

Л. С. ПОЛОТОВСКИЙ

**ЕМКОСТНЫЕ МАШИНЫ
ПОСТОЯННОГО ТОКА
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

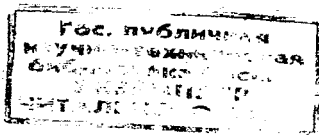
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Л. С. ПОЛОТОВСКИ.

ЕМКОСТНЫЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1960 ЛЕНИНГРАД



96-993

3078

Д

28978

В книге излагается общая теория емкостных машин постоянного тока и рассматриваются возможности создания машин высокой удельной мощности. Указываются также области применения подобных машин.

Книга предназначена для инженеров, работающих в области высоких и сверхвысоких напряжений, а также для лиц, разрабатывающих различного рода электрофизическую аппаратуру.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В решениях XXI съезда КПСС указано на необходимость самого широкого внедрения электротехники во все области народного хозяйства. Передача энергии постоянным током высокого напряжения, использование атомной энергии для мирных целей, широкое развитие радиотехники и внедрение автоматизации производственных процессов заставляют изыскивать новые способы преобразования механической энергии в электрическую энергию постоянного тока высокого напряжения в генераторах и обратного преобразования в двигателях.

Настоящая работа, посвященная рассмотрению емкостных машин постоянного тока высокого напряжения, не являясь обзором осуществленных машин, ставит перед собой задачу — дать классификацию емкостных машин, их общую теорию, и на этой базе оценить возможности создания при современном уровне техники емкостных машин с большой удельной мощностью и высоким к. п. д.

Помимо этого, в работе рассматриваются характеристики различных типов машин в генераторном и двигательном режиме, условия самовозбуждения, коммутация и в заключение разбирается работа емкостных машин в различных конкретных схемах.

В книге не рассматриваются расчеты электрических полей в различных конструкциях машин; по этому вопросу имеется многочисленная литература, а целый ряд задач, связанных с определением наивыгоднейшей фор-

., по существу уже решен в других
и, например в гидродинамике.

по созданию мощных, надежных в эксплуа-
и вместе с тем простых емкостных машин под силу
, коллективу исследователей и конструкторов, и на-
ящий труд является лишь основой для дальнейшей
работы в этом направлении.

В целях наглядного представления о развитии уче-
ния о емкостных машинах автор счел целесообразным
привести перечень работ в хронологическом порядке.

Автор выражает благодарность рецензенту профес-
сору Н. Н. Щедрину и профессору А. Е. Каплянскому за
ряд ценных замечаний.

Отзывы и замечания по настоящей книге просьба на-
правлять по адресу: Ленинград Д-41, Марсово поле 1,
Л. О. Госэнергоиздата.

Автор

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
<i>Глава первая. Классификация и основы теории емкостных машин</i>	<i>16</i>
§ 1. Существующие классификации	—
§ 2. Новая классификация	17
§ 3. О теории емкостных машин	24
<i>Глава вторая. Теория биполярных машин</i>	<i>28</i>
§ 4. Дифференциальные уравнения машины	—
§ 5. Форма кривых тока и напряжения	30
§ 6. Простейшая машина постоянного тока	35
§ 7. Многополюсная машина	39
§ 8. Многодисковая машина	40
§ 9. Уничтожение влияния реакции якоря	43
§ 10. Мощность и к. п. д.	47
§ 11. Коммутация	54
§ 12. Машина с диэлектрическим ротором	57
§ 13. Самовозбуждение	61
<i>Глава третья. Теория униполярных машин</i>	<i>64</i>
§ 14. Дифференциальные уравнения машины	—
§ 15. Форма кривых тока и напряжения	65
§ 16. Индуктированный ток и напряжение холостого хода	66
<i>Глава четвертая. Характеристики емкостных генераторов</i>	<i>69</i>
§ 17. Независимое возбуждение	—
§ 18. Параллельное возбуждение	76
§ 19. Последовательное возбуждение	82
<i>Глава пятая. Характеристики емкостных двигателей</i>	<i>86</i>
§ 20. Параллельное возбуждение	—
§ 21. Последовательное возбуждение	89
§ 22. Двигатель с объединенными цепями возбуждения и якоря	91

<i>Глава шестая. Пути увеличения удельной мощности емкостных машин</i>	100
§ 23. Введение электрически прочной среды	—
§ 24. Введение среды с большой диэлектрической проницаемостью	112
§ 25. Механический контакт	115
§ 26. Емкостная машина с механическим контактом статор — ротор	117
§ 27. Перспективы создания мощных емкостных машин	121
<i>Глава седьмая. Некоторые вопросы работы емкостной машины</i>	125
§ 28. Регулирование емкостной машины	—
§ 29. Работа емкостной машины на емкостную нагрузку	127
§ 30. Работа емкостной машины на индуктивную нагрузку	132
§ 31. О питании емкостной машиной нескольких приемников	137
З а к л ю ч е н и е	140
<i>Приложения.</i>	
1. Учет нелинейности диэлектрика	142
2. Расчет формы ротора по заданному закону изменения емкости статор — ротор	144
Л и т е р а т у р а	148

ВВЕДЕНИЕ

Первыми генераторами, преобразующими механическую энергию в электрическую, были так называемые электростатические машины. Они появились в 1650 г. вначале как машины трения, а затем, со второй половины XIX в. как машины, использующие открытое Эпинусом в середине XVIII в. явление электростатической индукции и получившие наименование электрофорных.

Весьма остроумная машина трения была создана в XVIII в. Ломоносовым [Л. 1]. Его машина представляла собой полый металлический шар, внутри которого вращалась кисть, электризирующая трением внутреннюю поверхность шара. Заряды переходили на внешнюю поверхность шара, приобретавшего при этом высокий потенциал. Эта машина свидетельствует о том, что Ломоносову, задолго до Фарадея, было известно явление сосредоточения зарядов на внешней поверхности полых тел.

Помимо Ломоносова, машины трения разрабатывались и другими русскими учеными — Болотовым [Л. 2] и Петровым [Л. 3].

В развитии электрофорных машин как с металлическим, так и с диэлектрическим ротором, помимо Теплера [Л. 5], Гольтца [Л. 6] и др., большой вклад был внесен русскими учеными Шведовым [Л. 8], Тепловым [Л. 9], Яблочковым [Л. 10], Пушковым [Л. 11], создавшими целый ряд машин.

Термин «электростатическая машина» принципиально неудачен, потому что в электростатическом поле невозможно непрерывное преобразование механической энергии в электрическую.

Еще в 1907 г. Баркгаузенем [Л. 15] и Пуанкаре [Л. 16] было доказано, что для преобразования механической энергии в электрическую необходимым условием является изменение емкости или индуктивности между

отдельными частями машины. Поэтому машины, использующие электрическое поле, правильнее называть «емкостными», подобно тому, как машины с магнитным полем называют «индуктивными».

Принцип действия емкостной машины может быть пояснен следующим образом. Любая емкостная машина, независимо от ее конструктивного осуществления, всегда состоит из неподвижной части — статора, и подвижной части, так или иначе перемещающейся относительно статора, которую мы в дальнейшем будем условно называть ротором, независимо от характера ее движения.

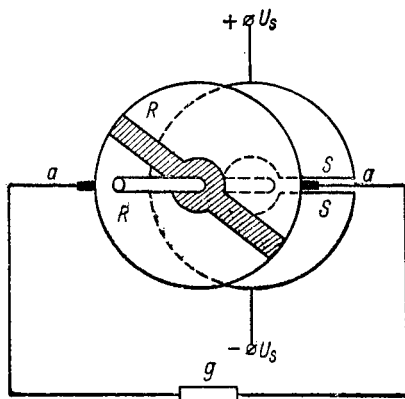


Рис. 1.

Статор является устройством, служащим для сообщения заряда движущемуся ротору путем электростатической индукции, или путем кондуктивного соединения ротора со статором (в определенные моменты времени), или, наконец, за счет трения ротора о статор. В этой работе машины трения не рассматриваются.

Как известно, электризуемое тело может быть как проводником, так и диэлектриком. В соответствии с этим емкостные машины могут иметь проводящий или диэлектрический ротор.

Изменение заряда ротора, соединенного с нагрузкой, сопровождается током в цепи нагрузки.

В качестве конкретного примера рассмотрим емкостную машину с дисковым проводящим ротором, схематически представленную на рис. 1.

Неподвижная система возбуждения — статор — состоит из двух металлических, изолированных друг от друга, полудисков S . Против него соосно расположен ротор — такой же диск из двух полудисков R , вращающихся вокруг оси. К полудискам статора подведено постоянное напряжение возбуждения U_s . На торец ротора

ного диска наложены щетки a , приключенные к нагрузке.

На полудисках ротора, расположенных против заряженных поверхностей полудисков статора, индуцируются заряды разных знаков, величина которых q определяется емкостью C между полудиском статора и полудиском ротора,

$$q = C \frac{U_s}{2}.$$

При вращении ротора заряды на его полудисках изменяются, что сопровождается током

$$i = - \frac{dq}{dt} = - \frac{U_s}{2} \frac{dC}{dt}$$

в цепи нагрузки. Так как щетки попеременно касаются обоих полудисков ротора и тем самым производят коммутацию тока, то во внешней цепи пойдет пульсирующий ток неизменного направления.

Из выражения для тока емкостной машины видно, что для увеличения ее мощности необходимо увеличивать напряжение возбуждения или скорость изменения емкости. Увеличению напряжения возбуждения, т. е. напряженности поля, созданного между статором и ротором, ставит предел электрическая прочность рабочего диэлектрика машины. Скорость изменения емкости может быть увеличена или за счет возрастания максимального значения емкости или путем повышения скорости движения ротора; последняя ограничена механической прочностью ротора и возрастанием потерь на трение при движении ротора в газовой или жидкой среде.

Ограниченная электрическая и механическая прочность элементов емкостных машин привели к тому, что несмотря на их большую давность, более чем на 200 лет превышающую возраст индуктивных машин, емкостные машины не получили широкого применения. В настоящее время они используются лишь для следующих целей:

- 1) для демонстраций по физике, как источник напряжения в несколько десятков тысяч вольт;
- 2) для исследования атомного ядра и питания мощных рентгеновских трубок, где они применяются как ге-

нераторы весьма высоких напряжений, вплоть до нескольких миллионов вольт;

3) для измерения электрических полей в весьма широком диапазоне напряженностей поля — от нескольких милливольт на метр до миллиона вольт на метр; измеряемое поле служит в этих измерениях полем возбуждения генератора.

В первых двух случаях емкостные генераторы используются только как машины постоянного тока, в третьем случае — как машины постоянного и переменного тока.

Причиной столь ограниченного использования емкостных машин являются их основные недостатки: малая удельная мощность и низкий к. п. д. До настоящего времени господствует точка зрения на эти недостатки емкостных машин, как на органически им присущие.

Низкий уровень развития производительных сил в XVIII и в начале XIX в. привел к тому, что к моменту открытия Фарадеем закона электромагнитной индукции (1831 г.), послужившему основой для создания и развития индуктивных машин, емкостные машины оставались почти на уровне предыдущего столетия. Создание Якоби в 1834 г. первого индуктивного двигателя постоянного тока и появление спустя несколько лет индуктивных генераторов постоянного тока явилось началом исследования и конструирования индуктивных машин постоянного тока. Применение в этих машинах такого широкого распространенного и обладающего высокими магнитными свойствами материала, как железо, привело к быстрому совершенствованию индуктивных машин. Последние не имеют конкурентов в области преобразования механической энергии в электрическую и наоборот.

Поэтому емкостные машины совершенно выпали из поля зрения электротехников, да и у физиков интерес к ним возобновился лишь во второй четверти нашего столетия в связи с развитием работ по изучению атомного ядра. Так, широко известный ленточный генератор был создан русским ученым Угримовым в 1925 г. [Л. 21], а затем Ван-де-Граафом в 1929 г. [Л. 23].

Отсутствие большого практического интереса к емкостным машинам привело к тому, что за все время их существования не была разработана их общая теория, хотя начало ей и было положено в работах Оллендорфа

[Л. 20], Каплянского [Л. 77] и др. Больше того, в силу многообразия емкостных машин различные авторы по-разному объясняли даже сам принцип работы своих машин. Все эти частные теории, пригодные лишь для определенного типа емкостных машин, даже будучи правильными, вносили большую путаницу и не способствовали выяснению причин основных недостатков емкостных машин и возможностей их устранения.

Основной недостаток емкостных машин — малую удельную мощность — обычно выводят теоретически из сравнения удельной энергии для электрического поля (емкостные машины) и магнитного поля (индуктивные машины). Действительно, полагая, что в идеальном случае вся энергия, запасенная в объеме машины, полностью превращается в механическую [§ 10], можно выразить удельную мощность машины P_0 через удельную энергию W_0 , частоту вращения f и число пар полюсов p :

$$P_0 = 2fpW_0 = \frac{pnW_0}{30},$$

где n — число оборотов машины в минуту.

Удельная энергия магнитного поля

$$W_0 = \frac{\mu H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu},$$

что для воздушного зазора индуктивной машины при индукции

$B = 1 \text{ вб/м}^2$ и $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м}$ дает

$$W_0 = 400 \text{ кдж/м}^3.$$

Для электрического поля

$$W_0 = \frac{\epsilon E^2}{2}.$$

Приняв воздух за рабочий диэлектрик и приравняв удельные энергии магнитного и электрического полей, получим необходимую величину напряженности поля

$$E = \sqrt{\frac{2W_0}{\epsilon_0}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 400 \cdot 10^3}{\frac{1}{36\pi \cdot 10^9}}} = 3 \cdot 10^8 \text{ в/м} = 3000 \text{ кв./см.}$$

Так как такая напряженность поля в 100 раз превышает электрическую прочность воздуха, то делается вывод о невозможности получения в емкостных машинах значительной удельной мощности.

Подобное заключение неправильно. В индуктивных машинах рабочий объем в основном ограничивается объемом междужелезного пространства и большую долю объема всей машины составляет потокопровод, нужный лишь для замыкания магнитного потока. Поэтому удельная энергия индуктивной машины, определенная через отношение мощности машины P к объему всей машины v , числу пар полюсов p и числу оборотов в минуту n ,

$$W_0 = \frac{30P}{vnp}$$

оказывается значительно меньше приведенной выше величины (400 кдж/м^3); для современных мощных генераторов эта удельная энергия не превышает 30 кдж/м^3 .

В емкостной машине отсутствует потокопровод, так как поток вектора смещения прерывен, начинаясь на положительно заряженном теле и оканчиваясь на отрицательно заряженном. Поэтому большую часть объема емкостной машины будет составлять рабочий объем, и величина удельной энергии в реальной конструкции будет ближе к подсчитанной теоретически. Последняя оказывается значительной при соответствующих материалах. Так, Трамп [Л. 92] в машине, работавшей в вакууме ($\epsilon = \epsilon_0$), получал $E = 100 \text{ кв/см}$, что соответствует удельной энергии

$$W_0 = 0,5 \text{ кдж/м}^3.$$

В машине Иоффе и его сотрудников [Л. 57—59], работавшей в керосине, были получены напряженности поля до $E = 150 \text{ кв/см}$, что соответствует удельной энергии при $\epsilon = 2\epsilon_0$

$$W_0 = 2 \text{ кдж/м}^3.$$

Феличи [Л. 91], работая со сжатыми газами, достигал в машине напряженности поля $E = 620 \text{ кв/см}$, что дает для удельной энергии при $\epsilon = \epsilon_0$

$$W_0 = 17 \text{ кдж/м}^3.$$

Если удастся решить задачу использования в емкостной машине сегнетоэлектрика и сосредоточении в нем всего рабочего поля, возможность чего рассматривается ниже, то при $\epsilon = 5000 \epsilon_0$ и $E = 15 \text{ кВ/см}$ удельная энергия составит

$$W_0 = 50 \text{ кДж/м}^3.$$

Керамический диэлектрик, исследованный Сканави [Л. 131], и не являющийся сегнетоэлектриком, обладает следующими свойствами: $\epsilon_r = 1000$, $E_{\text{пр}} = 100 \text{ кВ/см}$.

Для такого диэлектрика удельная энергия при $E = 80 \text{ кВ/см}$

$$W_0 = 255 \text{ кДж/м}^3,$$

а предельная (при $E = 100 \text{ кВ/см}$)

$$W_0 = 400 \text{ кДж/м}^3,$$

т. е. совпадает с энергией магнитного поля при $B = 1 \text{ вб/м}^2$.

Дальнейший прогресс в создании новых видов диэлектриков позволит в еще большей степени увеличить плотность энергии в электрическом поле.

