли катушки должны также находить другъ па друга. Если мы разсмотримъ магнитное поле, создаваемое группой катушекъ, состоящей изъ катушекъ, лежащихъ одна внутри другой, то ясно, что оно будетъ сплошнѣе всего въ серединѣ, а къ краямъ будетъ ослабляться. Въ дальнѣйшемъ будемъ считать, что памѣніе индукціи, а стало быть и магнитодвижущей силы по окружности ротора происходитъ по синусоидѣ, какъ это показано на фиг. 107 для двухполюснаго двигателя.

Пусть M_1 обозначает наибольшую величину магнитодвижущей силы одной фазы, какая бывает въ какой-либо моментъ гдѣ-либо на окружности ротора. Тогда магнитодвижущая сила въ любой точкѣ окружности удаленной отъ точки, где она = нулю, на уголъ ξ будеть



Фиг. 107.

$$m_1 = M_1 \sin \xi.$$

Этимъ уравненiemъ опредѣляется распределеніе магнитодвижущей силы въ пространствѣ. Оно зависитъ отъ геометрическихъ размѣровъ зубцовъ и обмотки, независимо отъ того, постоянно ли M_1 или нѣть. Если магнитодвижущая сила M_1 создается переменнымъ токомъ, измѣняющимся синусоидально во времени, то

$$M_1 = F_1 \sin \omega t,$$

и поэтому $m_1 = F_1 \sin \omega t \sin \xi$.

Такъ опредѣляется магнитодвижущая сила въ любомъ мѣстѣ окружности ротора и въ любой моментъ времени. Это справедливо для одной фазы. Въ случаѣ трехфазного двигателя магнитодвижущія силы, создаваемыя другими двумя обмотками, сдвигнутыми въ пространствѣ на 120° другъ относительно друга, и токи которыхъ сдвинуты на 120° во времени, будуть:

$$m_{ii} = F_2 \sin (\omega t + 120) \sin (\xi + 120)$$

$$m_{iii} = F_3 \sin (\omega t + 240) \sin (\xi + 240).$$

Мгновенное значеніе результирующей магнитодвижущей силы трехъ фазъ будетъ

$$m = m_i + m_{ii} + m_{iii}.$$

Произведя это сложеніе, получимъ¹⁾

$$m = \frac{3}{2} F' \cos (\omega t - \xi),$$

гдѣ $F' = F_1 = F_2 = F_3$, если токи во всѣхъ фазахъ одинаковы.

Амплитуда результирующей магнитодвижущей силы

$$F = \frac{3}{2} F' (118)$$

¹⁾ Пользуясь тригонометрической формулой

$$\sin x \cdot \sin y = \frac{1}{2} \cos (x - y) - \frac{1}{2} \cos (x + y).$$

По основному закону магнитодвижущая сила одной катушки

$$F = 0,4 \pi I w$$

$$\text{и} \quad F = \frac{2}{3} \cdot 0,4 \pi I w = 0,8 \pi I w. \quad \dots \quad (119)$$

Въ нашемъ случаѣ, когда группа катушекъ состоить изъ несколькиихъ частей, уложенныхъ въ отдѣльные каналы, необходимо встанить въ число витковъ коэффиц. k . Для единства обозначеній введемъ въ формулу число витковъ w_1 одной фазы (ур. 115).

Тогда

$$F = \frac{0,6 \pi k I_1 w_1}{p} \quad \dots \quad (120)$$

гдѣ F представляетъ магнитодвижущую силу одной группы катушекъ статора (на пару полюсовъ). Аналогичная формула получится и для ротора.

Если R магнитное сопротивление потоку одной пары полюсъ, то первичная составляющая его \overline{OA} (Фиг. 64), т.-е. первичное фланкое поле будетъ

$$\overline{OA} = \frac{0,6 \pi k I_1 w_1}{R_1 p}$$

Если R_1 —магнитное сопротивление общаго первичнаго поля, то его составляющая будетъ

$$\overline{OG} = \frac{0,6 \pi k I_1 w_1}{R_1 p}$$

При холостомъ ходѣ, когда вторичнаго тока не существуетъ, т.-е. когда двигатель дѣйствуетъ, какъ реактивная катушка

$$\Phi_1 = \frac{0,6 \pi k I_0 w_1}{R_1} \quad \dots \quad (121)$$

гдѣ Φ_1 —дѣйстнительно существующее поле, I_0 —амплитуда намагничивающаго тока и R_1 —сопротивление этому потоку.

Такъ какъ Φ_1 известно изъ предыдущей главы, то можно вычислить токъ намагничения при известномъ R_1 . Вычлененіе послѣдняго указано въ слѣдующихъ главахъ.

Для двухфазныхъ двигателей результирующая магнитодвижущая сила находится слѣдующимъ образомъ.

Для одной фазы какъ и раньше имеемъ

$$m_1 = F \sin \omega t \sin \xi.$$

Для другой фазы свинутой на 90° во времени и въ пространствѣ:

$$m_2 = F \sin (\omega t + 90) \sin (\xi + 90) = F \cos \omega t \cos \xi.$$

Результирующая магнитодвижущая сила

$$m = m_1 + m_2 = F^* (\sin \omega t \sin \xi + \cos \omega t \cos \xi).$$

Это, по известной тригонометрической формуле, даетъ:

$$m = F^* \cos(\omega t - \xi),$$

т.-е. амплитуда результирующей магнитодвижущей силы та же, что и для одной фазы, и поэтому для двухфазного двигателя имѣемъ:

$$\Phi_t = \frac{0,4\pi k I_0 w_1}{R_1 p} \quad \dots \quad (122)$$

36. Коефицієнтъ разсѣяння.

Изъ главъ 17 и 18 известно, что наибольшій коефицієнтъ мощности и круговая диаграмма зависятъ только отъ коефицієнта разсѣяння τ . По уравнению (67) $\tau := \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2$.

Въ главѣ 16 мы вывели связь τ_1 и τ_2 съ магнитными сопротивлениями, но въ предположеніи, справедливомъ только для обычного трансформатора, что магнитодвижущая сила поля разсѣяння и соответствующаго фиктивнаго поля равны. Въ асинхронныхъ двигателяхъ эти магн.-дв. силы не равны. Правда, они создаются тѣмъ же обмотками и токами, но вліяніе этихъ магн.-дв. силъ сказывается различно такъ какъ витки каждой фазы уложены въ несколькиихъ каналахъ. Но это различие можно поглотить въ магн.-дв. спло, а въ сопротивленія потокамъ. Тогда къ этимъ потокамъ могутъ быть примѣнены теоремы Кирхгофа (уравненія 51 и 52). Фиг. 104 представляеть общій потокъ полюса, фиг. 106—потокъ разсѣяння вокругъ канала и при томъ каждый потокъ независимъ другъ отъ друга, что необходимо для вычислениія магнитныхъ сопротивленій. Оба эти потока даютъ результирующій потокъ (фиг. 107), которое въ предѣлахъ статора называется первичнымъ Φ_1 , въ предѣлахъ ротора—вторичнымъ— Φ_2 . Но этотъ результирующій потокъ не имѣть никакого значенія для опредѣленія коефиціентъ разсѣяння τ или v , такъ какъ и въ выраженіе для v (ур. 57) входитъ не действительное существующее поле, а его составляющія GO или HO . Въ предыдущей главѣ мы нашли первичное фиктивное поле

$$\overline{OA} = \frac{0,6\pi k I_1 w_1}{R_1 p},$$

Представленное на фиг. 105 поле разсѣяння канала создается проводниками въ немъ лежащими. Такъ какъ мы обозначили черезъ w_1 —число витковъ на фазу, то $\frac{w_1}{p}$ —число

нитковъ на пару полюсовъ и фазу, или число проводниковъ на полюсъ и фазу, то чиcло линий разсѣянія на пару полюсовъ и фазу равно $\frac{0,4\pi I_1 w_1}{R_n p}$, где R_n — магнитное сопротивление линій разсѣянія вокругъ канала. Поле разсѣянія ¹⁾ на пару полюсовъ для трехъ фазъ будетъ

$$\overline{GA} = 3 \cdot \frac{0,4\pi I_1 w_1}{R_n p} = \frac{1,2\pi I_1 w_1}{R_n p}$$