Индуктивные машины имеют весьма важное положительное свойство, объясняемое непрерывностью магнитного потока — в них легко осуществляется сложение магнитных потоков отдельных витков, обтекаемых токами, т. е. элементарных источников магнитного поля, например, создание поля одной или несколькими многовитковыми обмотками.

В емкостных машинах этот путь ограничен в силу прерывности электрического поля. Элементарным источником электрического поля является конденсатор. Введение в его поле второго конденсатора преграждает путь электрическому полю первого конденсатора — оно закончится на проводящих поверхностях второго конденсатора. Остается возможность наложения полей, когда все проводящие поверхности конденсаторов лишь ограничивают поле; такое наложение требует разнесения электродов конденсаторов на большие расстояния и практически нецелесообразно.

Поскольку емкостные машины при современном уровне техники уступают по удельной мощности индуктивным, возникает вопрос, в каких областях электро-

техники емкостная машина, сейчас еще весьма несовершенная, окажется в будущем в состоянии конкурировать с индуктивными машинами? Ответ на этот вопрос вытекает из рассмотрения основных особенностей емкостной машины. Работая при больших напряжениях поля, емкостная машина является машиной малого тока, но высокого напряжения, начиная от нескольких десятков киловольт и выше. Емкостная машина постоянного тока, как это будет показано ниже, может быть выполнена со скрытой коммутацией, т. е. не иметь явного коллектора. Тем самым, наряду с упрощением подобной машины, отпадают коллекторные пульсации.

Индуктивные машины являются, по сути дела, машинами низкого напряжения и большого тока. Для машин переменного тока это не является существенным недостатком, так как напряжение генератора легко повышается таким надежным статическим устройством, как трансформатор. Для получения постоянного тока высокого напряжения, из-за невозможности создания коллекторной машины высокого напряжения, приходится прибегать к ионным или другим выпрямителям, чрезвычайно усложняющим всю схему и ее эксплуатацию.

Поэтому можно считать, что емкостные машины при надлежащей работе над их совершенствованием, окажутся в состоянии заменить индуктивные машины во многих случаях, где требуется постоянный ток высокого напряжения. При этом емкостная машина постоянного тока высокого напряжения заменит совокупность индуктивной машины переменного тока низкого напряжения с трансформатором и преобразовательным устройством. Сопоставление по удельной энергии, с учетом объема трансформатора и преобразовательного устройства, может оказаться со значительным перевесом в пользу емкостной машины.

В ряде случаев может оказаться существенным, что емкостная машина высокого напряжения, будучи машиной малого тока, не содержащей ферромагнитных материалов, не создает таких магнитных помех, как индуктивная машина.

К числу областей применения емкостных машин, где замена ими индуктивных машин окажется целесообразной уже в ближайшее время, относятся:

1) питание различной аппаратуры, работающей на постоянном токе высокого напряжения — электрофильтры, электросепараторы, специальные радиотехнические устройства, электронные микроскопы, устройства для окраски в электрическом поле и т. п.;

2) испытание постоянным током высокого напряжения кабелей, изоляторов и другой высоковольтной аппаратуры;

3) питание различных импульсных установок, в которых импульс создается путем зарядки и разрядки конденсатора;

4) устройства, использующие феррозонды, где емкостные двигатели малой мощности, почти не создающие магнитных помех, можно расположить вблизи феррозонда и тем самым уменьшить общие габариты (например геологические поисковые аэромагнитометры);

В будущем, при условии создания мощных емкостных машин, может оказаться возможным применение их при передаче энергии постоянным током; в случае создания мощного ядерного генератора высокого напряжения — непосредственное превращение атомной энергии с помощью емкостного двигателя высокого напряжения в механическую энергию, минуя промежуточный тепловой цикл; использование их в качестве источника высокого напряжения для ионных и плазменных двигателей космических ракет [Л. 136—138].

ГЛАВА ПЕРВАЯ

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЕМКОСТНЫХ МАШИН

§ 1. Существующие классификации

Отсутствие единого взгляда на работу емкостных машин при наличии разнообразных форм их выполнения привело к тому, что до сих пор не создана общая классификация емкостных машин постоянного тока, четко определяющая основные особенности различных типов машин.

Существующие попытки создать классификацию емкостных машин, повторяя ошибку, ведущую начало от Гольца, рассматривали главным образом машины с диэлектрическим ротором, считая их основным видом емкостных машин.

Классификация, предложенная Пионшоном [Л. 83], подразделяет все машины на три группы в зависимости от того, на какой объект действует электростатическая индукция — на изолированный проводник, на заземленный проводник, на проводник, снабженный остриями.

Несостоятельность этой классификации видна уже хотя бы из того, что, например, машину Уимшерста, отнесенную Пионшоном к первой группе, с одинаковым основанием можно было бы причислить ко второй группе, потому что в этой машине так называемые «диаметральные» проводники соединены с заземленным корпусом. Признак третьей группы этой классификации можно отнести ко всем машинам.

В 1947 г. Жоливе [Л. 83] предложил свою классификацию емкостных машин, в которой рассматривает машины с диэлектрическим ротором (диском) и пользуется следующей терминологией. Изолированные электроды S (рис. 2, e), расположенные с одной стороны вращаю-

щегося диэлектрического диска R , к которым подведено напряжение возбуждения, Жоливе называет «индукторами». В поле индукторов находятся (с другой стороны диска) «главные гребенки», к которым подключена нагрузка. Кроме главных гребенок, в некоторых типах машин могут быть еще «вспомогательные гребенки» — например, щетки «диаметрального проводника».

В зависимости от роли главных гребенок Жоливе подразделяет емкостные машины на три группы: 1) машины, в которых одна главная гребенка является передатчиком зарядов, другая — приемником; 2) машины, в которых главные гребенки являются только приемниками зарядов, передаваемых на диск вспомогательными передаточными гребенками (например, щетками диаметрального проводника); 3) машины, в которых каждая из главных гребенок одновременно является передатчиком и приемником зарядов.

Новым в классификации Жоливе является введение им еще дополнительного подразделения основных групп в зависимости от способа зарядки индукторов, т. е., другими словами, от способа создания возбуждающего поля. Он различает непрерывную зарядку, когда индукторы все время соединены с источником постоянного напряжения, и прерывную, при которой индукторы периодически пополняют свои заряды, уменьшающиеся за счет неизбежной утечки. Непрерывную зарядку Жоливе разбивает на три вида: независимое возбуждение, самовозбуждение, возбуждение трением. Прерывная зарядка осуществляется двумя путями: периодическим подключением к постороннему источнику или за счет прерывной ионизации воздушного промежутка, периодически происходящей при определенных условиях.

Недостатки классификации Жоливе это, во-первых, ее недостаточная общность — она применима в основном к машинам с диэлектрическим ротором, откуда и заимствована вся терминология; во-вторых, разделение машин не по их основным признакам; в-третьих, недостаточная полнота подразделения.

§ 2. Новая классификация

Недостатки существующих классификаций емкостных машин побудили нас к созданию общей классифи-

кации, базирующейся на основных свойствах и особенностях емкостных машин.

В основу нашей классификации положены следующие признаки: 1) способ сообщения заряда, 2) характер применяемого поля, 3) схема возбуждения, 4) характер коммутации, 5) конструкция ротора, 6) характер движения. Объяснение работы различных типов машин будем производить, используя схемы рис. 2, где жирными линиями условно изображены элементы ротора R и статора S . Принципиальные схемы выполнены применительно к проводящим дискам, состоящим из двух полудисков; вращение ротора указано стрелкой. Токосъем осуществляется щеткой, скользящей по ротору. Диэлектрический ротор изображен штриховкой; токосъем с него производится с помощью коронирующих гребенок. Для упрощения предполагается, что машины не имеют утечки; лишь в тех случаях, где это необходимо, утечки указаны.

1. По способу сообщения заряда движущемуся ротору все емкостные машины разбиваются на две группы — кондукционные и индукционные.

Работа кондукционной машины, схематически представленной на рис. 2, *a*, сводится к следующему. При максимальной емкости статор — ротор (нижний полудиск), ротор заряжается от источника постоянного напряжения возбуждения U_S . Затем заряженный ротор движется в электрическом поле против сил поля; при этом емкость статор — ротор уменьшается. При минимальной емкости (верхний полудиск) ротор разряжается через нагрузку g .

В кондукционных машинах заряд на роторе забирается в определенный момент из цепи возбуждения путем кондуктивного соединения (или через разрядный промежуток) элемента ротора с источником цепи возбуждения. Характерной особенностью кондукционных машин является отбор мощности от источника возбуждения за счет постоянного тока в цепи возбуждения ($I_S \neq 0$).¹ Мощность, развиваемая кондукционным генератором, состоит из суммы мощностей, отбираемой от источника возбуждения и получающейся за счет преоб-

¹ Здесь под I_S следует понимать постоянную составляющую тока возбуждения, так как ток возбуждения может содержать еще и переменную составляющую.

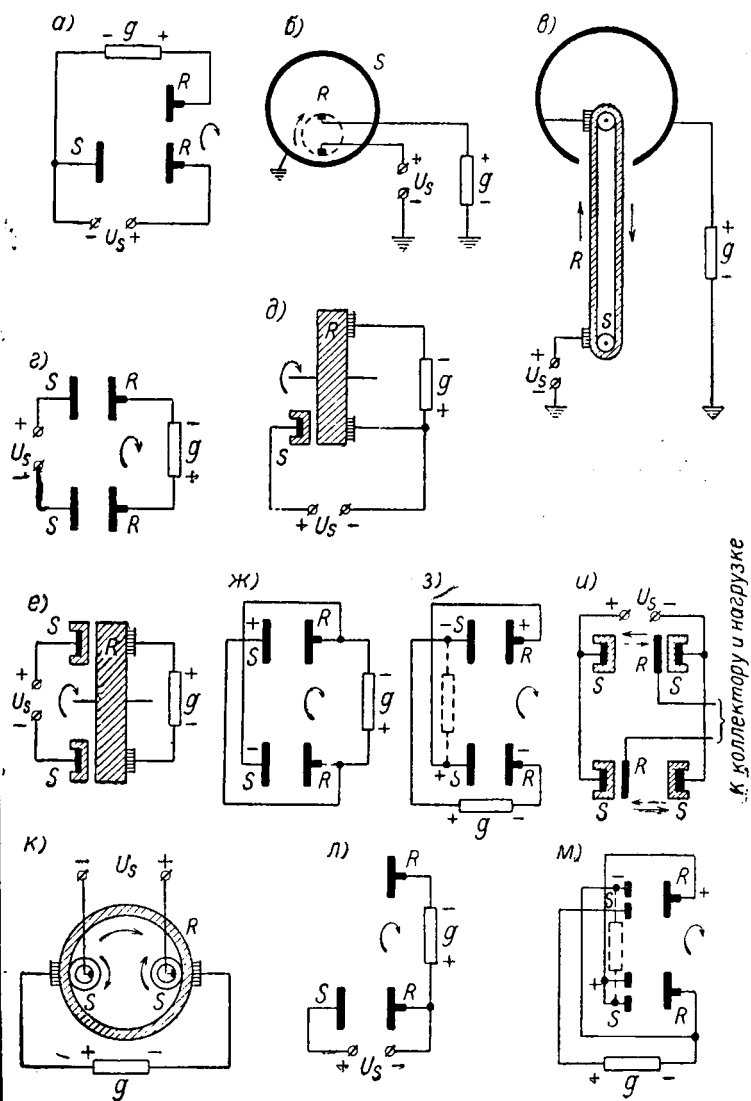


Рис. 2.

разования подводимой механической энергии в электрическую. Теоретически ток цепи возбуждения равен току, протекающему через приемник; практически из-за утечки ток возбуждения больше тока в приемнике.

К числу кондукционных машин относится машина Иоффе (рис. 2, б), отличающаяся лишь тем, что ее ротор R состоит не из двух, а из большего числа частей, и статор S имеет замкнутую цилиндрическую форму.

Машина с ленточным ротором (рис. 2, в) также является кондукционной. То обстоятельство, что ротор диэлектрический, не вносит принципиально никаких изменений. Такой ротор может рассматриваться, как металлический, но состоящий из бесконечно большого числа изолированных друг от друга частей. Действительно, если бы на поверхности ленты поместить ряд металлических, не соприкасающихся друг с другом, полосок, машина работала бы точно так же.

В отличие от кондукционных машин, в машинах индукционных заряд на роторе создается путем электростатической индукции. Ток цепи возбуждения этих машин не содержит постоянной составляющей ($I_S = 0$). Эти машины не требуют затраты мощности на возбуждение, помимо, конечно, мощности, расходуемой на неизбежные утечки в статоре.

Работа такой машины (рис. 2, г) была уже объяснена во введении. Ток цепи приемника замыкается через ротор, не попадая в статор.

Различным видам индукционных машин на рис. 2 соответствуют схемы д, е, ж, з, и, к, м.

2. По характеру электрического поля, в котором движется ротор, все емкостные машины делятся на две группы — униполярные и биполярные.

В униполярных машинах (рис. 2, а, б, в, д, л) ротор движется в поле возбуждения неизменного направления. Заряд, возникающий на элементе поверхности ротора, находящемся в поле возбуждения, снимается с него по выходе этого элемента из поля, или, вернее, при переходе в значительно более слабое поле. Для полного снятия заряда необходимо, чтобы электрод, снимающий заряд с ротора, находился внутри замкнутой металлической поверхности (рис. 2, в).

Как видно из принципиальных схем униполярных машин, все они требуют постороннего источника напряже-

ния для создания поля возбуждения. В индукционных машинах (рис. 2, *д*, *л*) это объясняется тем, что потенциал статора S должен быть больше потенциала положительного полюса машины. Ток кондукционных машин (рис. 2, *а*, *б*, *в*) равен току источника возбуждения, и этот источник не может быть заменен частью напряжения машины.

Все униполярные машины характеризуются худшим использованием рабочей поверхности ротора, так как по-

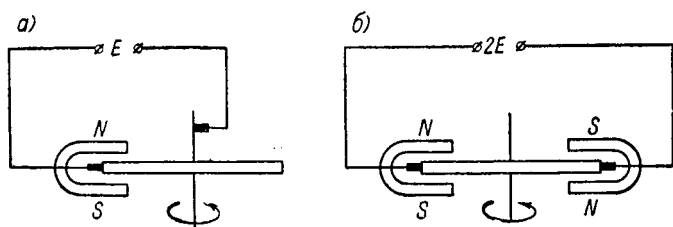


Рис. 3.

верхность ротора работает полезно лишь в течение половины периода вращения, и поэтому дают меньшую удельную мощность. Это положение особенно наглядно видно на ленточной машине. Здесь заряд переносит только поднимающаяся половина ленты; опускающаяся часть в создании тока машины не участвует.

Униполярные машины работают за счет изменения емкости статор — ротор от максимального значения в момент нахождения в поле возбуждения (момент зарядки), до минимального значения в момент снятия заряда (момент разрядки); в идеальном случае емкость равна нулю.

Биполярные машины характеризуются тем, что ротор при своем движении переходит из поля одного направления в поле противоположного направления. Биполярным емкостным машинам соответствуют схемы рис. 2, *г*, *е*, *ж*, *з*, *и*, *к*. При изменении знака поля возбуждения происходит перезарядка поверхности ротора. Если в униполярных машинах за один период вращения ротора происходит одна зарядка и одна разрядка ротора, то в биполярной машине за то же время происходит две перезарядки, что при прочих равных усло-

виях приводит к увеличению тока по сравнению с униполярной машиной в два раза. Емкость статор — ротор в биполярной машине изменяется в пределах от $C_{\text{макс}}$ до — $C_{\text{макс}}$. В остальном биполярная машина работает так же, как униполярная.

Биполярная машина является как бы удвоенной униполярной. Это положение справедливо и для индуктивных машин (машин с магнитным полем). На рис. 3 схема *а* соответствует простейшей униполярной машине (диск Фарадея), а схема *б* — биполярной машине. Биполярная машина дает э. д. с. вдвое большую, чем униполярная, при том же размере диска и той же скорости вращения.

3. В зависимости от схемы возбуждения емкостные машины так же, как и индуктивные, разделяются на две основные группы — с независимым возбуждением и самовозбуждением. Машины первой группы могут быть униполярными и биполярными, машины второй группы — только биполярными.

К первой группе относятся схемы *а, б, в, г, д, е, и, к* на рис. 2; к этой группе принадлежит, например, машина Теплера, имевшая на той же оси дополнительный диск — возбудитель. Воробьев [Л. 128] неправильно относит машину Теплера к самовозбуждающимся.

Машины с самовозбуждением могут быть осуществлены в трех вариантах: с параллельным возбуждением, с последовательным возбуждением и со смешанным возбуждением.

Схема биполярной машины с параллельным возбуждением представлена на рис. 2, *ж*; общеизвестная машина Уимшерста с двумя дисками также относится к этой группе.

На рис. 2, *з* изображена схема емкостной биполярной машины с последовательным возбуждением. Машина со смешанным возбуждением представлена схемой рис. 2, *м*. В этой машине статор (по крайней мере его половина) должен быть разделен на две части, находящиеся под разными напряжениями. На рис. 2, *з* и *м* пунктиром указана проводимость утечки статора, без которой работа этих машин невозможна.

4. Характер коммутации емкостной машины определяется материалом ротора. Так, при роторе, выполнен-

ном из проводящего материала, коммутация всегда явная; имеется специальный коллектор или отдельные изолированные друг от друга части ротора одновременно выполняют роль коллектора, по которому скользят хотя бы в одной точке щетки. К группе машин с явной коммутацией относятся схемы *а, б, г, ж, з, и, л, м* на рис. 2.

При диэлектрическом роторе коммутация носит неявный, скрытый характер. Она осуществляется отдельными элементами рабочей части поверхности ротора и щеткой, которая в этом случае приобретает такие размеры, чтобы обеспечить снятие заряда со всей рабочей поверхности ротора.

Таблица 1

№ п.п.	Признак	Тип машины
1	Способ создания заряда	1. Кондукционная 2. Индукционная
2	Характер поля	1. Униполярная 2. Биполярная
3	Схема возбуждения	1. С независимым возбуждением 2. С самовозбуждением а) параллельным, б) последовательным, в) смешанным
4	Характер коммутации	1. С явной коммутацией—проводящий ротор 2. С неявной коммутацией — диэлектрический ротор
5	Конструкция ротора	1. С твердым ротором а) дисковым, б) цилиндрическим 2. С гибким ротором
6	Характер движения	1. С вращательным движением 2. С поступательно-возвратным движением

Из схем, представленных на рис. 2, к группе машин с неявной коммутацией относятся схемы *в, д, е, к*.

5. По конструктивному характеру выполнения ротора емкостные машины делятся на две группы: с твердым ротором и гибким ротором.

Машины с твердым ротором как с проводящим, так и с диэлектрическим, могут быть выполнены дисковыми или цилиндрическими. Дисковому варианту соответствуют схемы *а, г, д, е, ж, з, л, м* на рис. 2; сюда же относятся и машины Уимшерста, Теплера, Гольца. Схемы *б, к* на рис. 2 соответствуют цилиндрическому ротору.

Гибкий диэлектрический ротор выполняется в виде ленты, водяных капель [Л. 7], струи пара [Л. 4], струи пыльного воздуха [Л. 24, 26, 41, 47, 60]; возможны варианты с гибким проводящим ротором — отдельные металлические пластинки, металлические шарики, ртуть [Л. 53]. Гибкому ротору соответствует схема рис. 2, *в*.

6. По характеру используемого движения емкостные машины могут быть разбиты на две группы: машины с вращательным движением и машины с поступательно-возвратным движением. Те и другие могут быть выполнены с твердым и гибким ротором, проводящим и диэлектрическим. Рис. 2, *и* соответствует машине с металлическим ротором и поступательно-возвратным движением; остальные схемы — с вращательным движением.

Периодические изменения емкости в машине поступательно-возвратного движения осуществляются при движении роторных пластин в разные стороны, как это указано стрелками на рис. 2, *и*. Для получения постоянного тока машина должна быть снабжена коллектором (на схеме не показан).

Предлагаемая классификация приведена в табл. 1.

§ 3. О теории емкостных машин

Работа любой емкостной машины основана на взаимном преобразовании механической и электрической энергии при движении заряженных проводящих или диэлектрических тел в электрическом поле.

Как уже указывалось во введении, общей теории емкостных машин до сих пор нет. Общим и основным недостатком почти всех работ, посвященных вопросу этой

теории, является принципиально неверный подход к емкостной машине, как к чисто электростатическому устройству. Такой подход приводит либо к неправильным результатам, либо, в лучшем случае, к пригодным лишь для определенного типа машин. Исключением являются работы Оллендорфа [Л. 20] и Каплянскогo [Л. 77], рассматривавших емкостные машины с точки зрения общих положений электродинамики; при этом первый исходил непосредственно из уравнений Максвелла, второй из уравнений Лагранжа. Однако Оллендорф и Каплянский ограничились лишь установлением самых общих соотношений для различных емкостных машин с проводящим ротором, не занимаясь подробным рассмотрением конкретных типов машин постоянного тока.

Отсутствие общей теории емкостных машин приводит к целому ряду ошибок. Так, в литературе широко распространено представление о двух типах емкостных машин — с постоянной емкостью и с переменной емкостью, хотя во введении уже указывалось на возможность преобразования энергии (механической в электрическую или наоборот) лишь в системе с переменной емкостью. Даже в вышедшей в 1955 г. книге Воробьева [Л. 128] повторяется утверждение о двух типах машин.

В действительности существуют не два указанных типа емкостных машин, а лишь два способа рассмотрения действия этих машин. Первый из них исходит из представления о заряженной поверхности, движущейся в электрическом поле. Теория, основанная на этом представлении, была развита для машин с диэлектрическим ротором ленточного типа, а затем перенесена на машины с проводящим ротором. Если поверхность F заряжена с поверхностной плотностью σ , то при движении ее в электрическом поле E , тангенциальном по отношению к заряженной поверхности, на единицу поверхности действует сила σE . Обозначим тангенциальную составляющую скорости элемента поверхности через V_t ; тогда мощность, затрачиваемая на движение всей поверхности, равна $\int \sigma E V_t dF$.

Равенство между этой подводимой механической мощностью и электрической мощностью, развиваемой машиной, кладется в основу всего расчета.

Для этого способа расчета необходимо знать закон распределения поверхностной плотности и уметь точно

рассчитать электрическое поле, что далеко не всегда удается сделать.

Применение этого способа к машинам с проводящим ротором осложняется тем, что сила, действующая на единицу заряженной проводящей поверхности, равная $\frac{\epsilon E^2}{2}$, всегда нормальна к поверхности. Другими словами, эта сила в различных точках поверхности ротора составляет разный угол с направлением движения и расчет мощности весьма осложняется.

Другой способ рассматривает емкостную машину как совокупность емкостей, изменяющихся при вращении машины. Этот способ позволяет значительно проще, чем первый, прийти к окончательному результату. Кроме того, он дает возможность использовать его с одинаковым успехом как для машин с проводящим ротором, так и с диэлектрическим. Этот способ использовал Иоффе [Л. 57], создавая теорию своего генератора. Однако его теория, сводящаяся к зарядке элемента ротора при максимальной емкости (относительно статора) и разрядке при минимальной емкости, является частной теорией, пригодной лишь для униполярных кондукционных генераторов. Даже для этих генераторов, давая правильное значение средних величин (напряжения холостого хода, тока короткого замыкания), его теория не в состоянии ответить на целый ряд вопросов — например, о форме кривых тока (напряжения).

Оба способа, конечно, совершенно эквивалентны друг другу и при правильном их использовании приводят к одним и тем же результатам.

Развиваемая нами теория также основана на рассмотрении переменных емкостей в машине. В отличие от теории индуктивных машин, являющейся, по сути дела, графоаналитической (из-за необходимости учета нелинейности кривой намагничивания), теория емкостных машин является чисто аналитической. Возможность создания аналитической теории определяется отсутствием нелинейности в рабочем диэлектрике; последнее обстоятельство отпадает при использовании сегнетоэлектриков. Но даже там, где мы вводим нелинейность — утечки машины, мы все же сохраняем аналитический характер всех выводов,

Исходное уравнение для емкостной машины получается из первого уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{j} + \frac{d\bar{D}}{dt} \quad (1)$$

путем исключения вектора напряженности магнитного поля. Взяв расхождение от обеих частей уравнения (1), получим

$$\operatorname{div} \bar{j} = -\operatorname{div} \frac{d\bar{D}}{dt}. \quad (2)$$

Проинтегрируем последнее равенство по объему v , ограниченному замкнутой поверхностью F

$$\int_v \operatorname{div} \bar{j} dv = - \int_v \operatorname{div} \frac{d\bar{D}}{dt} dv. \quad (3)$$

Преобразуя объемный интеграл в поверхностный, придем к

$$\int_F \bar{j} d\bar{F} = - \frac{d}{dt} \int_F \bar{D} d\bar{F}. \quad (4)$$

Левая часть этого уравнения представляет собой ток через поверхность F , правая часть — изменение заряда, заключенного в объеме v , т. е.

$$i = - \frac{dq}{dt}. \quad (5)$$

Это уравнение является основным для всех емкостных машин, подобно тому как $e = - \frac{d\psi}{dt}$ (закон электромагнитной индукции) служит исходным уравнением для всех индуктивных машин.

Таким образом, рассмотрение конкретного типа машин сводится в первую очередь к исследованию способов создания зарядов и их изменения во времени при вращении машины. Выше были вкратце указаны различные методы решения этой задачи.

В главах II и III будет подробно рассмотрена машина с индукционным созданием заряда на роторе как

биполярная, так и униполярная. Индукционная машина выбрана, как наиболее совершенная, не требующая расхода мощности на возбуждение (§ 2).

ГЛАВА ВТОРАЯ

ТЕОРИЯ БИПОЛЯРНЫХ МАШИН

§ 4. Дифференциальные уравнения машины

Принцип действия биполярной двухполюсной емкостной машины с проводящим ротором, состоящей из двух пар полудисков (рис. 1), был пояснен во введении.

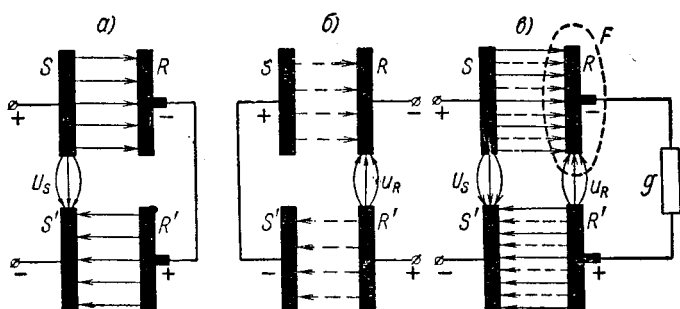


Рис. 4.

Впервые подобная машина, являющаяся по существу развитием машины Теплера, была предложена Яблочковым еще в 1879 г. [Л. 10]. Машина Яблочкова была четырехполюсной и, не имея коллектора, являлась машиной переменного тока.

Изобразим условно полудиски статора и ротора в виде пластин SS' и RR' на рис. 4, а и будем считать, что ротор замкнут накоротко (его напряжение $u_R = 0$), а на статор подано постоянное напряжение возбуждения U_S . Тогда заряд на статоре, равный потоку смещения, исходящему из пластины S

$$q_S = C_S U_S, \quad (6)$$

где C_S — емкость статора.

Заряд на роторе, равный потоку, входящему в пластину R , и создаваемый напряжением статора, опреде-

ляется аналогично, но вместо емкости статора **стоит** взаимоемкость C_{RS} между статором и ротором

$$q_R = C_{RS} U_S. \quad (7)$$

Взаимоемкость равна половине емкости C между пластиной S и R

$$C_{RS} = \frac{C}{2}. \quad (8)$$

Если напряжение на роторе не равно нулю — ротор замкнут на приемник — то оно создает свое поле, поле якоря, сказывающееся на величине заряда ротора (реакция якоря). Принимая, что диэлектрическая проницаемость в зазоре статор — ротор постоянна¹, можно применить принцип наложения, определяя заряд как сумму зарядов при $U_S \neq 0, u_R = 0$

$$\left. \begin{aligned} q_{S1} &= C_S U_S \\ q_{R1} &= C_{RS} U_S \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

и зарядов при $U_S = 0, u_R \neq 0$

$$\left. \begin{aligned} q_{S2} &= C_{RS} u_R \\ q_{R2} &= C_R u_R \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Тогда

$$\left. \begin{aligned} q_S &= q_{S1} + q_{S2} = C_S U_S + C_{RS} u_R \\ q_R &= q_{R1} + q_{R2} = C_R u_R + C_{RS} U_S \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Это наложение представлено на рис. 4.

При вращении ротора его емкость C_R несколько изменяется за счет изменения положения щели между полудисками статора, а емкость статора C_S — за счет изменения положения щели между полудисками ротора. Однако ширина щели мала по сравнению с диаметром диска. Поэтому, пренебрегая влиянием щели, примем, что емкости C_R и C_S остаются при вращении ротора постоянными; изменяется только взаимоемкость C_{RS} .

Окружая мысленно сначала пластину R , а затем S замкнутой поверхностью F так, чтобы соединительный

¹ Случай нелинейного диэлектрика рассмотрен в приложении 1.

провод один раз пересекает эту поверхность, и считая, что ток через поверхность F равен нулю всюду, кроме соединительного проводника, получим на основании равенства (5):

$$\left. \begin{aligned} -i_R &= \frac{dq_R}{dt} = C_R \frac{du_R}{dt} + U_S \frac{dC_{RS}}{dt} \\ -i_S &= \frac{dq_S}{dt} = C_{RS} \frac{du_R}{dt} + u_R \frac{dC_{RS}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

В реальной емкостной машине необходимо еще учесть утечки в изоляции. Примем, что утечки имеются между полудисками статора g_S и полудисками ротора g_R ; проводимостью между статором и ротором пренебрегаем.

Тогда уравнения (12) должны быть дополнены членами, соответствующими токам утечки:

$$\left. \begin{aligned} -(i + u_R g_R) &= C_R \frac{du_R}{dt} + U_S \frac{dC_{RS}}{dt} \\ -(i_S - U_S g_S) &= C_{RS} \frac{du_R}{dt} + u_R \frac{dC_{RS}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где i — ток в приемнике. Так как напряжение на нем u совпадает с напряжением u_R ротора, то в дальнейшем будем опускать индекс R у напряжения ротора.

§ 5. Форма кривых тока и напряжения

Как известно, преобразование механической энергии в электрическую возможно только путем генерирования переменного тока; для получения постоянного тока необходима коммутация. Поэтому емкостная машина постоянного тока представляет собой в простейшем случае однофазную синхронную машину, снабженную коммутатором. Рассмотрим однофазную синхронную машину в генераторном режиме.

Такая машина, схематически изображенная на рис. 5, имеет два полудиска на статоре (S_1 и S_2) и два полудиска на роторе (R_1 и R_2). К первым полудискам подключено постоянное напряжение возбуждения U_S ; полудиски ротора через кольца и щетки соединены с приемником.

Несмотря на то, что для машины переменного тока существенную роль играет индуктивность приемника, здесь рассматривается чисто активный приемник, так как в дальнейшем исследуется лишь машина постоянного тока с очень большим числом элементов ротора, когда действием индуктивности можно пренебречь, подобно тому, как это принимается в теории индуктивных машин постоянного тока.

При вращении машины емкость C между полудисками ротора и статора изменяется из-за симметрии

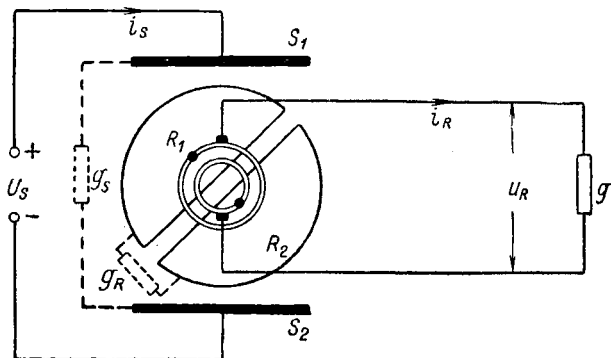


Рис. 5.

от C_m до C_m . Закон изменения емкости при равномерном вращении с угловой скоростью ω зависит от формы полудисков статора и ротора; при круглых дисках (рис. 1) емкость C изменяется по треугольной кривой (приложение 2). В общем случае эта емкость может быть представлена в виде ряда

$$C = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin k\omega t; \quad (14)$$

при симметрии машины $k=2n+1$, где $n=0, 1, 2, \dots$. Подставляя взаимоемкость из равенств (8) и (14) в (13) и заменяя u через $\frac{i}{g}$, получим уравнение для определения тока в приемнике

$$C_R \frac{di}{dt} + (g + g_R) i + \frac{U_S g \omega}{2} \sum_{k=1}^{\infty} k C_k \cos k\omega t = 0. \quad (15)$$

Его решение для установившегося режима

$$i = \frac{U_S g \omega}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k C_k}{\sqrt{(g + g_R)^2 + k^2 \omega^2 C_R^2}} \sin \left(k \omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi_k \right),$$

где

$$\varphi_k = \arctg \frac{k \cdot C_R}{g + g_R};$$

напряжение на приемнике

$$u = \frac{U_S \omega}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k C_k}{\sqrt{(g + g_R)^2 + k^2 \omega^2 C_R^2}} \sin \left(k \omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi_k \right).$$

В режиме короткого замыкания ток достигает своего наибольшего значения, определяемого из (16) при $g = \infty$,

$$i_{кз} = \frac{U_S \omega}{2} \sum_{k=1}^{\infty} k C_k \sin \left(k \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

и не зависит от емкости ротора C_R .