отсюда

$$\gamma = \frac{\overline{GA}}{OA} = \frac{S}{K R_n} - \frac{1}{2}$$

Сравнивъ это уравненіе съ уравненіемъ (55), видимъ, что магнитное сопротивление поля разсѣянія каналовъ на пару полюсовъ, отнесенное къ магн.-дв. силѣ $0,4\pi I_1 w_1$, равно полупнѣ магнитного сопротивленія вокругъ канала, а именно:

$$R_s = \frac{K}{2} R_n \dots \dots \dots \quad (123).$$

Такимъ образомъ магнитное сопротивление поля разсѣянія каналовъ отнесено къ той же магн.-дв. силѣ, какъ и фиктивное поле. Поэтому къ нему и къ магнитному сопротивленію R общаго поля можно примѣнить законы Кирхгофа. Для двухфазнаго двигателя по главѣ 35

$$\overline{OA} = \frac{0,4\pi I_1 w_1}{R p},$$

Далѣе, такъ какъ всего имѣется двѣ фазы,

$$\overline{GA} = 2 \cdot \frac{0,4\pi I_1 w_1}{R_n p} = \frac{0,8\pi I_1 w_1}{R_n p},$$

отсюда

$$\gamma = \frac{\overline{GA}}{OA} = \frac{R}{K R_n},$$

то есть такъ же какъ и въ трехфазномъ двигателе.

¹⁾ Здесь не имѣть мѣсто взаимное наложеніе трехъ полей, какъ въ общемъ полѣ Φ_1 . Поля разсѣянія каждого канала и каждой фазы слѣдуетъ считать существующими самостоятельно, а потому въ формулу входитъ чиcло фазъ множителемъ.

37. Вычисление магнитных сопротивлений.

Фиг. 104 дает картину общего потока (одного полюса), охватываемого группой катушек. Соответственно магнитное сопротивление R состоит из следующих последовательно включенных частей:

Магнитное сопротивление между железным пространством R_e ,

" " зубцов статора R_{z1}

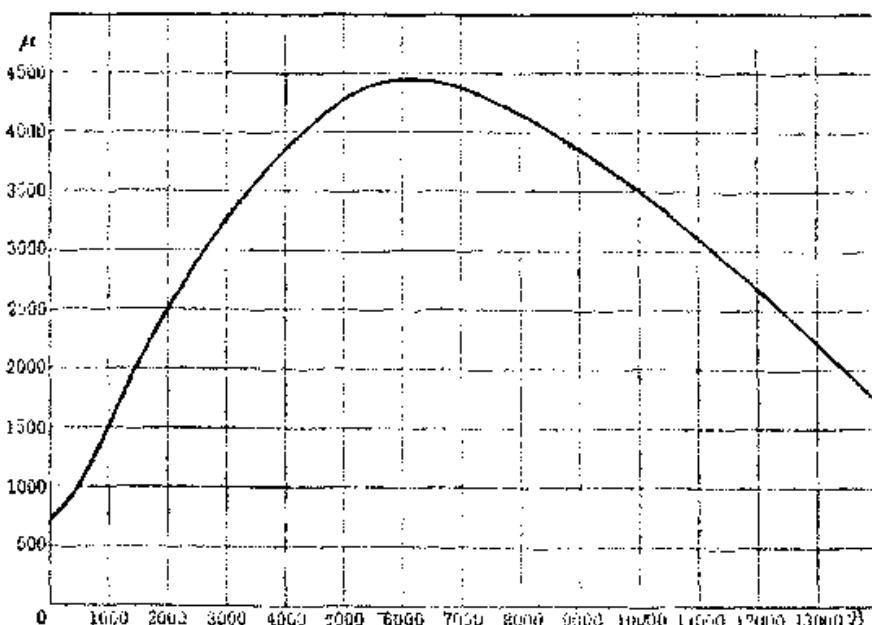
" " зубцов ротора R_{z2}

" " ярма статора R_{k1}

" " сердечника ротора R_{k2} ,

такъ что $R = R_e + R_{z1} + R_{z2} + R_{k1} + R_{k2}$.

Сопротивление каждого участка пути равно соответствующей длины l магнитных линий, дѣленной на его съченіе S и на магнитную проницаемость материала этого участка μ , т.-е. равно $\frac{l}{S\mu}$. Магнитную проницаемость получимъ пъз кривой¹⁾ фиг. 108, соответственно индукціямъ, вычисленнымъ въ пре-



Фиг. 108.

дѣйствующихъ главахъ. Для наглядности составимъ слѣдующую таблицу:

¹⁾ Эта кривая получена изъ опыта для листового желеza, примѣняемаго для изготавленія асинхронныхъ двигателей.

	Съченіе $S=lb$	Индук- ція B	Прони- цаемость μ	Магнитное сопротивление
Междужел. простр. . .	98	3070	1	0,00123
Зубцы статора . . .	32	9400	3700	0,000087
Зубцы ротора . . .	44	6850	4400	0,000021
Ярмо статора . . .	2,26	5800	4450	0,000091
Сердечникъ ротора . .	2,19	7900	4200	0,000063
				$0,001442 = R$

Отсюда получаются магнитные сопротивления отдельныхъ частей пути, которые также внесены въ таблицу.

Слѣдуетъ имѣть въ виду, что магнитные линіи дважды проходятъ черезъ междужелѣзное пространство, потому что каждая образуетъ замкнутую линію, проходящую черезъ два соотвѣтственныхъ полюса. Такимъ образомъ:

$$R_1 = \frac{2 \cdot 6}{lb} = \frac{2 \cdot 0,06}{99} = 0,001305.$$

Точно также магнитные линіи должны два раза пройти черезъ зубцы статора, поэтому ¹⁾)

$$R_{z1} = \frac{2,2,2}{32,3700} = 0,000037$$

и для зубцовъ ротора

$$R_{z2} = \frac{2,2,04}{44,4400} = 0,000021.$$

Въ магнитное сопротивление ярма статора и сердечника ротора слѣдуетъ подставить среднюю длину пути магнитныхъ линій. Послѣдняя получится вычерчиваніемъ картины распределенія магнитныхъ линій, по возможности въ натуральную величину, и ихъ непосредственнымъ измѣреніемъ. Въ нашемъ примѣрѣ имѣемъ для статора приблизительно 21 см., для ротора 10 см.

Это даетъ для статора:

$$R_{k1} = \frac{21}{2,26 \cdot 4450} = 0,000091,$$

¹⁾ Высота зубца статора по фиг. 104 равна 2,2 см., а ротора = 2,04 см.

а для ротора

$$R_n = \frac{10}{2.19.4200} = 0,00063.$$

Сложениемъ этихъ пяти величинъ, внесенныхъ въ таблицу, получимъ магнитное сопротивление общаго поля

$$R = 0,00144.$$

Изъ сравненія отдельныхъ величинъ видимъ, что не выполнѣтъ точныхъ значенія средней длины пути магнитныхъ линій и приближенность кривой проницаемости φ оказываетъ лишь небольшое влияніе на величину R . Но очень важно знать точную величину междужелѣзного пространства и точно воспроизвести вычисленную величину при изготавленіи двигателя, такъ какъ сопротивление междужелѣзного пространства составляетъ наибольшую часть сопротивленія всего пути R . По уравненію (123) магнитное сопротивление полю разсѣянія вокругъ каналовъ на пару полюсовъ

$$R_s = \frac{k}{2} \cdot R_n,$$

гдѣ R_n — сопротивление пути вокругъ одного канала (фиг. 105); оно состоитъ изъ сопротивленія желѣза вокругъ канала и сопротивленія зазора между головками соединительныхъ зубцовъ.