Это происходит потому, что в уравнении (15) член, содержащий C_R , определяется реакцией якоря (реакцией напряжения), отсутствующей при коротком замыкании.

Напряжение машины изменяется в пределах от нуля при коротком замыкании (кз) до максимального значения при холостом ходе (хх) ($g = 0$)

$$u_{хх} = \frac{U_S \omega}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k C_k}{\sqrt{g_R^2 + k^2 \omega^2 C_R^2}} \sin \left(k \omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi_{k хх} \right),$$

где

$$\varphi_{k хх} = \arctg \frac{k \omega C_R}{g_R}.$$

Для идеальной машины без утечки ($g_R = 0$) напряжение холостого хода равно

$$u_{хх ид} = \frac{U_S}{2 C_R} \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin (k \omega t - \pi).$$

Амплитуда напряжения холостого хода такой машины при пренебрежении потоком рассеяния ротора, т. е. принимая $C_R = \frac{C_m}{2}$, будет

$$U_{m \text{ хх ид}} = \frac{U_S}{C_m} \sum_{k=1}^{\infty} C_k = U_S \frac{\sum_{k=1}^{\infty} C_k}{\sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin k \frac{\pi}{2}} = U_S N. \quad (21)$$

Величина N зависит от закона изменения емкости статор — ротор, обращаясь в единицу при синусоидальном изменении, т. е. $N_{\sim} = 1$. При изменении по равнобедренной трапеции

$$N = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(2k-1)\alpha}{(2k-1)^2}}{\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} \frac{\sin(2k-1)\alpha}{(2k-1)^2}} = \frac{L\left(\frac{\pi}{2}\right) - L\left(\frac{\alpha}{2}\right) - L\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)}{\frac{\pi\alpha}{4}}, \quad (22)$$

где α — значение аргумента, соответствующее началу горизонтального участка трапеции, а L — функция Лобачевского; значения ее приведены в таблицах.

Величина N очень медленно растет с уменьшением α и лишь при очень малых значениях начинает быстро возрастать. Так, для треугольника, что соответствует круговым дискам статора и ротора, $\alpha = \frac{\pi}{2}$ и $N_{\Delta} = 0,745$;

при $\alpha = \frac{\pi}{4}$ $N_{\frac{\pi}{4}} = 1,08$; при $\alpha = \frac{\pi}{6}$ $N_{\frac{\pi}{6}} = 1,49$, и лишь

при $\alpha = 0$ $N_{\square} = \infty$. Но этот предельный случай, соответствуя изменению емкости по прямоугольнику, физического смысла не имеет, так как мгновенное изменение емкости невозможно. Кроме того, переход от треугольника к более тупой кривой за счет изменения формы дисков при том же значении наибольшего радиуса диска, влечет за собой уменьшение максимальной емкости C_m (приложение 2).

Таким образом, при практически целесообразных законах изменения емкости статор — ротор (между тре-

угольником и синусоидой) амплитуда напряжения холостого хода всегда меньше напряжения возбуждения.

Из выражений (16) и (17) следует, что форма кривых тока и напряжения не совпадает с формой кривой изменения емкости и различие возрастает по мере приближения к режиму короткого замыкания. Приняв наиболее вероятный характер изменения емкости — по треугольнику

$$C_{\Delta} = \frac{8C_m}{\pi^2} \left[\sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t \mp \dots \right],$$

где C_m — максимальное значение емкости, получим, что амплитуда третьей гармоники в кривой емкости составляет 11% от амплитуды основной частоты, а в токе короткого замыкания

$$i_{\text{кз}\Delta} = \frac{4\omega U_S C_m}{\pi^2} \left[\sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{1}{3} \sin \left(3\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{1}{5} \sin \left(5\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \mp \dots \right]$$

амплитуда третьей гармоники составит уже 33% амплитуды основной частоты.

По мере удаления от режима короткого замыкания амплитуды высших гармоник тока (напряжения) будут составлять все меньшую долю амплитуды основной частоты, однако большую соответствующей величины для кривой емкости. При изменении емкости по треугольнику отношение амплитуды третьей гармоники тока (напряжения) к амплитуде основной частоты будет всегда больше 11%.

Подставляя напряжение ротора из выражения (17) во второе равенство (13), получим, что ток статора, помимо постоянной составляющей, будет содержать четные гармоники (частоты $2k\omega$), обращающиеся в нуль в режиме короткого замыкания.

В дальнейшем, в целях большей наглядности, примем, что емкость изменяется по синусоидальной кривой

$$C = C_m \sin \omega t, \quad (23)$$

что близко к реальному изменению емкости по треугольнику для круглых дисков. Расчет необходимой формы

диска для синусоидального изменения емкости приведен в приложении 2. Тогда протекающий через приемник ток

$$i = \frac{U_S \omega C_m g}{2 \sqrt{(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^2}} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi \right), \quad (24)$$

напряжение

$$u = \frac{U_S \omega C_m}{2 \sqrt{(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^2}} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi \right), \quad (25)$$

и ток статора

$$i_s = U_S g_s + \frac{U_S \omega^2 C_m^2}{4 \sqrt{(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^2}} \sin \left(2\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi \right), \quad (26)$$

где

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega C_R}{g + g_R}.$$

§ 6. Простейшая машина постоянного тока

Простейшая машина постоянного тока (рис. 1) отличается от однофазной синхронной машины лишь наличием коммутатора в виде щеток, скользящих по диску. Ширина щеток должна быть меньше ширины щели, так как в отличие от индуктивных машин, коммутация емкостных машин должна производиться с разрывом цепи ротора; в противном случае разряд полудисков ротора (рис. 1) происходил бы через щетки, минуя приемник.

Характерной величиной для емкостной машины следует считать весь ток, развиваемый ею — индуктированный ток I_0 — равный сумме токов нагрузки и утечки. Этот ток проще всего вычислить в режиме короткого замыкания, когда ток утечки равен нулю, а ток, протекающий через приемник, определяется из (24) при $g = \infty$:

$$i_{кз} = \frac{U_S \omega C_m}{2} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (27)$$

При щетках, расположенных на геометрической нейтральной, т. е. симметрично относительно полудисков статора, среднее значение индуктированного тока

$$I_0 = \frac{2}{T} \int_{\omega t = \frac{\pi}{2}}^{\omega t = \frac{3\pi}{2}} i_{кз} dt = \frac{U_S \omega C_m}{\pi} = 2U_S C_m f, \quad (28)$$

где f — частота вращения.

Величина индуктированного тока не зависит от закона изменения емкости статор — ротор. Действительно, взяв среднее значение тока короткого замыкания (18), получим

$$I_0 = \frac{U_S \omega}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin k \frac{\pi}{2} = \frac{U_S \omega C_m}{\pi},$$

так как

$$\sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin k \frac{\pi}{2} = C_m.$$

Помимо индуктированного тока, для машины постоянного тока представляет интерес определение напряжения холостого хода. Из равенства (25)

$$U_{xx} = \frac{U_S \omega C_m}{2\sqrt{g_R^2 + \omega^2 C_R^2}} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi_{xx} \right), \quad (29)$$

где

$$\varphi_{xx} = \arctg \frac{\omega C_R}{g_R}.$$

Среднее значение этого напряжения при щетках на геометрической нейтральной

$$U_{xx} = \frac{U_S \omega C_m}{\pi \sqrt{g_R^2 + \omega^2 C_R^2}} \cos \varphi_{xx} \quad (30)$$

близко к нулю, так как при хорошей изоляции g_R очень мало и φ_{xx} близко к $\frac{\pi}{2}$. Для идеальной машины $g_R = 0$ и $U_{xx} = 0$.

Величина тока (среднее значение) при щетках на геометрической нейтрали

$$I = \frac{U_S \omega C_m g}{\pi \sqrt{(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^2}} \cos \varphi =$$

$$= \frac{U_S \omega C_m}{\pi} \frac{g}{g + g_R} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2 C_R^2}{(g + g_R)^2}}} \cos \varphi = I_0 \frac{g}{g + g_R} \cos^2 \varphi,$$
(31)

при $\omega C_R \gg g_R$, значительно меньше тока короткого замыкания.

Если сдвинуть щетки на угол φ , то величина тока (а следовательно, и напряжения) несколько увеличится

$$I = \frac{U_S \omega C_m g}{\pi \sqrt{(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^2}} = I_0 \frac{g}{g + g_R} \cos \varphi, \quad (32)$$

$$U = \frac{I_0}{g + g_R} \cos \varphi.$$

Однако и в этом случае напряжение холостого хода

$$U_{xx} = \frac{U_S \omega C_m}{\pi \sqrt{g_R^2 + \omega^2 C_R^2}}$$

даже для идеальной машины без утечки и рассеяния, для которой $C_R = \frac{C_m}{2}$, не превышает напряжения возбуждения

$$U_{xx \text{ ид}} = \frac{U_S C_m}{\pi C_R} = \frac{2}{\pi} U_S. \quad (33)$$

Причиной резкого уменьшения тока по мере нагрузки машины (отхода от режима короткого замыкания) является реакция якоря (напряжения); это особенно на-

глядно видно из уравнения внешней характеристики $I(U)$ при $U_s = \text{const}$ и постоянной скорости вращения, легко получаемой из выражения (32), путем замены g на $\frac{I}{U}$.

Тогда

$$I = \frac{U_s \omega C_m}{\pi} \frac{g}{\sqrt{(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^2}} = \\ = I_0 \frac{\frac{I}{U}}{\sqrt{\left(\frac{I}{U} + g_R\right)^2 + \omega^2 C_R^2}},$$

откуда после сокращения на I получим внешнюю характеристику

$$I = \sqrt{I_0^2 - U^2 \omega^2 C_R^2} - U g_R. \quad (34)$$

второй член под радикалом определяется реакцией якоря.

Итак, недостатками простейшей машины являются: сильное влияние реакции якоря, что приводит к крутопадающей внешней характеристике и необходимости сдвига щеток с нагрузкой, разрыв цепи нагрузки при коммутации, большие пульсации выпрямленного тока (напряжения).

Интересно отметить, что и в индуктивных машинах мы получили бы столь же сильное влияние реакции якоря, если бы выполняли их с одним витком на роторе и коллектором в виде двух полуколец. Однако в реальных машинах, благодаря распределению обмотки по всему ротору и целому ряду дополнительных мер, реакция якоря, отбрасывая ее влияние на насыщение магнитной цепи, существенной роли не играет, а щетки не сдвигаются с изменением нагрузки. Подобно этому и в емкостных машинах возможно создание такой схемы, в которой также не сказывалась бы реакция якоря. Однако здесь следует помнить о существенном различии между электрическим и магнитным полем (введение), не позволяющим полностью использовать приемы, аналогичные применяемым в индуктивных машинах.

§ 7. Многополюсная машина

Одним из путей увеличения мощности емкостной машины является увеличение числа полюсов при сохранении той же скорости вращения.

Для машины с числом полюсов $2p$, схематически изображенной на рис. 6 в цилиндрическом выполнении, у которой все однополярные секторы ротора соединены параллельно, и так же соединены однополярные секторы статора, индуктированный ток увеличивается в p раз. Это видно из формулы (28), в которой емкость C_m , определяемая площадью сектора, пренебрегая щелью, уменьшится в p раз, а частота перезарядки увеличится в p раз; таким образом, ток каждого сектора по-прежнему будет выражаться формулой (28). А так как токи всех однополярных секторов при их параллельном соединении суммируются, то ток генератора

$$I_0 = 2pU_s C_m f \quad (35)$$

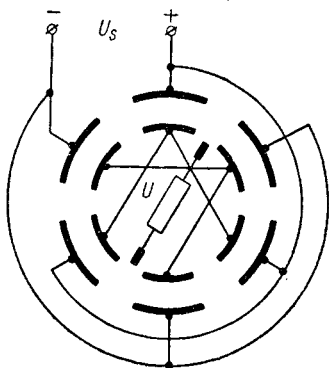


Рис. 6.

увеличится в p раз.

В действительности ток многополюсного генератора будет несколько меньше из-за уменьшения полезной площади диска за счет возросшего числа щелей. При ширине щели a , значительно меньшей диаметра диска ротора D , это уменьшение полезной площади может быть выражено множителем

$$k = 1 - \frac{pa}{\pi D}, \quad (36)$$

в котором отброшены члены с высшими степенями малого отношения $\frac{a}{D}$. Таким образом, индуктированный ток машины с числом полюсов $2p$, рассчитанной на то же рабочее напряжение, что и двухполюсной, т. е. с той же шириной щели, будет

$$I_0 = 2U_s C_m f p \left(1 - \frac{pa}{\pi D}\right). \quad (37)$$

Из этого выражения видно, что увеличение тока машины с числом полюсов происходит лишь до некоторого предела; дальнейшее увеличение числа полюсов влечет за собой уменьшение тока.

Число пар полюсов p' , соответствующее максимуму тока, составляет $p' = \frac{\pi D}{2a}$; максимальный ток машины

$$I_{0 \text{ макс}} = U_S C_m f \frac{\pi D}{2a}. \quad (38)$$

Так, например, при $\frac{a}{D} = 0,1$, число пар полюсов, соответствующее максимальному току, равно ~ 16 , а увеличение тока, по сравнению с двухполюсной машиной, составляет лишь ~ 8 .

Так как соотношение между C_m и C_R в многополюсной машине такое же, как и в двухполюсной, то указанные в § 6 недостатки останутся и в многополюсной машине.

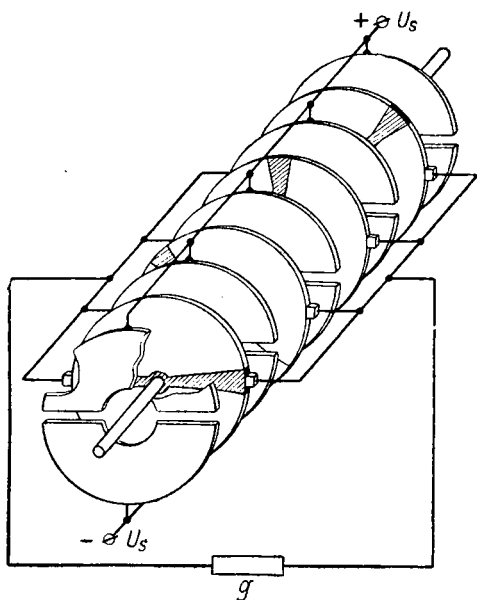


Рис. 7.

§ 8. Многодисковая машина

Увеличения мощности машины можно добиться путем применения ротора, состоящего из нескольких (ω) дисков; соответственно и статор также состоит из нескольких ($\omega + 1$) дисков. Такая многодисковая машина изображена на рис. 7. Так как в такой машине работают обе стороны каждого диска, то индуктированный ток, снимаемый с одного диска, удваивается и

$$I_0 = 4U_S C_m f. \quad (39)$$

В многодисковой машине возможны различные способы расположения полудисков ротора и статора и токосъема с дисков ротора. Рассмотрим основные из этих способов и сравним с однодисковой машиной; при этом будем считать, что и в однодисковом роторе работают обе стороны и его ток определяется формулой (39).

Самый простой способ расположения полудисков статора и ротора — это совершенно одинаковое расположение их во всех секциях. Все однополярные полудиски ротора электрически соединены друг с другом и токосъем осуществляется при любом числе дисков одной парой щеток.

Феличи [Л. 91], предлагая этот способ расположения и соединения полудисков (вернее, секторов, так как машина Феличи была многополюсной), указывает, как на основное его преимущество, наличие одной только пары щеток. Однако при таком способе соединения отдельных элементов C_m и C_R возрастают в одинаковой степени, и машина, принципиально не отличаясь от простейшей, рассмотренной в § 6, обладает теми же основными недостатками.

Оллендорф [Л. 20] рекомендует иной способ, когда при одинаковом расположении полудисков статора, полудиски ротора сдвинуты в соседних дисках на угол $\frac{2\pi}{\omega}$ и токосъем производится с помощью ω пар щеток, соединенных параллельно.

Покажем, что такая машина вообще не будет создавать тока. Действительно, в интервале между двумя коммутациями, т. е. от $\omega t = \frac{\pi}{2}$ до $\omega t = \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{\omega}$, для такой машины остается справедливим уравнение вида (15)

$$C_R \frac{di}{dt} + (g + g_R) i + U_s \frac{dC_{RS}}{dt} = 0, \quad (40)$$

в котором C_R , g_R и C_{RS} относятся ко всей машине. Но взаимоемкость C_{RS} теперь будет

$$C_{RS} = \frac{C_{m1}}{2} \left\{ \sin \omega t + \sin \left[\omega t + \frac{2\pi}{\omega} \right] + \dots + \sin \left[\omega t + (\omega - 1) \frac{2\pi}{\omega} \right] \right\} =$$

$$= \frac{C_{m1}}{2 \sin \frac{\pi}{\omega}} \sin \left(\omega t + \frac{\omega - 1}{2} \frac{2\pi}{\omega} \right) \sin \frac{\omega}{2} \frac{2\pi}{\omega} = 0, \quad (41)$$

где C_{m1} относится к одному диску. При этом условии ток машины, как решение уравнения (40) в установившемся режиме, равен нулю. Ошибку Оллендорфа повторили Каплянский [Л. 77] и Воробьев [Л. 128].

Предложение Оллендорфа, основанное, по-видимому, на аналогии с последовательным соединением отдельных витков в индуктивной машине, может быть исправлено, если полудиски ротора сдвигать не на $\frac{2\pi}{\omega}$, а на $\frac{\pi}{\omega}$.

В этом случае вместо равенства (41) получим

$$\begin{aligned} C_{RS} &= \frac{C_{m1}}{2} \left\{ \sin \omega t + \sin \left[\omega t + \frac{\pi}{\omega} \right] + \right. \\ &+ \dots + \left. \sin \left[\omega t + (\omega - 1) \frac{\pi}{\omega} \right] \right\} = \\ &= \frac{C_{m1}}{2 \sin \frac{\pi}{2\omega}} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2\omega} \right). \end{aligned} \quad (42)$$

Подставляя C_{RS} из равенства (42) в (40), получим для установившегося режима

$$i = \frac{U_S \omega C_{1mg}}{2 \sin \frac{\pi}{2\omega} \sqrt{(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^2}} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2\omega} - \varphi \right), \quad (43)$$

где по-прежнему

$$\varphi = \arctg \frac{\omega C_R}{g + g_R}.$$

Среднее значение тока в интервале между двумя коммутациями, при щетках на геометрической нейтрали

$$\begin{aligned} I &= \frac{\omega}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{\omega}} i d(\omega t) = \frac{\omega}{\pi} \frac{U_S \omega C_{m1} g}{\sqrt{(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^2}} \cos \varphi = \\ &= \frac{U_S \omega C_{mg}}{\pi \sqrt{(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^2}} \cos \varphi. \end{aligned} \quad (44)$$

Из сопоставления равенств (44) и (31) видно, что реакция якоря в машине со сдвинутыми на $\frac{\pi}{\omega}$ полудисками играет такую же роль, что и в простейшей, однодисковой машине. Следовательно, машине со сдвинутыми полудисками свойственны те же недостатки — малое напряжение (меньшее напряжение возбуждения), необходимость сдвига щеток с изменением нагрузки, круто падающая внешняя характеристика. Однако в этой машине нет разрыва цепи нагрузки (в момент коммутации разрывается цепь только одного из дисков), а ее ток имеет незначительные пульсации, уменьшающиеся с ростом числа дисков.

§ 9. Уничтожение влияния реакции якоря

Для уничтожения влияния поля якоря на работу машины необходимо, чтобы поле якоря было перпендикулярно полю возбуждения, как это имеет место в индуктивных машинах постоянного тока.

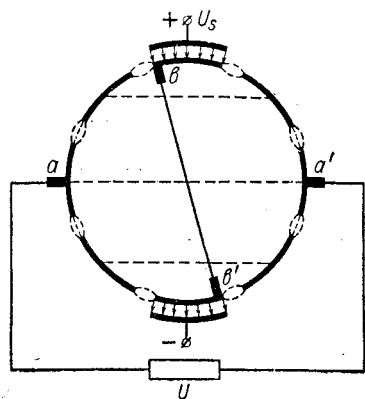


Рис. 8.

Схематически такая машина в цилиндрическом выполнении представлена на рис. 8. В этой машине ротор состоит из многих ($2m$) секторов, соединенных через изолирующие промежутки последовательно. Щетки aa' , к которым подключена нагрузка, по-прежнему находятся на геометрической нейтрали, но введены еще дополнительные накоротко замкнутые щетки bb' , необходимые для зарядки секторов ротора при входе их под полюса возбуждения. Таким образом, зарядка роторных секторов происходит при максимальной емкости их относительно статора, причем поле в рабочем диэлектрике (в зазоре статор — ротор) во время зарядки при любой нагрузке машины определяется только напряжением возбуждения; это поле изображено на рис. 8 сплошными линиями.

При соединении сектора со щетками aa' заряд на нем будет определяться напряжением машины и емкостью рассеяния ротора C_R^S ; поле рассеяния изображено на рис. 8 пунктиром; очевидно, что $C_R^S \ll C_R$.

Уравнение машины отличается от уравнения (40) лишь тем, что вместо C_R стоит C_R^S , а взаимоемкость (пренебрегая шириной изоляции между секторами) теперь будет

$$\begin{aligned} C_{RS} &= \frac{1}{2} \frac{C_m}{2m} \left\{ \sin \omega t + \sin \left[\omega t + \frac{\pi}{m} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \dots + \sin \left[\omega t + (m-1) \frac{\pi}{m} \right] \right\} = \\ &= \frac{C_m}{4m \sin \frac{\pi}{2m}} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2m} \right); \end{aligned} \quad (45)$$

множитель $1/2$ входит потому, что активно работают лишь секторы, находящиеся между накоротко замкнутыми щетками и щетками нагрузки.

Тогда выражение для тока вместо (21)

$$i = \frac{U_S \omega C_m g}{4m \sqrt{(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^{S2}} \sin \frac{\pi}{2m}} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2m} - \varphi^S \right), \quad (46)$$

где угол $\varphi^S = \arctg \frac{\omega C_R^S}{g + g_R}$ очень мал.

Это выражение справедливо лишь в интервале от $\omega t = \frac{\pi}{2}$ до $\omega t = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m}$, а среднее значение, при щетках на геометрической нейтрали, аналогично выражению (44):

$$I = \frac{1}{2\pi} \frac{U_S \omega C_m g}{\sqrt{(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^{S2}}} \cos \varphi^S = I_0 \frac{g}{g + g_R} \cos^2 \varphi^S, \quad (47)$$

где

$$I_0 = \frac{U_S \omega C_m}{2\pi},$$

т. е. индуктированный ток вдвое меньше определяемого равенством (28). Если учесть уменьшение полезной пло-

щади ротора за счет увеличения числа изоляционных промежутков между секторами, то

$$I_0 = U_S C_m f \left(1 - \frac{ma}{\pi D} \right). \quad (48)$$

Напряжение машины

$$U = \frac{U_S \omega C_m g}{2\pi \sqrt{(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^2}} \cos \varphi^S = \frac{I_0}{g + g_R} \cos^2 \varphi^S. \quad (49)$$

Незначительный сдвиг щеток на малый угол φ^S увеличит ток и напряжение до

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{U_S \omega C_m g}{2\pi \sqrt{(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^2}} = I_0 \frac{g}{g + g_R} \cos \varphi^S \\ U &= \frac{U_S \omega C_m}{2\pi \sqrt{(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^2}} = \frac{I_0}{g + g_R} \cos \varphi^S. \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

Напряжение холостого хода

$$U_{xx} = \frac{U_S \omega C_m}{2\pi \sqrt{g_R^2 + \omega^2 C_R^2}}, \quad (51)$$

а для идеальной машины без утечки ($g_R = 0$)

$$U_{xx \text{ ид}} = \frac{U_S C_m}{2\pi C_R^S} \gg U_S, \quad (52)$$

так как $C_R^S \ll C_m$.

Соответственно, внешняя характеристика

$$I = \sqrt{I_0^2 - U^2 \omega^2 C_R^2} - U g_R \quad (53)$$

ввиду малости C_R^S будет значительно более пологой, чем в машине с двумя полудисками (34), а при очень малом рассеянии можно принять

$$I = I_0 - U g_R. \quad (54)$$

Основными преимуществами машины с поперечным полем реакции якоря являются пологая внешняя характеристика, практически отсутствие необходимости сдвига щеток с нагрузкой, возможность получения напряжения, превышающего напряжение возбуждения, а следовательно, возможность самовозбуждения, рациональное

использование рабочего диэлектрика в пространстве статор—ротор, в любом режиме работающего под половиной напряжения возбуждения. Поэтому появление множителя $1/2$ в выражении для тока, по сравнению с машиной с продольным полем реакции якоря тех же размеров, не означает уменьшения тока. При том же допустимом напряжении на промежутке статор—ротор напряжение возбуждения у машины с поперечным полем реакции якоря больше — оно равно сумме напряжения возбуждения и напряжения машины с продольным полем реакции якоря.

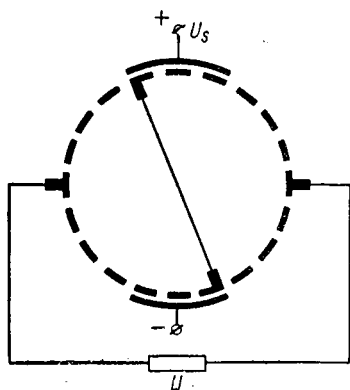


Рис. 9.

Кроме того, в машине с поперечным полем реакции якоря возможно создание более выгодной трапецеидальной формы изменения поля (§ 5) без уменьшения максимальной емкости C_m . Для этого сектор статора должен охватывать несколько секторов ротора, как это показано на рис. 9.

В подобной машине при той же величине индуцированного тока напряжение холостого хода несколько возрастает (§ 5) и внешняя характеристика будет еще более полой, приближаясь к (54).

Недостатком машины с поперечным полем реакции якоря является неполное использование поверхности ротора, что влечет за собой отмеченное выше уменьшение индуцированного тока в два раза (47).

Другим недостатком такой машины является многократный (за один оборот ротора) разрыв цепи нагрузки и, в силу этого, большие пульсации тока (напряжения).

В однодисковой машине с достаточно большим числом секторов разрыв цепи приемника может быть уничтожен, если выполнить щетку шире изоляционного промежутка между соседними секторами.

Разрыв цепи нагрузки может быть также уничтожен, если выполнить машину многодисковой — с числом дисков ротора ω ; каждый диск состоит из $2m$ секторов.

Тогда, сдвигая соседние диски ротора на малый угол $\frac{\pi}{\omega t}$, получим пульсирующий ток (напряжение). Величина пульсации уменьшается с ростом числа дисков ω . При этом все статорные диски и щетки расположены одинаково. Тот же эффект может быть получен при одинаковом расположении дисков ротора, но при сдвиге на такой же угол дисков статора и щеток.

В многодисковой машине напряжение остается таким же, как и при одном диске, а ток увеличивается в ω раз; во столько же раз возрастает и мощность машины.

При большом числе секторов $2m$ и большом числе дисков ω пульсации тока (напряжения) будут настолько малы, что в обычных условиях работы машины ими можно пренебрегать и не принимать никаких мер для их сглаживания (например включение конденсатора).

§ 10. Мощность и к. п. д.

Рассмотрим емкостные машины с точки зрения использования энергии, запасаемой в их электрическом поле и сравним с этой точки зрения машины с продольным и поперечным полем реакции якоря.

Энергия, запасенная в электрическом поле идеальной (без потерь и рассеяния) двухполюсной машины

$$W = \frac{C_S U_S^2}{2} + \frac{C_R u^2}{2} + C_{RS} U_S u.$$

Мгновенная мощность

$$p = \frac{dW}{dt} = C_R u \frac{du}{dt} + U_S \frac{d(C_{RS} u)}{dt},$$

а ее среднее значение на половину оборота

$$P = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} p dt = 2f U_S \int_{-C_{RS \text{ макс}} u_1}^{C_{RS \text{ макс}} u_1} d(C_{RS} u) = 4f C_{RS \text{ макс}} U_S u_1,$$

где u_1 — значение напряжения ротора, соответствующее положению совпадения изоляционных щелей между полудисками статора и ротора.

Из условия, что энергия поля системы возбуждения всегда положительна

$$W_s = \frac{q_s U_s}{2} \geq 0,$$

следует, что заряд этой системы также положителен

$$q_s = C_s U_s + C_{RS} u \geq 0;$$

отсюда определяется значение напряжения $u_{1 \text{ пр}}$ соответствующее режиму предельной мощности:

$$C_{RS} u_{1 \text{ пр}} = C_s U_s.$$

Тогда мощность $P_{\text{ид}}$, соответствующая полному использованию максимальной энергии

$$W_{\text{макс}} = \frac{C_s U_s^2}{2} + \frac{C_R u_{1 \text{ пр}}^2}{2} + C_{RS \text{ макс}} U_s u_{1 \text{ пр}} = 2C_s U_s^2,$$

оказывается равной

$$P_{\text{ид}} = 2f W_{\text{макс}} = \frac{n W_{\text{макс}}}{30}. \quad (55)$$

Эта мощность является предельной. Задача конструирования машины — создание условий для получения мощности, возможно более приближающейся к указанному пределу.

Требование увеличения мощности машины приводит к требованию максимальной энергии ее поля. Очевидно, что в том же объеме энергия будет максимальной при однородном поле, когда напряженность поля в любой точке близка к электрической прочности среды. Другими словами, идеальной машине соответствует кривая распределения поля в виде прямоугольника.

Определим, при каком напряжении такая идеальная машина будет развивать наибольшую мощность. Мощность, развиваемая двухполюсной машиной, равна

$$P_{\text{ид}} = UI_0 = \frac{U_s U \omega C_m}{\pi} = \frac{U_s U C_m n}{30}. \quad (56)$$

Из условия равенства этой мощности ее предельному значению (55) найдем

$$W = U U_s C_m. \quad (57)$$

Так как поле в машине мы приняли однородным ($E = \text{const}$), то при расстоянии между статором и рото-

ром d напряженность поля связана с ее напряжением и напряжением возбуждения соотношением

$$E = \frac{U + U_S}{2d}. \quad (58)$$

С другой стороны, энергия, запасенная в электрическом поле машины,

$$W = C_m \left(\frac{U + U_S}{2} \right)^2. \quad (59)$$

Сопоставляя равенства (57) и (59), найдем

$$UU_S = \left(\frac{U + U_S}{2} \right)^2,$$

откуда напряжение $U_{P_{\text{ид макс}}}$, соответствующее максимуму мощности идеальной машины,

$$U_{P_{\text{ид макс}}} = U_S. \quad (60)$$

Таким образом, идеальная машина развивает наибольшую мощность

$$P_{\text{ид макс}} = \frac{U_S^2 C_m \omega}{\pi} \quad (61)$$

при напряжении, равном напряжению возбуждения.

Определим степень приближения реальной машины с синусоидальным изменением взаимоемкости и продольным полем реакции якоря (§ 6) к идеальной; при этом полагаем, что щетки сдвинуты с геометрической нейтрали в направлении вращения на угол φ .

Энергия, запасенная в поле машины,

$$W = \frac{C_S U_S^2}{2} + \frac{C_R u_R^2}{2} + U_S u_R C_{RS}, \quad (62)$$

а момент вращения

$$m = \left(\frac{\partial W}{\partial \alpha} \right)_{u=\text{const}} = \frac{1}{\omega} U_S u_R \frac{dC_{RS}}{dt}. \quad (63)$$

Мгновенное значение механической мощности p_M согласно равенств (23), (25) и (63):

$$\begin{aligned} p_M &= \omega m = U_S u_R \frac{dC_{RS}}{dt} = \\ &= -\frac{\pi}{8} U_S U \omega C_m \left[\cos \varphi - \sin \left(2\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi \right) \right]; \end{aligned}$$

эта мощность изменяет свой знак в течение периода. Ее среднее значение за время между двумя коммутациями

$$P_M = -\frac{\pi}{8} U U_S \omega C_m \cos \varphi; \quad (64)$$

отрицательный знак указывает на получение этой мощности машиной извне, т. е. от первичного двигателя.