При открытыхъ каналахъ и при закрытыхъ, въ которыхъ мостикъ (между соединительными зубцами) тонокъ, первымъ сопротивлениемъ сравнительно съ постѣднимъ можно пренебречь, такъ какъ магнитная проницаемость желѣза при существующихъ индукціяхъ въ нѣсколько тысячъ разъ больше, чѣмъ воздуха. Напротивъ, оно сильно зависитъ отъ размѣръ зазора. Слѣдуетъ помнить, что при открытыхъ каналахъ магнитные линіи расширяются, такъ что ширина пучка въ зазорѣ, болѣе толщины края головки зубца a_1 или a_2 (фиг. 105). Очевидно, что магнитные линіи расширяются тѣмъ больше, чѣмъ большая ширина ϑ зазора. Поэтому для ширины пучка магнитныхъ линій нужно подставить значение большее a_1 на величину, зависящую отъ ϑ . По опытнымъ наблюденіямъ автора она приблизительно равна $a + \vartheta$. Если l — геометрическая длина желѣза (въ осевомъ направлениі), то магнитное сопротивление потоку разсѣянія вокругъ канала

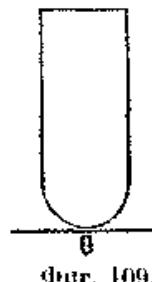
$$R_s = \frac{\vartheta}{(a + \vartheta) l} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (124)$$

Отсюда по уравненію (123) магнитное сопротивление поля разсѣянія вокругъ каналовъ на пару полюсовъ

$$R_s = \frac{k \cdot \vartheta}{2(a + \vartheta) l} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (125)$$

Для двигателей съ закрытыми каналами увеличение толщины α мостика G на величину θ имѣть малое значение (фиг. 109). Сопротивление мостика вычисляютъ (по форм. 122), задавшись въ первомъ приближеніи такой индукціей B въ немъ, для которой $\mu = 1000$. Для найденной величины B можемъ теперь найти болѣе точное значение μ по фиг. 108 и вставивъ въ уравненіе

$$R_s = \frac{\theta}{\mu \alpha l} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (126)$$



Фиг. 109.

Для нашего примѣра размѣры зазора между зубцами линзы на фиг. 106. Отсюда имѣмъ для статора (по уравненію 125)

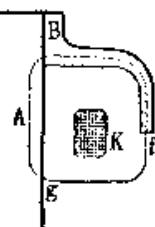
$$R_{s1} = \frac{0,958 \cdot 0,3}{2(6,05 + 0,3)8,2} = 0,0503.$$

Такъ какъ размѣры зазора въ роторѣ тѣ же, то

$$R_{s2} = 0,0503.$$

Кромѣ разсѣянія вокругъ каналовъ существуетъ еще разсѣяніе вокругъ головокъ катушекъ на обѣихъ лобовыхъ поверхностиахъ двигателя. Магнитные линіи, охватывающія эти катушки, создаются той же магн.-лив. силой, которую создаютъ п фиктивныя поля. На фиг. 110-ой показанъ раз-

рѣзъ по головкѣ катушки K ; линія A ограничиваетъ желѣзный сердечникъ статора, а B даетъ разрѣзъ по подшипниковой крылѣкѣ. Тонкая замкнутая линія показываетъ средній путь магнитныхъ линій разсѣянія вокругъ головки катушки. При определеніи сопротивленія этого пути R_k слѣдуетъ принимать во вниманіе лишь сопротивленіе участка fg въ воздухѣ между крылѣкомъ и желѣзнымъ сердечникомъ. Размеры этого пути могутъ быть опредѣляемы пзъ размѣровъ двигателя. Для нашего примѣра сопротивленіе это для обоихъ лобовыхъ частей приблизительно равно ¹⁾



Фиг. 110.

$$R_k = \frac{10}{2,15} = 0,33.$$

¹⁾ Это расстояніе головокъ катушекъ, которое раньше считалось неизменительнымъ, теперь часто переоцѣнивается. Есть авторы, которые считаютъ его одного порядка съ разсѣяніемъ около каналовъ. Нетрудно понять, что это не такъ. Дѣло въ томъ, что путь силовыхъ линій канала составляется изъ воздушного зазора въ нѣсколько миллиметровъ, въ то время какъ путь черезъ воздухъ около головокъ катушекъ

а для ротора, гдѣ подшипниковые крышки не входятъ въ цѣль потока разсѣянія около головокъ катушекъ обмотки ротора

$$R_{k2} = \frac{20}{2,15} = 0,68$$

Такъ какъ потоки разсѣянія около каналовъ и около головокъ катушекъ по отношенію къ обмоткѣ включены параллельно, то общее магнитное сопротивленіе первичного потока разсѣянія будетъ

$$R_1' = \frac{R_{s1} \cdot R_{k1}}{R_{s1} + R_{k1}} = \frac{0,0503 \cdot 0,33}{0,0503 + 0,33} = 0,0437.$$

а сопротивленіе для вторичного потока разсѣянія

$$R_2' = \frac{R_{s2} \cdot R_{k2}}{R_{s2} + R_{k2}} = \frac{0,0503 \cdot 0,66}{0,0503 + 0,66} = 0,047.$$

Если сравнить эти величины съ тѣми же сопротивленіями вокругъ каналовъ, то увидимъ, что влияніе путей вокругъ головокъ катушекъ на общее разсѣяніе не велико, такъ что можно довольноствоваться приближеніемъ расчетомъ R_k .

Изъ этихъ равенствъ получимъ:

$$\tau_1 = \frac{R}{R_1'} = \frac{0,00144}{0,0437} = 0,033$$

$$\tau_2 = \frac{R}{R_2'} = \frac{0,00144}{0,047} = 0,0306$$

и по уравненію (67)

$$\tau = 0,0637.$$

38. Наибольший коэффициентъ мощности; намагничивающій токъ.

Теперь можно по уравненію (77) опредѣлить наибольший коэффициентъ мощности

$$(\cos \varphi)_{max} = \frac{1}{1 + 2 \cdot 0,0637} = 0,89.$$

Измѣренный для того же двигателя значенія этихъ величинъ суть $\tau = 0,0495$ и $(\cos \varphi)_{max} = 0,91$ (см. фиг. 21 и 22).

такъ составляетъ нѣсколько сантиметровъ. Къ тому же около каждого канала дѣйствуетъ полная магн.-дв. сила пучка стержней въ каналѣ, т.-е. въ общемъ въ три раза большая, чѣмъ для одной фазы, между тѣмъ какъ для взаимно сцепляющихся головокъ катушекъ дѣйствуетъ въ общемъ лишь $\frac{1}{2}$ магн.-дв. силы одной фазы, какъ при общемъ полѣ (соответственно уравненію 119).

Видимъ, что вычисленные здѣсь значения для t и $(\cos \varphi)_{\max}$ хорошо согласуются съ действительными, тѣмъ больше если принять во вниманіе, что, во-первыхъ, вычисление производилось безъ помощи опытныхъ коэффициентовъ, и, во-вторыхъ, что даже при самомъ точномъ изготавлении двигателей одного и того же типа значенія для t расходятся въ отдельныхъ двигателяхъ до 15%. Такое различіе въ значеніяхъ для t мало вліяетъ на коэффицієнтъ мощности, такъ какъ наиболѣйшій коэффицієнтъ мощности зависитъ отъ $1 + 2t$, а t никогда не бываетъ больше 0,08.

По формулы (121) получаемъ амплитуду намагничивающаго тока для трехфазного двигателя

$$I_0 = \frac{\rho R_1 \Phi_1}{0.6 \pi k w_1} \quad \dots \dots \dots \quad (127)$$

Раздѣливъ это выражение на коэффицієнти формы кривой, получимъ действующее значение

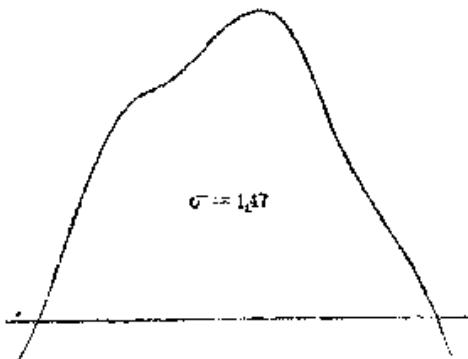
$$\bar{J}_0 = \frac{\rho R_1 \Phi_1}{0.6 \pi k^2 w_1} \quad \dots \dots \dots \quad (128)$$

Для двухфазного двигателя въ эту формулу вводятъ, вместо 0,6 коэффицієнтъ 0,4 (по уравнению 122).