Среднее значение электрической мощности, развиваемой машиной P_Σ , отличается только знаком от P_M , указывающим на преобразование механической энергии в электрическую:

$$P_\Sigma = -P_M = \frac{\pi}{8} U U_S \omega C_m \cos \varphi. \quad (65)$$

Подставляя сюда напряжение машины и угол φ из выражений (26) и (32), получим

$$P_\Sigma = \frac{U_S^2 \omega^2 C_m^2 (g + g_R)}{8 [(g + g_R)^2 + \omega^2 C_R^2]}. \quad (66)$$

Это выражение имеет максимум при $g + g_R = \omega C_R$;

$$P_{\Sigma \text{ макс}} = \frac{U_S^2 \omega C_m^2}{16 C_R}. \quad (67)$$

Пренебрегая потоком рассеяния ротора, т. е. при $C_R = \frac{C_m}{2}$, находим

$$P_{\Sigma \text{ макс}} = \frac{U_S^2 \omega C_m}{8}. \quad (68)$$

Из сопоставления равенств (56) и (68) находим напряжение, соответствующее максимальной мощности

$$U_{P_{\Sigma \text{ макс}}} = \frac{\pi}{8} U_S. \quad (69)$$

Отношение максимальной мощности машины к максимальной мощности идеальной машины того же объема характеризует степень использования объема; назовем это отношение коэффициентом использования k . Для рассмотренного случая двухполюсной машины с синусоидальным характером распределения поля коэффициент использования, как это следует из равенств (61) и (68), составляет всего лишь

$$k_{\sim} = \frac{P_{\Sigma \text{ макс}}}{P_{\text{ид макс}}} = \frac{\pi}{8} = 0,393. \quad (70)$$

Для машины с распределением поля по треугольной форме получим соответственно

$$P_{\Sigma \text{ макс}} = \frac{U_S^2 \omega C_m}{4\pi} \quad \left. \vphantom{P_{\Sigma \text{ макс}}} \right\} \quad (71)$$

и

$$k_{\Delta} = 0,25.$$

В реальных условиях характер распределения поля определяется кривой, занимающей промежуточное положение между треугольником и синусоидой. Таким образом, для реальной двухполюсной машины с продольным полем реакции якоря коэффициент использования объема около $1/3$ ($0,25 < k < 0,393$).

Для машины с поперечным полем реакции якоря соотношение (55) остается без изменения, а (56) и (57) заменяются, соответственно, на

$$P_{\text{ид}} = UI_0 = \frac{U_S U \omega C_m}{2\pi} = \frac{U_S U C_m n}{60} \quad (72)$$

и

$$W = \frac{U_S U C_m}{2}. \quad (73)$$

Напряженность поля в рабочем диэлектрике машины теперь будет

$$E = \frac{U_S}{2d}. \quad (74)$$

Как уже указывалось, при той же величине допустимой напряженности поля, что и в машине с продольным полем реакции якоря, напряжение возбуждения теперь больше.

Энергия, запасенная в электрическом поле машины, вместо выражения (59) определяется равенством

$$W = C_m \left(\frac{U_S}{2} \right)^2 + \frac{C_R^S U^2}{2}. \quad (75)$$

Из сопоставления равенства (73) и (75), при условии $C_m \gg C_R^S$, найдем напряжение, соответствующее максимуму мощности идеальной машины

$$U_{P_{\text{ид макс}}} = \frac{C_m}{C_R^S} U_S. \quad (76)$$

Максимальная мощность вместо равенства (61) определяется выражением

$$P_{\text{ид макс}} = \frac{U_S^2 \omega C_m^2}{2\pi C_R^S}. \quad (77)$$

Расчет для машины с синусоидальным изменением емкости аналогичен расчету для машины с продольным полем реакции якоря, только C_R следует заменить на C_R^S . Тогда максимальная мощность вместо равенства (67) будет

$$P_{\Sigma \text{ макс}} = \frac{U_S^2 \omega C_m^2}{16 C_R^S}. \quad (78)$$

Путем сопоставления выражений (72) и (78) найдем напряжение, соответствующее максимальной мощности:

$$U_{P_{\Sigma \text{ макс}}} = \frac{\pi}{8} \frac{C_m}{C_R^S} U_S. \quad (79)$$

Из выражений (77) и (78) видно, что коэффициент использования при синусоидальном распределении поля по-прежнему определяется формулой (70). Аналогично, для распределения поля по треугольнику — формулой (71).

Если машина с поперечным полем реакции якоря выполнена в соответствии с рис. 9 и имеет трапециевидальное распределение поля, то коэффициент использования может быть несколько увеличен.

Мощность P_{Σ} , развиваемая машиной при напряжении U , состоит из двух слагаемых — полезной мощности $P = UI$ и мощности потерь P_i во внутренней утечке машины

$$P_{\Sigma} = P + P_i = UI_0. \quad (80)$$

Если не учитывать неизбежные механические потери, то механическая мощность, подводимая к машине, равна развиваемой ею мощности P_{Σ} . Для такой идеализиро-

ванной машины с поперечным полем реакции якоря, к. п. д., согласно выражению (50),

$$\eta_1 = \frac{P}{P_{\Sigma}} = \frac{I}{I_0} = \frac{g}{g + g_R} \cos \varphi^s \quad (81)$$

может принимать значения, в зависимости от соотношения между проводимостями нагрузки и утечки в машине и емкостью рассеяния, сколь угодно близкие к 100%. Это подтверждается опытом: так Трамп [Л. 92] в машине, работавшей в вакууме, получил к. п. д. больше 99%; машины Феличи [Л. 118, 120, 121, 133], работавшие в сжатом водороде, имели к. п. д. от 80 до 90%; к. п. д. машин Левина [Л. 105] превышал 90%.

Интересно отметить, что неправильный подход к рассмотрению работы емкостных машин часто служит основанием распространенному мнению о принципиальной невозможности создания емкостной машины с высоким к. п. д. Так, Штраух [Л. 36] доказывает, что идеальная (без потерь) емкостная машина всегда обладает низким к. п. д., не превышающим 50%. Кроме того, Штраух утверждает, что включение конденсатора параллельно машине, как это обычно делается в машинах Уимшерста с целью уменьшения пульсации напряжения, еще больше снижает к. п. д. (до 25%) и что это действие конденсатора в более ранних работах не учитывалось.

Утверждение Штрауха о необходимости включения конденсатора для уменьшения пульсации справедливо лишь для машин с проводящим ротором, в которых не приняты указанные выше (§ 8) меры для сглаживания пульсаций; при принятии этих мер, а также при диэлектрическом роторе, пульсации практически отсутствуют и надобность в конденсаторе отпадает.

Правильно рассматривая работу машины с ротором в виде отдельных металлических пластинок на диэлектрическом диске, как зарядку и разрядку емкости роторной пластинки по отношению к статору, Штраух верно определил ток короткого замыкания и напряжение холостого хода, но затем он допустил ряд ошибок. Так, он учитывает разряд конденсатора, подключенного к машине, на нагрузку лишь за время его соединения с пластиной ротора, тогда как в действительности конденсатор разряжается все время, но только разряд происходит

с разными постоянными времени. Это приводит его к неправильному выражению для напряжения короткого замыкания; у Штрауха это напряжение не равно нулю, и в его выражение входит емкость подключенного к машине конденсатора, что противоречит физическому смыслу явления, так как этот конденсатор замкнут накоротко.

При вычислении к. п. д. Штраух неправильно определяет мощность, подводимую к машине, как произведение тока короткого замыкания на напряжение холостого хода.

Эти ошибки привели Штрауха к переоценке роли конденсатора, подключенного к машине, и к утверждению малой эффективности емкостных машин. Тем не менее эти ошибки повторены, в частности, Нейбертом [Л. 80].

§ 11. Коммутация

Коммутация тока в емкостных машинах высокого напряжения представляет собой весьма сложный процесс, в первую очередь потому, что включение и разрыв цепи неизбежно происходят через искровой промежуток, а не через механический контакт щетки с ротором. Это объясняется тем, что в момент схода щетки с ротора между ними возникает напряжение, перекрывающее зазор между щеткой и сектором ротора; поэтому в емкостных машинах важно определить напряжения, возникающие в момент коммутации.

Даже в индуктивных машинах постоянного тока — машинах низкого напряжения, где процесс коммутации значительно проще, чем в емкостных машинах высокого напряжения, до сих пор, несмотря на огромное число работ, нет вполне точной теории коммутации. Правда, колоссальный опыт электромашиностроения и многочисленные экспериментальные исследования привели к тому, что несмотря на отсутствие точной теории коммутации, машины постоянного тока выполняются в отношении коммутации вполне удовлетворительно.

Для емкостных машин не только нет каких-либо работ по коммутации, но и полностью отсутствует опытный материал. Поэтому наша попытка разобраться в этом вопросе является лишь первым шагом в деле создания в дальнейшем полной теории коммутации емкостных машин постоянного тока.

В индуктивных машинах для полного использования энергии магнитного поля коммутация производится с замыканием секций накоротко. В отличие от них, коммутация в емкостных машинах должна происходить с разрывом цепи ротора (§ 6).

Однако в машине с поперечным полем реакции якоря (§ 9) можно допустить перекрытие щетки изоляции между двумя соседними секторами.

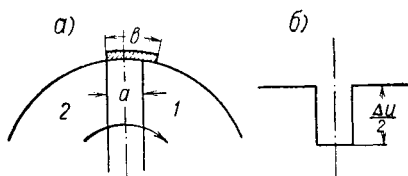


Рис. 10.

Рассмотрим однодисковую машину со щетками, расположенными на геометрической нейтрали, диаметром ротора D , шириной изоляции a , шириной щетки $b > a$, шириной сектора c (рис. 10, а), при отсутствии разряда между щеткой и сектором ротора, что соответствует весьма большой электрической прочности среды. В момент входа второго сектора под щетку напряжения на секторах

$$u_1 = U_m \sin \left(\frac{2a - b + c}{D} - \frac{\pi}{2} - \varphi^s \right),$$

$$u_2 = U_m \sin \left(-\frac{b + c}{D} - \frac{\pi}{2} - \varphi^s \right), \quad (82)$$

а их разность

$$\Delta u = 2U_m \sin \frac{a + c}{D} \sin \left(\varphi^s + \frac{b - a}{2D} \right) =$$

$$= 2U_m \sin \frac{\pi}{2m} \sin \left(\varphi^s + \frac{b - a}{2D} \right) \quad (83)$$

представляет собой напряжение между щеткой и сектором 2. Для большого числа секторов это выражение обращается в

$$\Delta u = \pi \frac{U_m}{m} \sin \left(\varphi^s + \frac{b - a}{2D} \right). \quad (84)$$

При малой емкости рассеяния напряжение Δu составляет незначительную долю от амплитуды напряжения машины.

Во время пребывания щетки на обоих секторах напряжение на них уменьшится на $\frac{\Delta u}{2}$; в момент схода щетки с первого сектора напряжение вновь возрастает на ту же величину. Это изменение напряжения изображено на рис. 10, б.

При сдвиге щеток на угол φ^S в сторону вращения величина Δu еще уменьшается, так как вместо формулы (84) будет определяться выражением

$$\Delta u = \frac{\pi}{4} U_m \sin \frac{b-a}{2D}. \quad (85)$$

Таким образом, в однодисковой машине со щеткой, перекрывающей изоляцию между двумя секторами, коммутация происходит без появления значительных напряжений (между щеткой и ротором), даже при щетках на геометрической нейтрали. Поэтому сдвиг щеток, с точки зрения коммутации, существенного значения не имеет.

В многодисковой машине, в которой соседние диски, состоящие из $2m$ секторов, сдвинуты на угол $\frac{\pi}{\omega m}$ (§ 9), условия коммутации еще более благоприятны, даже при ширине щетки очень малой по сравнению с шириной изоляции между секторами ($b \ll a$). Пренебрегая шириной щетки по сравнению с шириной изоляции, для щеток на геометрической нейтрали получим, что в момент входа щетки на ω -ый диск напряжение на всех остальных $\omega - 1$ дисках будет

$$\begin{aligned} u &= \frac{U_m}{\omega - 1} \sum_{k=0}^{\omega-2} \sin \left(-\frac{\pi}{2} - \varphi^S - \frac{c}{D} + k \frac{\pi}{\omega m} \right) = \\ &= \frac{U_m}{\omega - 1} \sin \left(-\frac{\pi}{2} - \varphi^S - \frac{c}{D} + \frac{\omega-2}{2} \frac{\pi}{\omega m} \right) \frac{\sin(\omega-1) \frac{\pi}{2\omega m}}{\sin \frac{\pi}{2\omega m}}, \quad (86) \end{aligned}$$

что при $m \gg 1$ дает

$$u = U_m \sin \left(-\frac{\pi}{2} - \varphi^S - \frac{c}{D} + \frac{\omega-2}{D} \frac{\pi}{\omega m} \right). \quad (87)$$

Напряжение на ω -ом диске

$$u_{\omega} = U_m \sin \left[-\frac{\pi}{2} - \varphi^S - \frac{c}{D} + (\omega - 1) \frac{\pi}{\omega m} \right], \quad (88)$$

а разность Δu после преобразований

$$\begin{aligned} \Delta u &= \frac{\pi}{2m} U_m \sin \left(\varphi^S + \frac{c}{D} - \frac{3\omega - 4}{2} \frac{\pi}{2\omega m} \right) \approx \\ &\approx \frac{\pi}{2m} U_m \sin \left(\varphi^S + \frac{c}{D} \right). \end{aligned} \quad (89)$$

Из сравнения выражений (85) и (89) видно, что в многодисковой машине напряжение, возникающее в момент коммутации между щеткой и сектором ротора, меньше, чем в однодисковой.

§ 12. Машина с диэлектрическим ротором

Емкостная машина может быть выполнена и с диэлектрическим ротором. Большинство авторов рассматривает машины с диэлектрическим ротором, как совершенно особый класс машин со своей специфической теорией. Благодаря развитию ленточных генераторов на машины с диэлектрическим ротором стали смотреть, как на основной вид емкостных машин.

Больше того, выделяют еще группу машин смешанного типа [Л. 80, 128], ротор которых выполнен из проводника и диэлектрика (например, машина Уимшерста с полосками фольги на диэлектрическом диске).

Такой подход к машинам с диэлектрическим ротором ничем не оправдан. Несмотря на некоторые специфические особенности, машины с диэлектрическим ротором вполне могут быть рассмотрены в рамках развитой выше теории для машин с проводящим ротором.

Рассмотрим роторный диск с наклеенными на него полосками фольги. Такой диск представляет собой многосекторный ротор с последовательным соединением отдельных секторов (§ 9). То обстоятельство, что отдельные полоски фольги, соответствующие секторам проводящего ротора, наклеены на сплошной диэлектрический диск, не имеет никакого принципиального значения, поскольку здесь диск, по сути дела, является конструктивным элементом. Действительно, емкость между сектором ротора R и статором S (рис. 11, a) определяется величиной воздушного промежутка между диском и статором и практически не зависит от материала роторного диска.

Правильность утверждения о конструктивной роли диска подтверждается также и тем, что замена в машине одного диска другим из материала с другой диэлектрической проницаемостью, по данным различных авторов [Л. 83, 105], не сказывается на работе машины, если только оба материала обладают достаточно большим удельным сопротивлением (объемным и поверхностным). Это требование объясняется тем, что соседние секторы (полоски фольги) электрически соединены через утечки по поверхности и через толщу диска.

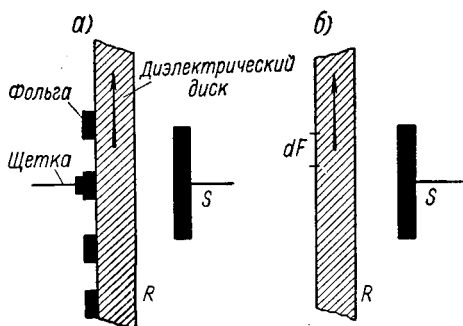


Рис. 11.

Переход от такого диска с полосками фольги к чисто диэлектрическому диску может быть совершен путем перехода к пределу при бесконечном увеличении числа секторов (полосок фольги) и бесконечном уменьшении ширины полосок и расстояния между ними.

Переменной емкостью, необходимой для работы машины, здесь является емкость между статором и элементом поверхности ротора dF (рис. 11, б), уменьшающаяся по мере удаления данного элемента поверхности от статора.

Величина индуктированного тока машины по-прежнему будет определяться формулой (47).

Единственное изменение, которое потребуется при переходе от многосекторного проводящего ротора к чисто диэлектрическому, это изменение способа токосъема. Если при проводящем роторе достаточно небольшой щетки, имеющей малую поверхность соприкосновения с ротором, то при диэлектрическом роторе токосъем

должен производиться с помощью гребенки, «прочесывающей» всю рабочую часть поверхности ротора.

Помимо утверждения о различии теории для машин с проводящим и диэлектрическим ротором, несостоятельность которого показана выше, в литературе укоренилось мнение о существовании определенного предела для величины тока, генерируемого машиной с диэлектрическим ротором. Считается, что этот предел, при заданных размерах и скорости вращения, не зависит от материала диэлектрического ротора, определяясь только электрической прочностью воздуха. В терминах теории, обычно применяемой к машинам с диэлектрическим ротором, это означает, что поверхностная плотность заряда на роторе не может превосходить (считая, что поле создается по обе стороны заряженной поверхности)

$$\sigma_{\text{макс}} = 2\varepsilon_0 E_{0 \text{ пр}} = 53,2 \text{ мкк/м}^2, \quad (90)$$

где индекс 0 относится к воздуху.

Если заряд создает поле только с одной стороны от заряженной поверхности, то та же напряженность поля $E_{0 \text{ пр}}$ соответствует вдвое меньшей поверхностной плотности заряда

$$\sigma_{\text{макс}} = 26,6 \text{ мкк/м}^2. \quad (91)$$

Глубоко ошибочное мнение о предельной плотности заряда на поверхности диэлектрического ротора основано на неправильном представлении о работе емкостной машины и, в силу этого, нерациональном выполнении этих машин.

Это представление обычно подтверждается тем, что для большинства машин ленточного типа достигнутая плотность заряда составляет 16—17 мкк/м². Только в некоторых работах указывается на возможность превышения указанного предела и приводятся данные опытов, причем наибольшая достигнутая поверхностная плотность превышает этот предел лишь в 2,5 раза.

В этих работах [Л. 55, 56, 66, 93, 112] указывается путь увеличения поверхностной плотности заряда до 67 мкк/м² в ленточных машинах за счет сближения поднимающейся и опускающейся части ленты, однако без четкого теоретического объяснения возможности превышения указанного выше предела.

Такое положение с поверхностной плотностью заряда объясняется тем, что во всех существующих машинах

с диэлектрическим ротором плохо используется бóльшая, чем у воздуха, диэлектрическая проницаемость материала ротора, позволяющая получать бóльшую поверхностную плотность заряда. Обычно в этих машинах основным требованием к материалу ротора, помимо определенных физико-механических свойств, является большое удельное сопротивление; к диэлектрической проницаемости не предъявляется никаких требований.

Очевидно, что указанный выше предел может быть значительно превзойден, если в машине создать такие условия, чтобы заряд, находящийся на поверхности диэлектрического ротора, создавал поле только в диэлектрике. Тогда предельная плотность будет определяться диэлектрической проницаемостью ϵ и электрической прочностью $E_{\text{пр}}$ материала ротора по формуле

$$\sigma_{\epsilon_{\text{макс}}} = \epsilon E_{\text{пр}}. \quad (92)$$

Так как всегда $\epsilon > \epsilon_0$ и для большинства диэлектриков $E_{\text{пр}} > E_{0 \text{ пр}}$, то $\sigma_{\epsilon_{\text{макс}}} \gg \sigma_{\text{макс}}$.

Поясним это положение, исходя из представлений, лежащих в основе изложенной нами теории, т. е. с точки зрения емкости между статором и ротором. В существующих машинах емкость элемента поверхности ротора dF (рис. 11, б) относительно статора, определяющая рабочий поток смещения, почти такая же, как и емкость этого элемента относительно других частей машины, лежащих слева от него (на рис. 11, б не показанных); эта емкость определяет поток рассеяния. Приняв указанные емкости равными, мы получим, что максимальное поле в воздухе, слева от элемента dF , как раз удовлетворяет равенству (90).

В тех машинах, где удавалось несколько превзойти «предельную» плотность заряда, рабочий поток, очевидно, превышал поток рассеяния.

Естественным способом увеличения тока машины, а следовательно, и плотности заряда на роторе, наряду с уменьшением емкости рассеяния за счет конструктивных усовершенствований, является увеличение рабочей емкости путем уничтожения воздушного промежутка между ротором и статором. В этом случае полезная емкость будет определяться, помимо геометрических факторов, также и диэлектрической проницаемостью материала ротора, и, следовательно, будет значительно

превышать емкость рассеяния. Отсюда само собой вытекает требование к высокой диэлектрической проницаемости материала ротора.

Вопросы конструктивных возможностей реального осуществления указанного пути увеличения тока машины, а также результаты наших опытов, подтверждающих эту точку зрения, изложены ниже (гл. VI).

§ 13. Самовозбуждение

Как известно, самовозбуждение индуктивных машин обусловлено неустойчивостью в цепи возбуждения, состоящей из сопротивления и индуктивности, когда при определенных условиях ток возбуждения начинает возрастать. Из-за нелинейности индуктивности (нелинейности кривой намагничения), ток возбуждения не растет беспредельно, а достигает лишь вполне определенной величины, соответствующей устойчивому режиму.

Аналогично, самовозбуждение емкостных машин определяется неустойчивостью в цепи возбуждения, состоящей из проводимости и емкости, что влечет за собой рост напряжения возбуждения. Однако в емкостных машинах высокого напряжения, не содержащих нелинейного диэлектрика, емкость не зависит от напряжения, а переход к устойчивому режиму обусловлен нелинейностью проводимости утечки (§ 17).

В гл. I были приведены принципиальные схемы машин с самовозбуждением — параллельным (рис. 2, ж), последовательным (рис. 2, з) и смешанным (рис. 2, м). В главе IV будут рассмотрены характеристики машин при различных схемах возбуждения.

В этом параграфе рассмотрены общие условия самовозбуждения емкостной машины на примере машины с параллельным возбуждением и поперечным полем реакции якоря (рис. 12).

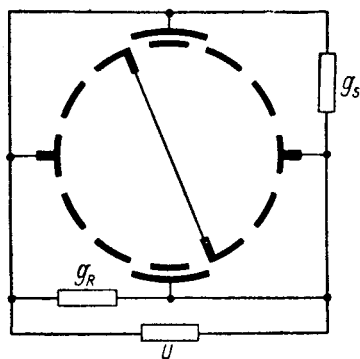


Рис. 12

В соответствии с изложенным в § 9 и при равенстве $u_s = u$ уравнение такой самовозбуждающейся машины, работающей на приемник проводимостью g , примет вид

$$(C_R^S + C_S) \frac{du}{dt} + (g_R + g_S + g) u = I_0. \quad (93)$$

Индуктированный ток, согласно формулам (28), (37), (47), при замене U_S на u и I_0 на i_0 равен

$$i_0 = \frac{pu\omega C_m}{2\pi} \left(1 - \frac{pa}{\pi D}\right) = Anu, \quad (94)$$

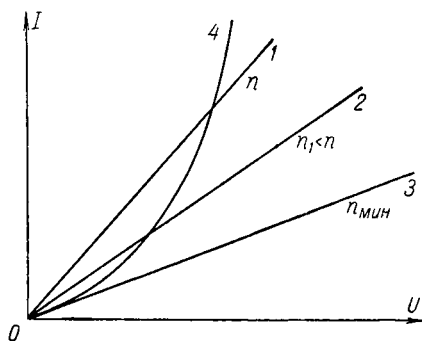


Рис. 13.

где n — скорость вращения машины, а A — величина, определяемая ее геометрией и диэлектрической проницаемостью рабочего диэлектрика.

Из равенств (93) и (94) следует, что

$$(C_R^S + C_S) \frac{du}{dt} - (An - g_R - g_S - g) u = 0. \quad (95)$$

Решение этого уравнения при постоянных

коэффициентах имеет вид

$$u = Be^{\delta t}, \quad \text{где } \delta = \frac{An - g_R - g_S - g}{C_R^S + C_S};$$

система будет неустойчива, если $\delta > 0$.

Согласно теореме Ляпунова, это же условие неустойчивости сохраняется и для нелинейной системы, когда $g_R + g_S = g_i = J(u)$. Таким образом, условием, необходимым для самовозбуждения, будет

$$An > g + g_i. \quad (96)$$

С возрастанием напряжения растет проводимость утечки g_i в газовой среде; поэтому напряжение будет расти не беспредельно, а лишь до тех пор, пока неравенство (96) не обратится в равенство

$$An = g + g_i, \quad (97)$$

что соответствует устойчивому режиму.

Отсюда следует, что для заданной скорости вращения проводимость приемника, при которой еще воз-

можно самовозбуждение машины, должно быть меньше критической величины

$$g_{кр} = An - g_i. \quad (98)$$

Графическое построение приведено на рис. 13. Характеристика короткого замыкания $I_0 = AnU$ представляет собой прямую линию (1, 2, 3); линия утечки 4 — кривую. Точка пересечения обеих характеристик определяет устойчивый режим, т. е. то напряжение, до которого возбудится машина.

С уменьшением скорости вращения характеристика короткого замыкания идет более полого, как это показано на рис. 13.

Очевидно, что тангенс угла наклона характеристики короткого замыкания должен быть больше тангенса угла наклона касательной к линии утечки в начале координат, так как, в противном случае, линия утечки не будет пересекать характеристику короткого замыкания. Это означает, что при скорости вращения меньшей $n_{мин}$ самовозбуждение машины невозможно. При возбуждении машины, замкнутой на нагрузку, минимальная скорость вращения, необходимая для самовозбуждения, растет с величиной нагрузки.

Из уравнения (95) вытекает, что для возникновения процесса самовозбуждения, помимо условия (96), необходимо, чтобы в начальный момент $u_{t=0} > 0$, так как только в этом случае $\frac{du}{dt} > 0$. Следовательно, самовозбуждение возможно за счет остаточного заряда или за счет различных флюктуаций, создающих начальное напряжение $u_{t=0} = U_0$.

Теоретически время, за которое машина самовозбудится до установившегося значения напряжения U_1 , определяемое из уравнения (95),

$$t = (C_R^S + C_S) \int_{U_0}^{U_1} \frac{du}{(An - g - g_i u)} \quad (99)$$

обращается в бесконечность, так как при установившемся значении напряжения $An = g + g_i$. Поэтому можно говорить лишь о практическом времени t_k самовозбуждения до напряжения κU_1 ($\kappa < 1$), при котором процесс возбуждения может практически считаться за-

конченным. Это время легко вычислить, если известна зависимость $g_i(u)$.

В § 17 показано, что эта зависимость аппроксимируется выражением $g = a + bu^m$. В этом случае

$$t_k = (C_R^S + C_S) \int_{U_0}^{kU_1} \frac{du}{(An - g - a - bu^m)u} =$$

$$= \frac{C_R^S + C_S}{An - g - a} \ln \frac{kU_1}{U_0} \sqrt[m]{\frac{An - g - a - bU_0^m}{An - g - a - bk^m U_1^m}}. \quad (100)$$

Так как $An - g - a - bU_1^m = 0$ и $U_0 \ll U_1$, то приближенно

$$t_k = \frac{C_R^S + C_S}{An - g - a} \ln \frac{kU_1}{U_0 \sqrt[m]{1 - k^m}}. \quad (101)$$

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ТЕОРИЯ УНИПОЛЯРНЫХ МАШИН

§ 14. Дифференциальные уравнения машины

Как уже указывалось в гл. 1, униполярная машина, являясь как бы половиной биполярной, уступает последней при тех же габаритах в развиваемой мощности. Все же рассмотрение этого типа машин представляет интерес, тем более, что большинство осуществленных емкостных машин являются униполярными. Так как многое в теории этих машин совпадает с изложенным выше для биполярных, то мы остановимся лишь на тех особенностях, которые отличают униполярные машины от биполярных.

Простейшая двухполюсная униполярная машина схематически представлена на рис. 2, л. Ротор ее, как и у биполярной машины, состоит из двух полудисков R и R' , статором служит один полудиск S . Напряжение возбуждения U_S подается на полудиск статора и один полудиск ротора; щетки расположены так же как у биполярной машины.

Принцип действия такой машины аналогичен разобранным выше принципу действия биполярной машины.

Основное различие заключается лишь в том, что в биполярной машине емкость статор—ротор изменялась от C_{\max} до $-C_{\max}$, а здесь только от C_{\max} до C_{\min} ; кроме того, в униполярной машине переменной является также и емкость ротора.

Подобно тому, как это было сделано для биполярной машины, найдем заряд роторного и статорного полудисков по тем же уравнениям (11)

$$\left. \begin{aligned} g_R &= u_R C_R + U_S C_{RS} \\ g_S &= u_R C_{RS} + U_S C_S \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

По-прежнему, пренебрегая влиянием щели между полудисками ротора, примем, что при вращении ротора емкость C_S остается постоянной и изменяются только C_{RS} и C_R . Тогда уравнения машины будут

$$\left. \begin{aligned} (i + u_R g_R) &= u_R \frac{dC_R}{dt} + C_R \frac{du_R}{dt} + U_S \frac{dC_{RS}}{dt} \\ - (i_S - U_S g_S) &= u_R \frac{dC_{RS}}{dt} + C_{RS} \frac{du_R}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (102)$$

§ 15. Форма кривых тока и напряжения

Оставляя в стороне вопросы коммутации, рассмотрим униполярную машину как машину переменного тока.

При вращении машины емкости C_R и C_{RS} как было указано, изменяются от максимального значения C_{\max} до минимального C_{\min} . В первом приближении примем, что это изменение происходит по синусоидальному закону; тогда

$$\left. \begin{aligned} C_{RS} &= \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} - \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2} \sin \omega t = \alpha - \beta \sin \omega t, \\ C_R &= \alpha + \beta \sin \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (103)$$

Подставляя равенство (103) в уравнения (102), получим

$$\left. \begin{aligned} -i &= u_R g_R + (\alpha + \beta \sin \omega t) \frac{du_R}{dt} + (u_R - U_S) \beta \omega \cos \omega t \\ i_S &= U_S g_S + u_R \beta \omega \cos \omega t - (\alpha - \beta \sin \omega t) \frac{du_R}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (104)$$

откуда заменой i через u_{Rg} найдем уравнение для определения напряжения машины

$$(\alpha + \beta \sin \omega t) \frac{du_R}{dt} + (g + g_R - \beta \omega \cos \omega t) u_R = U_S \beta \omega \cos \omega t. \quad (105)$$

Из этого уравнения видно, что напряжение (ток) униполярной машины даже при синусоидальном изменении емкости, содержит высшие гармоники; это же относится и к току статора, как это следует из второго уравнения (104).

Ток короткого замыкания согласно (105) равен

$$i_{кз} = U_S \beta \omega \cos \omega t, \quad (106)$$

а ток статора при этом не содержит переменной составляющей ($i_{S\ кз} = U_S g_S$).

§ 16. Индуктированный ток и напряжение холостого хода

Индуктированный ток униполярной машины постоянного тока, как среднее значение тока короткого замыкания (106), при щетках на геометрической нейтрали,

$$I_0 = \frac{2}{\pi} U_S \omega \beta = \frac{U_S \omega (C_{\max} - C_{\min})}{\pi}. \quad (107)$$

Сравнивая индуктированный ток $I_{0у}$ униполярной машины (107) с током $I_{0б}$ биполярной (28) тех же размеров (т. е. с тем же значением C_{\max}), и учитывая, что при той же величине допустимой напряженности поля напряжение возбуждения униполярной машины вдвое меньше, чем у биполярной, найдем, что

$$\frac{I_{0б}}{I_{0у}} = 2 \frac{C_{\max}}{C_{\max} - C_{\min}} > 2, \quad (108)$$

т. е. биполярная машина генерирует ток, по крайней мере, в два раза превышающий ток униполярной машины.

Для оценки униполярной машины по напряжению холостого хода определим наибольшее значение этого напряжения, соответствующее идеальной машине без потерь ($g_R = 0$). Из первого уравнения (104) при

$g + g_R = 0$ после интегрирования найдем

$$u_{\text{хх ид}} = \frac{A - U_S (\alpha - \beta \sin \omega t)}{\alpha + \beta \sin \omega t};$$

постоянная интегрирования определяется из условия: $u_{\text{хх ид}} = 0$ при $\omega t = 0$, откуда $A = \alpha U_S$ и

$$u_{\text{хх ид}} = U_S \frac{\beta \sin \omega t}{\alpha + \beta \sin \omega t}. \quad (109)$$

Среднее значение напряжения холостого хода идеальной машины:

$$U_{\text{хх ид}} = U_S \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\beta \sin x}{\alpha + \beta \sin x} dx =$$

$$= U_S \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \left(\sqrt{\frac{C_{\text{макс}}}{C_{\text{мин}}}} + \sqrt{\frac{C_{\text{мин}}}{C_{\text{макс}}}} \right) \arctg \sqrt{\frac{C_{\text{мин}}}{C_{\text{макс}}}} \right\}; \quad (110)$$

при условии $C_{\text{макс}} \gg C_{\text{мин}}$ это выражение обращается в

$$U_{\text{хх ид}} = \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) U_S = 0,363 U_S. \quad (111)$$

В реальном генераторе напряжение холостого хода еще меньше.