Въ общемъ кривая тока зависитъ отъ кривой приложенного напряженія. Для синусоидальной формы кривой, принимаемой обычно для расчета, фиг. 111 показываетъ форму кривой тока холостого хода, снятую для двигателя нашего примера. Коэффицієнтъ формы кривой $\sigma = 1,47$.

Кривая тока холостого хода вѣдьъ нормальныхъ двигателей имѣеть приблизительно форму кривой фиг. 111 и при синусоидальномъ приложенномъ напряженіи. Для большихъ двигателей, гдѣ междужелѣзное пространство больше, кривая будетъ болѣе пологой, такъ какъ кривая тока реактивной катушки тѣмъ ближе къ кривой напряженія, чѣмъ большее магнитное сопротивленіе путей въ воздухѣ сравнительно съ путями въ желѣзе. Поэтому, если форма кривой тока точно неизвѣстна, то можно принять *) коэффицієнтъ формы кривой

$$\sigma = 1,45.$$



Фиг. 111.

*) Обычно для коеф. формы кривой берутъ 1,414 (какъ для синусоиды), такъ при вычислении потока по напряженію такъ и для вычислений намагничивающаго тока. Но если кривая напряженія синусоида, то кривая тока уже не можетъ быть синусоидой и наоборотъ.

Такъ какъ въ главѣ 36 для потока разсѣянія вокругъ каналовъ была принята та же магн.-дв. сила, что и для общаго потока, то формула (51) пригодна и

$$R_1 = \frac{RR'_1}{RR'_1} = \frac{0,00144 \cdot 0,0437}{0,00144 + 0,0437} = 0,0014,$$

откуда

$$\delta_0 = \frac{2 \cdot 0,0014 \cdot 301000}{0,6 \cdot 3,14 \cdot 0,958 \cdot 1,47 \cdot 104} = 8,06 \text{ амп.}$$

Изъ опыта же имеемъ $\delta_0 = 3,1$ ампера.

39. Влініе междужелѣзного пространства, зазора между зубцами и числа полюсовъ на свойства двигателя.

Чтобы найти отъ какихъ величинъ главнымъ образомъ зависятъ τ_1 и τ_2 , выберемъ изъ путей для общаго потока π для потоковъ разсѣянія только тѣ участки, отъ сопротивленій которыхъ записать главнымъ образомъ сопротивленія этимъ потокамъ. Таковыми являются магнитныя сопротивленія R_s междужелѣзного пространства и R_{s1} зазоровъ между зубцами. Поэтому имеемъ приблизительно

$$\tau_1 = \frac{R_s}{R_{s1}}, \quad \tau_2 = \frac{R_s}{R_{s2}},$$

Отъ тѣхъ же величинъ долженъ зависѣть и общий коэффиціентъ разсѣянія τ , поэтому возьмемъ приближенно для двигателей съ открытыми каналами (считая коэффиціентъ обмотки k мало отличающимся отъ единицы)

$$\tau = C' \frac{R_s}{R_s} = C' \frac{\frac{l b}{\pi}}{\frac{2(a+b)}{l}} = C' \frac{\delta (z + \theta)}{b \pi} \quad . . . (129)$$

Для закрытыхъ каналовъ, по уравненію (126),

$$\tau = C' \frac{\delta \mu z}{l \pi} \quad (130)$$

Изъ этой формулы слѣдуетъ, что общее разсѣяніе прямо пропорционально величинѣ междужелѣзного пространства δ и обратно пропорционально длинѣ полюса l . Если, напр., одинъ двигатель съ 72 каналами на статорѣ обмотанъ одинъ разъ на

шесть полюсовъ съ 4 каналами на полюсъ и фазу, а другой разъ на восемь полюсовъ съ тремя каналами на полюсъ и фазу, то въ послѣднемъ случаѣ разсѣяніе больше въ $\frac{1}{\sqrt{2}}$ раза, а коэффиціентъ мощности соответственно меньше.

Эта же формула даетъ отвѣтъ на вопросъ, какъ измѣняется коэффиціентъ разсѣянія, если между желѣзномъ пространство двигателя увеличить расточкы статора или обточкы ротора. При этомъ увеличивается δ и одновременно уменьшается α . Отсюда слѣдуетъ, что заранѣе нельзя сказать, увеличится ли или уменьшится разсѣяніе. Въ двигателяхъ съ высокими головками зубцовъ (α значительно больше δ) или съ совсѣмъ открытыми прямоугольными каналами при расточкѣ увеличеніе δ оказываетъ большее влияніе, такъ что разсѣяніе увеличивается. Въ двигателяхъ съ узкими зазорами между зубцами и съ закрытыми каналами большее influence оказываетъ уменьшеніе α , такъ что разсѣяніе уменьшается. Съ увеличеніемъ δ всегда связано увеличеніе намагничивающаго тока, такъ какъ онъ зависитъ главнымъ образомъ отъ δ и очень мало отъ α .

Формулами (129) или (130) очень удобно пользоваться при пересчетѣ двигателя данного типа на различные мощности, опредѣливъ предварительно коэффиціентъ C опытнымъ путемъ для одного двигателя. Напротивъ эта формула непримѣнна для расчета двигателей различныхъ типовъ, такъ какъ въ ней приняты во внимание только магнитное сопротивленіе между желѣзнымъ пространствомъ и зазора между зубцами. Волѣе точные результаты получаются, если вместо пользованія какой-либо формулой опредѣлить магнитные сопротивленія способами, указанными выше.

40. Потери въ яѣди и потери холостого хода; построеніе круговой диаграммы по вычисленнымъ даннымъ двигателя.

Имѣя вычисленныя по предыдущимъ главамъ величины t и $\frac{\partial \vartheta}{\partial \psi}$, можно построить круговую диаграмму, такъ какъ по главѣ 18

$$OS = \vartheta_0 \text{ и } ST = \frac{\partial \vartheta}{\partial \psi}$$

Для построенія круга вращающихся моментовъ необходимо знать потери въ яѣди статора, а для этого сопротивленіе r_1 одной фазы обмотки статора. Вычисление ихъ не представляется затрудненіемъ. Слѣдуетъ лишь нарисовать головки катушекъ или соединительныхъ вилокъ такъ, какъ это соответствуетъ действительному выполненню. Измѣренiemъ получимъ длину проволоки одной фазы. Если длина ея выражена въ метрахъ, а съченіе въ кв. мм., то удельное сопротивленіе берется равнымъ

0,02, что соответствует температурѣ въ 70° С., такъ какъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія вычисляется для продолжительной работы. Первичная сила тока измѣряется по построенной диаграммѣ (фиг. 72), и вычисляется величина $3 r_1 \mathfrak{J}_1^2$. Раздѣливъ эти потери на тройное фазное напряженіе, получимъ wattную составляющую тока, которую отложимъ отрѣзкомъ AN . Пронеся черезъ H параллель основной линіи до пересѣченія съ AT , получимъ точку G , принадлежащую кругу моментовъ (см. гл. 19).

Для построенія круга мощностей нужно знать потери въ мѣди ротора. Вычисление сопротивленія ротора производится опять по эскизу обмотки ¹⁾. Вторичная сила тока представлена на диаграммѣ отрѣзкомъ SA (фиг. 72), но масштабъ ея другой, чѣмъ первичной силы тока. Масштабъ получается изъ условія, что при всякой большой нагрузкѣ первичные и вторичные ампервитки приблизительно равны между собой:

$$\mathfrak{J}_1 w_1 = \mathfrak{J}_2 w_2,$$

откуда

$$\mathfrak{J}_2 := \frac{\mathfrak{J}_1 w_1}{w_2}.$$

Такъ какъ масштабъ \mathfrak{J}_1 , изображенный векторомъ OA , согласно предыдущему извѣстенъ, то отсюда получается масштабъ для тока \mathfrak{J}_2 , изображенного векторомъ SA . Вычисляя теперь $3 r_2 \mathfrak{J}_2^2$, получимъ точку N круга мощностей тѣмъ же путемъ, какъ и кругъ вращающихся моментовъ.

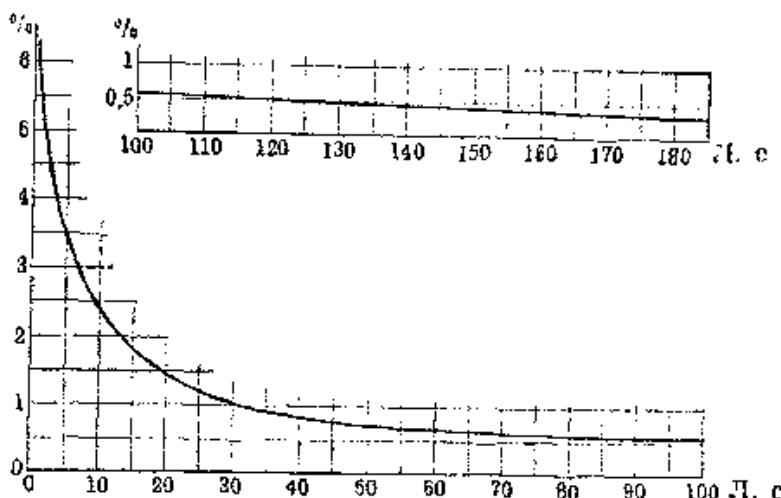
Для непосредственнаго определенія изъ диаграммы вращающаго момента и полезной мощности необходимо еще наложить линію потерь колостого хода. Эти постоянныя потери состоять изъ потерь на треніе и потерь въ желеѣзѣ. Потери на треніе не могутъ быть вычислены, а должны быть взяты согласно опыту надъ ранѣе выполненнымъ двигателями. При этомъ можно пользоваться кривой фиг. 112, представляющей зависимость потерь на треніе (въ процентахъ отъ нормальной мощности) въ двигателяхъ съ обыкновенными подшипниками. Для двигателей съ шариковыми подшипниками эти величины, конечно, будутъ меньше. Потери въ желеѣзѣ можно определить или по формулѣ

$$(r_c B^{1.6} + \beta c^2 B^2) \cdot 10^{-4} \text{ ваттъ на куб. дециметръ},$$

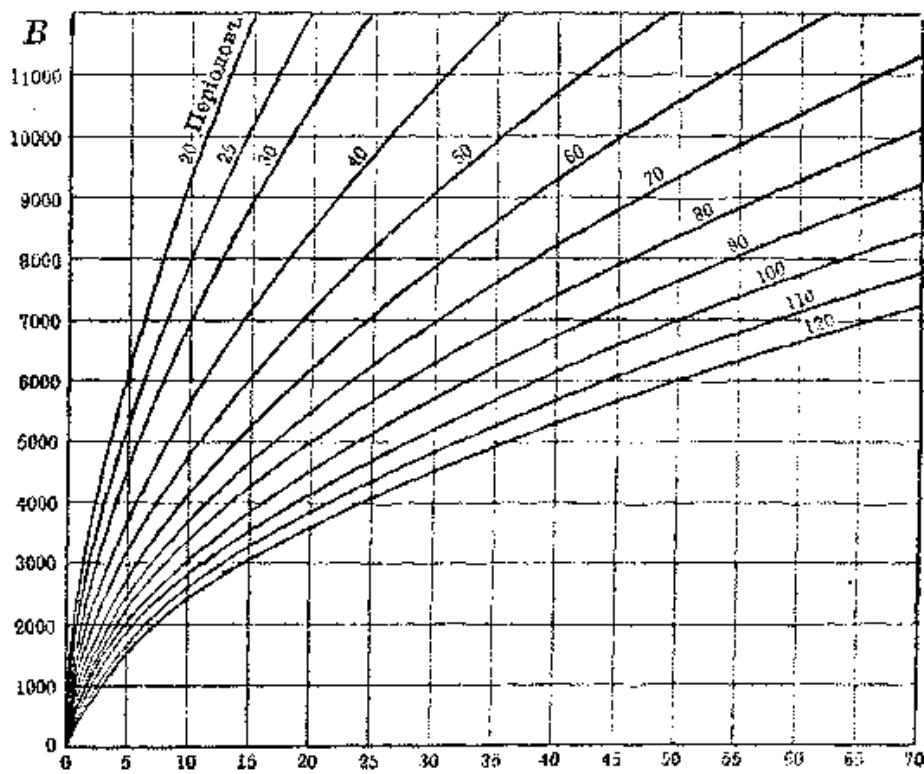
или по кривымъ фиг. 113, построеннымъ для среднихъ значений r_c и β , где r_c — коэффиціентъ потерь на гистерезисъ, а β — на токи Фуко. Основываясь на сказанномъ на стр. 103 можно

¹⁾ Относительно вычислениія сопротивленія обмотокъ короткозамкнутыхъ роторовъ см. гл. 41.

произвести вычисление потерь въ жалѣзѣ ротора, въ предположеніи, что потокъ въ немъ имѣть ту же частоту что и по-



Фиг. 112.



Фиг. 113.

токъ статора. Удобно представить эти данные въ видѣ таблицы, въ которой индукціи взяты изъ таблицы на страницѣ 121. Объемы вычислены по размѣрамъ фг. 104.

	B	Объемъ вт. дцм. ³	Потери въ желѣзѣ.	
			на 1 дцм. ³	общія
Зубцы статора . . .	9400	0,85	32	11,2
Зубцы ротора . . .	6850	0,39	19	7,4
Ярмо статора . . .	5800	2,22	14	31
Сердечникъ ротора	7900	0,76	28	17,5
				въ суммѣ 67 ваттъ.

Случайно потери въ желѣзѣ, вычисленныя по выше приведенной формулы, справедливо для трансформатора, совпали съ непосредственно измѣренными (стр. 105).

Обычно онъ менѣе послѣднихъ. Вычисленныя потери также менѣе, чѣмъ потери, измѣренныя при неподвижномъ разомкнутомъ роторѣ (въ нашемъ двигатѣль 76 ваттъ), хотя въ данномъ случаѣ двигатель вполнѣ соответствуетъ ненагруженному трансформатору, и появляющіяся при вращеніи ротора измѣненія индукціи въ зубцахъ большой частоты адѣль не имѣютъ мѣста. Это объясняется тѣмъ, что благодаря заусенцамъ листовъ, появляющимся при обточкѣ ротора и статора, потери на гистерезисъ въ зубцахъ увеличиваются ¹⁾. Кромѣ того увеличеніе потерь на гистерезисъ происходитъ еще отъ старѣнія желѣза краевъ зубцовъ отъ значительныхъ нагрѣваній при продолжительной работе двигателя. Поэтому слѣдуетъ потери въ желѣзѣ, вычисленныя по формулѣ увеличивать на 10 — 15%.

Прибавивъ потери на треніе, взятые изъ фиг. 112, и раздѣливъ общія потери холостого хода на тройное фазное напряженіе, получимъ ваттную составляющую тока холостого хода, который нанесемъ на диаграмму въ видѣ отрѣзка JA_0 . Отъ прямой, проведенной черезъ точку A_0 параллельно основной линіи, необходимо отсчитывать врачающейъ моментъ GQ' и мощность $L'N$, согласно главѣ 19.

Всѣ остальные характерныя для двигателя величины находятся также изъ полученной такимъ образомъ полной круговой диаграммы.

1) Увеличеніе потерь на гистерезисъ, вслѣдствіе обработки листовъ, установлено авторомъ опытнымъ путемъ, причемъ онъ произвелъ измѣненія съ валомъ листовъ до и послѣ разрѣзанія его на узкія полосы.

41. Потери въ обмоткѣ короткозамкнутаго ротора.

Въ короткозамкнутой обмоткѣ—бѣлпчерь колесъ—токи въ различныхъ стержняхъ неодинаковы и распределены такъ, какъ показано на фиг. 24 соотвѣтственной толщиной линій. Вычисление потерь въ такой обмоткѣ было бы чрезвычайно сложно, если бы не удалось найти математического выраженія, аналогичнаго закону Джоуля для обычныхъ обмотокъ. Для вычислениія на практикѣ лучше всего подходить формулы Ринга.

Общія тепловыя потери въ такой обмоткѣ суть

$$F = \mathfrak{d}_q^2 R_q \quad \dots \dots \dots \quad (131)$$

гдѣ \mathfrak{d}_q —сила тока, эквивалентная вторичному току, а R_q —сопротивленіе, эквивалентное сопротивленію обычной обмотки; при этомъ

$$R_q = r_r + (2\pi p)^2 r_s \quad \dots \dots \dots \quad (132)$$

гдѣ r_r —сопротивленіе колецъ, замыкающихъ на короткое стержни обмотки, если они разрѣзаны и включены постѣдовательно. Такимъ образомъ

$$r_r = 2 \frac{0,02 l_r}{S_r} = \frac{0,04 l_r}{S_r} \quad \dots \dots \dots \quad (133)$$

гдѣ l_r обозначаетъ длину кольца въ метрахъ, а S_r —поперечное сѣченіе въ кв. мм.; 0,02—удѣльное сопротивленіе мѣди при 70°С, r_s —сопротивленіе всѣхъ стержней при параллельномъ включеніи, т.-е.

$$r_s = \frac{0,02 l_s}{N_2 S_s} \quad \dots \dots \dots \quad (134)$$

l_s —длина, S_s —поперечное сѣченіе одного стержня, а N_2 —общее число стержней ротора.

Отсюда (по ур. 131 и 132) тепловыя потери въ двухъ кольцахъ будутъ $\mathfrak{d}_q^2 r_r$ и въ стержняхъ $\mathfrak{d}_q^2 (2\pi p)^2 r_s$.

Эквивалентная сила тока будетъ

$$\mathfrak{d}_q = \frac{N_2 \mathfrak{d}_2}{2\pi p} \quad \dots \dots \dots \quad (135)$$

гдѣ \mathfrak{d}_2 —токъ въ одномъ стержнѣ. Послѣдній находится изъ закона равенства первичныхъ и вторичныхъ ампервитковъ при значительной нагрузкѣ. Такъ какъ въ этой обмоткѣ витковъ не существуетъ, то получимъ, что законъ формулируется такъ: произведеніе силы тока на число стержней въ статорѣ

и роторъ одно и то же. Обозначивъ число стержней статора черезъ N_1 , получимъ

$$N_2 \mathfrak{J}_2 = N_1 \mathfrak{J}_1 \dots \dots \dots \quad (136)$$

Отсюда

$$\mathfrak{J}_2 = \frac{N_1 \mathfrak{J}_1}{2\pi p} \dots \dots \dots \quad (137)$$

Съ помощью этихъ формулъ легко расчитать обмотку—бѣлье колесо. Рѣшимъ теперь вопросъ, какіе размѣры необходимо придать стержнямъ и кольцамъ ротора для бѣлья колеса, для замѣны имъ ротора нашего примѣра, при чёмъ мощность, коэффи. мощности и коэффи. полезнаго дѣйствія должны оставаться тѣми же. По стр. 105 тепловыя потери въ роторѣ нашего двухсильнаго двигателя равны 99 ваттамъ при полной нагрузкѣ. Поэтому мы должны положить

$$\mathfrak{J}_q^2 r_q = 99$$

По даннымъ стр. 112 $N_1 = 18 \cdot 48 = 624$ и по фиг. 20 для полезной мощности въ 2 лош. силы $\mathfrak{J}_1 = 10$.

Отсюда

$$\mathfrak{J}_q = \frac{99}{497^2} = \frac{99}{247000} = 0,0004.$$

Относительно размѣровъ стержней и замыкающихъ колецъ мы имѣемъ свободный выборъ постольку, поскольку мы можемъ распределить между ними общія потери. Допустивъ распределеніе потерь поровну между стержнями и кольцами, имѣемъ

$$r_s = (2\pi p)^2 r_s = \frac{R_q}{2} = 0,0002$$

Принявъ средній диаметръ кольца равнымъ 175 м.м., соотвѣтственно наружному диаметру ротора, равному 198,8 м.м., получимъ среднюю длину кольца

$$l_r = 0,55 \text{ метра.}$$

Съченіе же кольца, по равенству (133)

$$S_r = \frac{0,04 \cdot 0,55}{0,0002} = 110 \text{ кв.мм.}$$

Далѣе имѣемъ

$$R_s = \frac{0,0002}{(2 \div 2)^2} = \frac{0,0002}{158} = 1,27 \cdot 10^{-6}.$$

Роторъ съ кольцами нашего двигателя имѣлъ 60 каналовъ. Для ротора же въ формѣ бѣличьяго колеса мы дѣлаемъ въ нѣляхъ облегченія цуска въ ходѣ (гл. 10) 61 каналъ. Возьмемъ длину стержня между серединами котель равной 0,1 метра, соотвѣтственно длины сердечника ротора въ 8,2 см. Тогда по ур. (184) съченіе стержня будетъ

$$S_r = \frac{0,02 \cdot 0,1}{61 \cdot 1,27} \cdot 10^6 = 26 \text{ кв. мм.}$$

При круглыхъ стержняхъ диаметръ равенъ 5,8 мм.

42. Приближенное вычисление коэффициентовъ мощности и полезнаго дѣйствія.

Иногда бываетъ необходимымъ, хотя бы только приближенно, но быстро вычислить для опредѣленной силы тока двигателя \mathcal{J}_1 , коэффициентъ мощности и коэффициентъ полезнаго дѣйствія. Это возможно сдѣлать, не вычисляя коэффициента разсѣянія и не строя круговой диаграммы, слѣдующимъ образомъ. Сперва вычисляютъ токъ намагниченія \mathcal{J}_m по ур. (128). При этомъ вместо сопротивленія R_1 первичному магнитному потоку достаточно подставить сопротивленіе R общему потоку, такъ какъ они мало отличаются другъ отъ друга и такимъ образомъ вычислять сопротивленіе первичному потоку разсѣянія R_1 нѣть необходимости. Принимая, что токъ намагниченія совпадаетъ съ безваттной составляющей тока \mathcal{J}_1 , какъ въ реактивной катушкѣ, получимъ, что ваттная составляющая послѣдняго равна $\sqrt{\mathcal{J}_1^2 - \mathcal{J}_0^2}$. Ошибка, которая получается при этомъ, видна изъ фиг. 77 и состоитъ въ томъ, что въ прямоугольномъ треугольнике AOR вместо катета OR мы беремъ отрѣзокъ OS . Умноживъ полученную величину ваттной составляющей тока на тройное (или двойное) фазное напряженіе, получимъ потребляемую двигателемъ мощность при токѣ \mathcal{J}_1 . Отношеніе этой мощности къ вольтъ-амперамъ ($3 \mathcal{J}_1 P_1$ или $2 \mathcal{J}_1 P_1$) даетъ коэффициентъ мощности съ тою же точностью, съ какой получена потребляемая мощность. Для получеія мощности двигателя необходимо изъ потребляемой двигателемъ мощности вычесть общія потери въ немъ. Потери въ мѣди и желѣзѣ можно вычислить способами, указанными въ 40 главѣ, а потери на треніе можно взять изъ кривой фиг. 112, если нѣть возможности непосредственно измѣрить общія потери холостого ходу. Отношеніе отдаваемой мощности къ потребляемой даетъ коэффициентъ полезнаго дѣйствія.

Еще проще определить приближенно мощность, коэффициентъ мощности и коэффициентъ полезного дѣйствія двигателя, если возможно измѣрить потребляемую двигателемъ мощность при данной нагрузкѣ и при холостомъ ходѣ, а также токъ холостого хола. Послѣдній приблизительно равенъ току намагниченія $\mathcal{J}_{\text{н}}$, такъ что послѣдняго нѣть необходимости вычислять.

43. Определение размѣровъ проектируемаго двигателя.

Хотя рѣдко кому приходится проектировать заново двигатель, не пользуясь совершенно данными о существующихъ двигателяхъ, но ради completeness приведемъ ходъ такого расчета.

Понятно, что при началѣ расчета необходимо иметь какой-либо исходный пунктъ. Если же такового не имѣется, то приходится задаваться на удачу какимъ-либо основнымъ размѣромъ, но тогда самый расчетъ можетъ слишкомъ затянуться. Удобнѣе въ такомъ случаѣ задаться однимъ изъ размѣровъ полюсной поверхности или—потокомъ на пару полюсовъ. Укажемъ здѣсь на формулу Зенгеля, какъ на одну изъ удобныхъ исходныхъ формулъ; она даетъ потокъ на пару полюсовъ

$$\Phi_1 = 3 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{PS \cdot n_1}{c_1}} \quad \dots \dots \quad (138)$$

гдѣ PS — нормальная мощность, n_1 — синхронное число оборотовъ въ минуту и c_1 — число периодовъ тока въ секунду. Далѣе по числу періодовъ и числу оборотовъ получимъ число полюсовъ, причемъ число полюсовъ, конечно, должно быть четное. Исходя изъ допускаемой индукціи въ междужелѣзномъ пространствѣ и изъ опредѣленнаго по формулы (138) потока Φ_1 , получимъ величину полюсной поверхности. По потоку и напряженію, для кетораго предназначенъ двигатель, найдемъ число витковъ w_1 . По нормальной мощности, коэффициенту мощности и коэффициенту полезного дѣйствія получается первичная сила тока. По послѣднему и допускаемой плотности тока въ первичной обмоткѣ, получимъ сѣченіе проволоки обмотки. Принимая же во вниманіе число витковъ и изоляцію, получимъ размѣры каналовъ. По величинѣ индукціи, допускаемой въ зависимости отъ потерь, получимъ сѣченія зубцовъ. Такъ какъ величина полюсной поверхности определена раньше, то отеюда получается длина двигателя въ осевомъ направлениі. По величинѣ индукціи, допускаемой въ ярмѣ, получимъ его сѣченіе.

Послѣ такого приближенного вычислениія главныхъ размѣровъ, необходимо найти длины проводовъ и потери въ мѣди при нормальной нагрузкѣ. Сила тока въ роторѣ найдется изъ равенства первичныхъ и вторичныхъ ампервитковъ. Скольженіе

при нормальной нагрузкѣ опредѣлится по потерямъ въ мѣди ротора V по уравн. (11).

Если послѣ приближенного вычисления потерь въ желѣзѣ и мѣди и взятыхъ изъ фиг. 112 потерь на треніе не получится желаемаго коэффиціента полезнаго дѣйствія, то полученные размѣры нужно измѣнить соотвѣтствующимъ образомъ и снова произвести вычисление.

По величинѣ наибольшаго желаемаго коэффиціента мощности получимъ коэффиціентъ разсѣянія и затѣмъ по току холостого хода, который желаютъ допустить,—магнитное сопротивленіе общему потоку и потоку разсѣянія. По послѣднимъ опредѣлится междужелѣзное пространство и размѣры зазора между краями зубцовъ.

Какъ видно изъ приведеннаго хода расчета, проектирующій можетъ достигнуть желаемой цѣли весьма различными способами, конечно въ границахъ заданія. Отъ его умѣнья и опытности зависитъ достиженіе цѣли при наилучшихъ коэффиціентѣ мощности, коэффиціентѣ полезнаго дѣйствія, способности къ перегрузкамъ, начальномъ вращающемъ моментѣ, наименьшемъ нагреваніи и относительно маломъ вѣсѣ двигателя.

Основные формулы.

	Стр.
$n = \frac{c_1}{p}$	9
$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$	11
$s' = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2} = \frac{n_2 - n_1}{n_2}$	96
$s = \frac{s'}{s' - 1}$	87
$n_2 = n_1 (1 - s)$	11
$c_2 = c_1 \cdot s$	12
$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot c_1}{p}$	14
$W_2 = \omega_2 \cdot M$	13
$W_1 = \omega_1 \cdot M$	13
$W_2 = \frac{2\pi \cdot c_1}{p} (1 - s) \cdot M$	28
$V = (W_1 - W_2) = (\omega_1 - \omega_2) M$	13
$V = s \cdot W_1$	13
$V = \frac{s}{1 - s} \cdot W_2$	13
$V = m \cdot r_2 \cdot \mathcal{J}_2^2$	14
$M = \frac{p \cdot V}{2\pi \cdot c_1 \cdot s}$	14
$M = \frac{1}{736} \cdot \frac{p \cdot V}{2\pi \cdot c_1 \cdot s}$ лош. с.	14
$M = 0,0162 \cdot \frac{p \cdot V}{c_1 \cdot s}$ кил.-мтр.	14
$M = 0,0162 \cdot \frac{p \cdot V}{c_1}$ кил.-мтр.	15
$M = \pi \cdot m \cdot p \cdot w_2^2 \cdot \Phi^2 = \frac{r_2 \cdot c_1 \cdot s}{r_2^2 + s^2 (2\pi \cdot c_1 L_2)^2}$	16

Стр.

$$M = \frac{m \cdot p \cdot w_2^2 E_1^2}{2\pi \cdot w_1^2 \cdot \gamma^2} \cdot \frac{r_2 \cdot s}{c_1 [r_2^2 + s^2 (2\pi c_1 L_2')^2]} \quad 17$$

$$M_{max.} = \frac{m \cdot p \cdot w_2^2 \cdot E_1^2}{8\pi^2 \cdot w_1^2 \cdot \gamma^2 \cdot c_1^2 \cdot L_2'} \quad 18$$

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{r_2}{2\pi \cdot c_1 \cdot L_2'} \\ \frac{2\pi \cdot c_1 \cdot L_2'}{r_2} &= 1 \end{aligned} \right\} \text{Условія для наибільшого вращаю-} \\ &\quad \text{щаго моменту} \quad 17$$

$$M_a = \frac{p}{2\pi \cdot c_1} m r_2 \dot{\vartheta}_2^2 \quad 22$$

$$M_a = \frac{m \cdot p \cdot r_2}{2\pi \cdot c_1} \cdot \frac{w_1^2}{w_2^2} \dot{\vartheta}_1^2 \quad 22$$

$$M_a = \frac{m \cdot p \cdot w_2^2 E_1^2}{2\pi \cdot w_1^2 \gamma^2} \cdot \frac{r_2}{c_1 [r_2^2 + (2\pi c_1 L_2')^2]} \quad 23$$

$$\tau_1 = \frac{R}{R_1'} \quad$$

$$\tau_2 = \frac{R}{R_2'} \quad$$

$$v_1 = \frac{R}{R_1} \quad$$

$$v_2 = \frac{R}{R_2} \quad$$

$$v = 1 + \tau_1 \quad 55$$

$$v_2 = 1 + \tau_2 \quad 56$$

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2 \\ v_1 \cdot v_2 &= 1 + \tau \end{aligned} \right\} \quad 57$$

$$\epsilon = 1 - \frac{1}{v_1 \cdot v_2} \quad 56$$

$$(\cos \varphi_1)_{max} = \frac{1}{1 + 2\tau} \quad 63$$

$$W = \dot{\vartheta}_1 E_1 \cos \alpha + \dot{\vartheta}_3 E_3 \cos \varphi \quad (\text{мощність трехфазного тока}) \quad 96$$

$$\Phi_i = \frac{E_i \cdot 10^3}{4,14 \cdot c \cdot k \cdot w_1} \quad \left. \begin{aligned} &\text{Потокъ и эл.-дв. сила трехфазного} \\ &\text{двигателя} \end{aligned} \right\} \quad 112$$

$$\dot{\vartheta}_0 = \frac{p \cdot R_1 \cdot \Phi_1}{0,6\pi \cdot k \cdot \delta \cdot w_1} \quad \left. \begin{aligned} &\text{Токъ намагнічення трехфазного} \\ &\text{двигателя} \end{aligned} \right\} \quad 125$$

$$\dot{\vartheta}_0 = \frac{p R_1 \cdot \Phi_1}{0,4 \cdot \pi \cdot k \cdot \delta \cdot w_1} \quad \left. \begin{aligned} &\text{Токъ намагнічення двухфазного} \\ &\text{двигателя} \end{aligned} \right\} \quad 125$$

Главнѣйшія обозначенія.

Здѣсь указаны страницы, гдѣ дано опредѣленіе данной величины, или
гдѣ она встրѣчается впервые.

	стр.
ω_1 — угловая скорость вращающагося поля	11, 14
ω_2 — угловая скорость ротора	11
a — толщина края головки зубца или толщина мостика между зубцами	113
B — магнитная индукція	2
l — длина желѣзного сердечника статора (и ротора) въ осес- вомъ направлениі	112
β — коэффиціентъ для потерь отъ токовъ Фуко	128
M — вращающій моментъ	12
M_a — начальный вращающій моментъ	14
b — длина между желѣзнымъ пространствомъ	113
s — ширина зазора между головками зубцовъ	113
e — электродвижущая сила, мгновенное значеніе	1
E — " " дѣйствующее	1
A — " " амплитуда	1
E_2 — вторичная эл.-дв. сила, индуцируемая всѣмъ вторич- нымъ потокомъ	16, 20
E_{2i} — вторичная эл.-дв. сила, индуцируемая общимъ потокомъ	16
α — коэффиціентъ разсѣянія по Behn-Eschenburgу	57
η — коэффиціентъ полезнаго дѣйствія	29
η — коэффиціентъ гистерезиса (Штейнметца)	128
M — магнитодвижущая сила, амплитуда	116
G — потери въ желѣзѣ	29
b — дѣйствующая ширина желѣза полюса по окружности . . .	112
H — потери мѣди статора	29
i — сила тока, мгновенное значеніе	1
J — сила тока, дѣйствующее значеніе	1
I — сила тока, амплитуда	1
J_n, I_n — токъ намагниченія	62, 117
k — коэффиціентъ обмотки (трехфазной)	131
Z — напряженіе на зажимахъ, дѣйствующее	57
l — длина пути магнитныхъ линій	2
L — коэффиціентъ самоиндукціи	1, 15, 56
m — число фазъ	14

	СТР.
M — коэффициентъ взаимной индукціи	15, 56
μ — магнитная проницаемость	2
n_1 — число периодовъ первичнаго тока	9
n_2 — " " вторичнаго "	11
n — число витковъ одной катушки	2
$n_1 (n_2)$ — число витковъ всѣхъ катушекъ одной фазы	56
W_1 — электрическая мощность	13
W_2 — механическая мощность	13
W_n — полезная мощность	29
p — число паръ полюсовъ	9
Q — потребляемая мощность	29
R — потери на треніе	29
d — радиусъ	15
Σ — сумма	2
S — площадь съченія	2
s — скольженіе $\left(= \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \right)$	11
s' — скольженіе $\left(= \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_1} \right)$	86
s_1 — скольженіе второго двигателя при каскадномъ включеніи	90
ζ — коэффициентъ формы кривой	1
γ — коэффициентъ разсѣянія Гейлданда	55
n_1 — число оборотовъ поля	9
n_2 — число оборотовъ ротора	11
V — потери въ мъди ротора	13
ν — коэффициентъ разсѣянія Гопкинсона	55
r — электрическое сопротивленіе	1
R — магнитное сопротивление	2
ϕ — потокъ, мгновенное значеніе	1
Φ — " амплитуда	1
ω — $(= 2 \pi c)$ — угловая скорость	1

Алфавитный указатель.

А.

Асинхронный генераторъ 82.
" двигатель 10.

Б.

Барбадная обмотка 7.
Behn-Eschenberg'a, коэффициентъ раз-
сѣянія—56.
Вечковидная обмотка 37, 49.

В.

Вилки (соединение обмотокъ) 37, 45.
Возвратная волнообразная обмотка 45, 49.
Волнообразная обмотка 35, 37, 42, 45.
Вращающееся магнитное поле 3.
Вращающій моментъ 12, 15, 64.
" " наиболѣшій 17, 69.
" " неравномѣрный 25.
" " пропускѣ въ ходѣ 14.
Встрѣчное включение 76.
Вторичное разсѣяніе 15.

Г.

Генераторъ 82.
Гейзанда, коэффициентъ разсѣянія—55.
" круговая диаграмма—58.
Гистерезисъ 27, 128.
Гонкинова, коэффициентъ разсѣянія 55.

Д.

Двухфазное вращающееся поле 4.
Двухфазный двигатель 3, 112, 117, 119.
Диаграмма трансформатора 52.
Длина звѣзда 114.
" полюса 112.
Дуги (соединение обмотокъ) 37, 38, 42.

Ж.

Жидкій пусковой реостатъ 74.

З.

Зазоръ между головками зубцовъ 126.
Звѣздой, соединеніе—6, 78.

И.

Измѣритель скольженія 107.
Изогнутая катушка 40.
Индукционный двигатель 10.
Индукционное сопротивление 1.
Искусственная пульевая точка 95.

К.

Каскадное включение 81, 90.
Кольцевая обмотка 6.
Коротко-замкнутый роторъ 22, 32.
Коэффициентъ взаимной индукціи 16.
" мощности 94, 97, 133.
" наиболѣшой 62, 124.
Коэффициентъ полезного дѣйствія 27, 98,
133.
Коэффициентъ разсѣянія 118.
" формы кривой 125.

Л.

Магнитодвижущая сила 2, 115.
Магнитная индукція 2.
" проницаемость 2, 120.
Магнитное сопротивление 2, 120.
Междужелѣзное пространство 121, 126.
Методъ двухъ ваттметровъ 96.
Механическая мощность 27, 63, 85.
Многополюсные двигатели 8.
Мощность механическая 27, 63, 85.
" наиболѣшая 69.
" нормальная 31.
" полезная 29.
" потребляемая 29, 94.
" электрическая 82, 94.

М.

Найбольшій вращающій моментъ 18.
" коэффициентъ мощности 62, 124.
Найбольшая мощность 69.
Начальный вращающій моментъ 20.
Неравномѣрный вращающій моментъ 25.
Нормальная мощность 31.
Нулевая точка, искусственная—95.

О.

- Обмотка высокого напряжения 40.
 - на подобие бидичного колеса 33.
 - петлеобразная 35, 38, 39.
 - постоянного тока 46.

Общий потокъ 15, 52.

Основные законы 1.

Отрицательное скольжение 82.

П.

- Перекрещивающіяся соединенія 37, 45.
 Перенапряженіе 89.
 Плотность потока (индукція) 2.
 Поле трехфазного тока 5.
 Полезная мощность 94, 97, 133.
 Помехое сопротивленіе 1.
 Потери въ мѣда 104, 127.
 - на трение 66, 90, 125.
 - холостого хода 90, 128.
 Потоки разставія 53.
 Предельная нагрузка 19.
 Пусковой реостатъ 31, 73.

Р.

- Размѣры двигателей 134.
 Разстягіе вокругъ головокъ катушекъ 123.
 " " канилловъ 122.
 Реактивная катушка 77.
 Регулированіе числа оборотовъ 81.
 Роды обмотокъ 35.
 Роторъ 5.

С.

- Силь таги, начальная—15.
 Синхронный двигатель 9.
 Скольжение 10, 11, 12, 68, 105.

Сопротивление, индуктивное—1.

магнитное—2, 120.
 подное—1.

Статоръ 5.**Т**

- Теоретический холостой ходъ 60.
 Токъ, намагничивающій—62, 124.
 Токи Фуко 27, 128.
 Тормозъ 88, 102.
 Треугольникъ, соединеніе—6, 78.
 Трехфазный токъ 5.

У.

Угловая скорость 11.

Ф.

Фиктивный потокъ 64, 109.

Х.

- Холостой ходъ 52, 60.
 " " теоретический—60.

Ц.

Центробежный регуляторъ 75.

Ч.

- Чешуйчатая обмотка 13.
 Число оборотовъ, теоретическое—9.
 Число паръ полюсовъ 8.
 " времѣнь тока 9.
 " періодъ 9, 11.

Э.

Электрическая мощность 82, 94.