Сравнивая выражение (111) с напряжением холостого хода идеальной биполярной машины (33) и учитывая соотношение между напряжениями возбуждения, найдем

$$\frac{(U_{\text{хх ид}})_6}{(U_{\text{хх ид}})_y} = 2 \frac{\frac{2}{\pi}}{1 - \frac{2}{\pi}} = 3,5. \quad (112)$$

Таким образом, по величине напряжения холостого хода униполярная машина также уступает биполярной.

В остальном (увеличение числа полюсов, различные способы соединения секторов, уничтожение влияния реакции якоря, увеличение числа роторных дисков и т. д.)

для униполярной машины справедливо все то, что было выведено выше для биполярной.

Таким образом, униполярная машина, занимая тот же объем, что и биполярная, при той же скорости вращения обладает в несколько раз меньшей мощностью, чем биполярная. Практически униполярная машина имеет еще более низкие показатели, так как в ней сильнее сказывается вредное влияние паразитных емкостей, чем в биполярной.

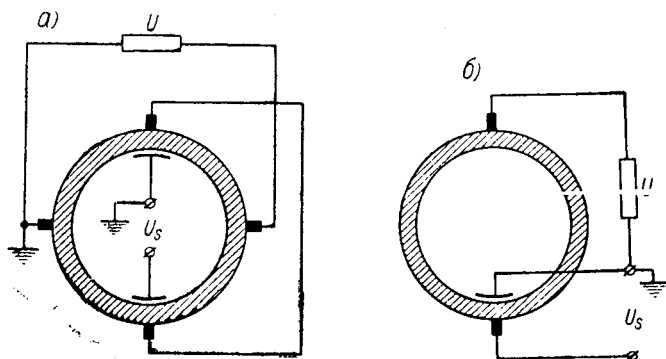


Рис. 14.

Как уже указывалось в гл. 1, униполярные машины не могут быть самовозбуждающимися. Это положение не распространяется на трибоэлектрические машины, в которых заряд возникает за счет трения.

К недостаткам униполярной машины следует отнести также необходимость кондуктивной связи источников независимого напряжения возбуждения с цепью нагрузки.

Единственным преимуществом униполярной машины перед биполярной (для машин с поперечным полем реакции якоря) является облегчение в изоляции по поверхности ротора. Это наглядно видно при заземлении одного из полюсов (рис. 14); в биполярной машине (рис. 14, а) расстояние между щетками высокого напряжения и напряжения возбуждения определяется четвертью длины окружности ротора, в униполярной (рис. 14, б) — половиной.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕМКОСТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

§ 17. Независимое возбуждение

При рассмотрении характеристик емкостных машин будем считать, что машина обладает поперечным полем реакции якоря (§ 9) и что полем рассеяния можно пренебречь ($C_R^S = 0$).

Из изложенного в предыдущей главе — выражения (28), (47), (107) — следует, что для любой емкостной машины индуктированный ток определяется формулой

$$I_0 = AnU_s, \quad (113)$$

где A — постоянная, определяемая конструкцией машины и диэлектрической средой.

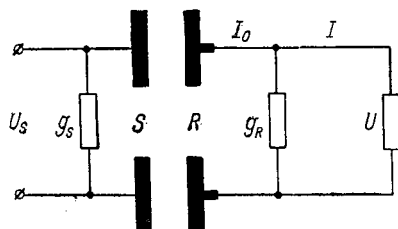


Рис. 15.

Рассмотрим работу емкостного генератора с независимым возбуждением (рис. 15) на нагрузку в двух случаях: а) проводимости утечек генератора постоянны, б) проводимости утечек генератора зависят от напряжения.

Проводимости утечек генератора, работающего в газовой среде, всегда зависят от напряженности поля, а следовательно, от напряжения. Однако первый случай практически имеет место при работе с малыми напряженностями поля; кроме того, он соответствует генератору с вакуумной изоляцией.

а) Постоянные проводимости утечек

Хотя индуктированный ток генератора I_0 при неизменных напряжении возбуждения и скорости вращения остается неизменным, ток, протекающий через приемник,

$$I = I_0 - Ug_R \quad (114)$$

меняется в пределах от нуля при холостом ходе ($I_{xx} = 0$) до I_0 при коротком замыкании ($I_{кз} = I_0$).

Напряжение генератора

$$U = \frac{I_0}{g + g_R} \quad (115)$$

достигает наибольшего значения при холостом ходе:

$$U_{xx} = \frac{I_0}{g_R}. \quad (116)$$

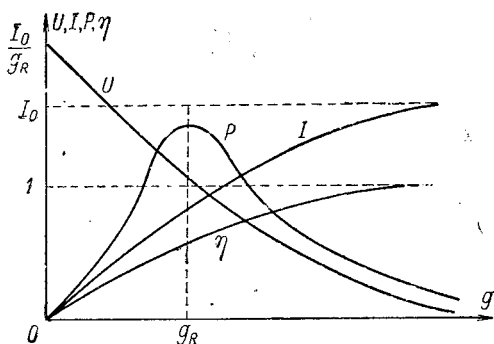


Рис. 16.

Полезная мощность

$$P = U^2 g = I_0^2 \frac{g}{(g + g_R)^2} \quad (117)$$

имеет максимум при $g = g_R$.

Максимальная мощность

$$P_{\text{макс}} = \frac{I_0^2}{4g_R} = \frac{1}{4} U_{xx} I_0; \quad (118)$$

при этом ток и напряжение соответственно равны:

$$I_{P_{\text{макс}}} = \frac{I_0}{2}, \quad U_{P_{\text{макс}}} = \frac{U_{xx}}{2}. \quad (119)$$

К. п. д. генератора, учитывая потери в цепи возбуждения

$$\eta = \frac{U^2 g}{U^2 (g + g_R) + U_S^2 g_S}. \quad (120)$$

На рис. 16 приведены графики тока, напряжения, мощности и к. п. д. в функции проводимости нагрузки.

Подставляя равенство (116) в (114), получим уравнение, определяющее внешнюю характеристику генератора

$$I = I_0 \left(1 - \frac{U}{U_{xx}} \right). \quad (121)$$

Чтобы не быть связанным с определенным генератором, удобно рассматривать все характеристики в относительных координатах:

$$I' = \frac{I}{I_0} \text{ и } U' = \frac{U}{U_{xx}}.$$

Тогда получим

$$\left. \begin{aligned} I' &= 1 - U', \\ P' &= \frac{P}{U_{xx} I_0} = U' (1 - U'). \end{aligned} \right\} \quad (122)$$

Кривые в относительных координатах представлены на рис. 17.

Максимум полезной мощности

$$P'_{\text{макс}} = 0,25;$$

при этом

$$I'_{P_{\text{макс}}} = 0,5, \quad U'_{P_{\text{макс}}} = 0,5, \quad \eta_{P_{\text{макс}}} < 0,5.$$

Из графиков на рис. 16 и 17 видно, что область наиболее выгодного режима работы емкостного генератора с независимым возбуждением лежит вблизи короткого замыкания, при больших токах и малых (по сравнению с U_{xx}) напряжениях.

Режимы, близкие к режиму холостого хода, могут представлять опасность для генератора, так как напряжение при этом может оказаться настолько большим, что вызовет пробой изоляции.

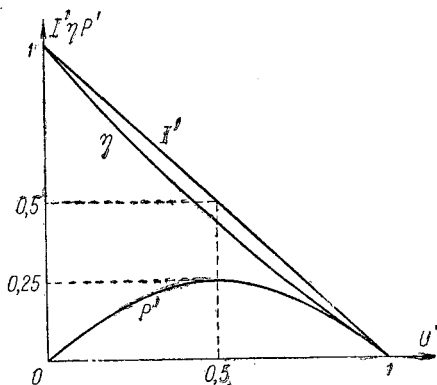


Рис. 17.

Из выражений (113) и (116) следует, что зависимость тока короткого замыкания и напряжения холостого хода от напряжения возбуждения и от скорости вращения генератора линейна. Мощность генератора при постоянной проводимости нагрузки растет с увеличением скорости вращения или напряжения возбуждения по квадратичному закону (рис. 18).

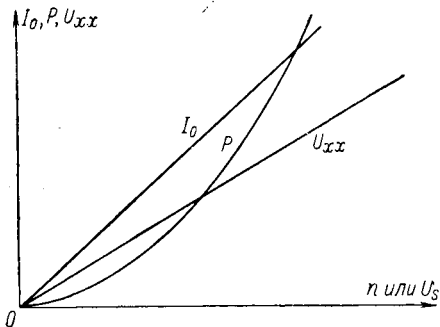


Рис. 18.

Из сопоставления соотношений (114) — (116), с аналогичными соотношениями индуктивного генератора с э. д. с. \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r_R , замкнутого на сопротивление r :

$$U = \mathcal{E} - I r_R,$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r + r_R}, \quad I_{кз} = \frac{\mathcal{E}}{r_R},$$

видно, что свойства емкостных и индуктивных генераторов находятся в дуальном соотношении. Для перехода от соотношений одного генератора к соотношениям другого, необходимо поменять местами ток и напряжение, проводимость и сопротивление. Индуктированному току емкостного генератора соответствует индуктированное напряжение (э. д. с.) индуктивного генератора, причем индуктированный ток емкостного генератора равен току короткого замыкания, тогда как э. д. с. индуктивного генератора равна напряжению холостого хода. Для емкостного генератора в большинстве случаев недопустим режим холостого хода из-за большой величины напряжения U_{xx} ; для индуктивного генератора режим короткого замыкания обычно недопустим из-за большого тока $I_{кз}$.

Поэтому индуктивные генераторы могут быть охарактеризованы как «генераторы напряжения», а емкостные — как «генераторы тока».

б) Переменные проводимости утечек

Расчеты, проведенные нами на основании многочисленных данных опытов различных авторов, в том числе

и наших собственных опытов, показали, что зависимость проводимости между двумя металлическими электродами в воздухе от напряжения может быть аппроксимирована уравнением

$$g = a + bU^m, \quad (123)$$

где a , b , и m — постоянные, определяемые геометрией электродов и состоянием газовой среды.

Если проводимость утечки ротора генератора выражается уравнением (123), то внешняя характеристика вместо уравнения (114) примет вид

$$I = I_0 - aU - bU^{m+1}. \quad (124)$$

Ток короткого замыкания по-прежнему определяется равенством (113),

но напряжение холостого хода теперь должно быть определено из нелинейного уравнения

$$aU_{xx} + bU_{xx}^{m+1} = AnU_s. \quad (125)$$

На рис. 19 представлены зависимости тока короткого замыкания и напряжения холостого хода от напряжения возбуждения (или скорости вращения).

Мощность и к. п. д. генератора равны соответственно

$$P = U(I_0 - aU - bU^{m+1}), \quad (126)$$

$$\eta = \frac{UI}{UI_0 + U_s I_s}; \quad (127)$$

к. п. д. растет по мере приближения к режиму короткого замыкания, достигая своего максимального значения

$$\eta_{\text{макс}} = \frac{UI_0}{UI_0 + U_s I_s}. \quad (128)$$

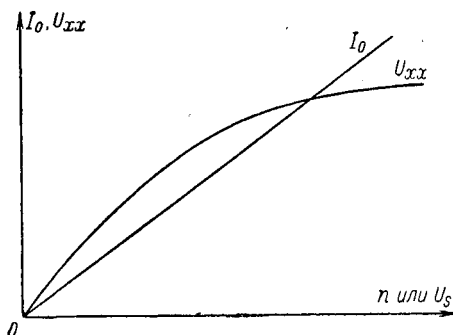


Рис. 19.

Если потери мощности в цепи статора малы по сравнению с мощностью, развиваемой генератором, то

$$\eta = \frac{I}{I_0} \text{ и } \eta_{\text{макс}} = 1. \quad (129)$$

Вводя обозначение $\alpha = \frac{U_{xx}}{U_S}$ и используя равенство (125), можно переписать выражения (124) и (126) в относительных координатах

$$\left. \begin{aligned} I' &= 1 - \frac{\alpha x}{An} U' - \left(1 - \frac{\alpha x}{An}\right) U'^{m+1} \\ P' &= U' \left[1 - \frac{\alpha x}{An} U' - \left(1 - \frac{\alpha x}{An}\right) U'^{m+1} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (130)$$

Так как в реальном генераторе всегда выполняется условие $A \gg \alpha$, а величина $\alpha < n$, то равенства (130) могут быть заменены приближенными

$$\left. \begin{aligned} I' &= 1 - \frac{\alpha x}{An} U' - U'^{m+1} \\ P' &= U' \left[1 - \frac{\alpha x}{An} U' - U'^{m+1} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (131)$$

На рис. 20 представлены в относительных координатах внешняя характеристика, мощность и к. п. д.

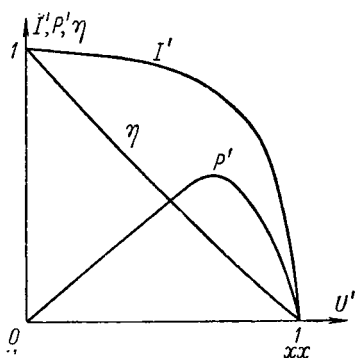


Рис. 20.

Из сопоставления графиков рис. 17 и 20 можно сделать следующие заключения. В генераторе, обладающем переменной проводимостью утечки, максимум полезной мощности сдвигается в сторону холостого хода; в режиме максимальной мощности ток больше, чем $\frac{I_0}{2}$, напряжение больше, чем $\frac{U_{xx}}{2}$.

Для проверки вышеизложенного был изготовлен и испытан макет емкостного генератора с независимым возбуждением.

Генератор полностью соответствовал принципиальной

схеме рис. 7 и являлся машиной с продольным полем реакции якоря. Поэтому сопоставление результатов опыта с только что выведенными соотношениями возможно только для индуктированного тока. Статор генератора (рис. 21) состоял из пяти пар алюминиевых полудисков;

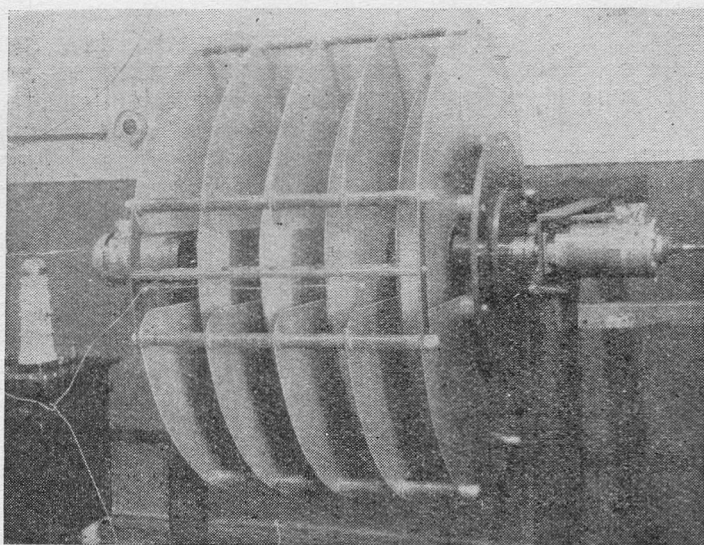


Рис. 21.

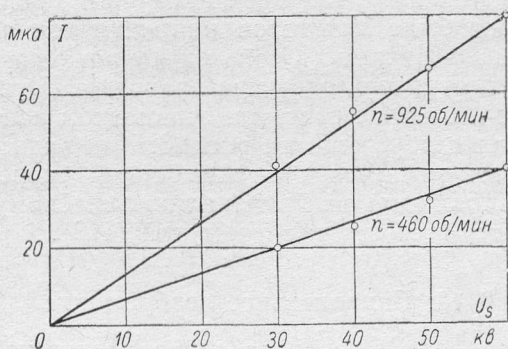


Рис. 22.

верхние полудиски, соединенные друг с другом, изолированы от нижних, так же соединенных между собой.

Ротор генератора состоял из четырех дисков, расположенных симметрично относительно дисков статора и укрепленных на общем валу, на концах которого находились два двигателя постоянного тока. Каждый роторный диск был склеен из двух изоляционных дисков, между которыми помещались два полудиска из алюминиевой фольги.

Токоъем осуществлялся системой щеток, представлявших собой стальные электроды, установленные против каждого из роторных дисков на малом расстоянии; это расстояние при работе генератора перекрывалось искрой.

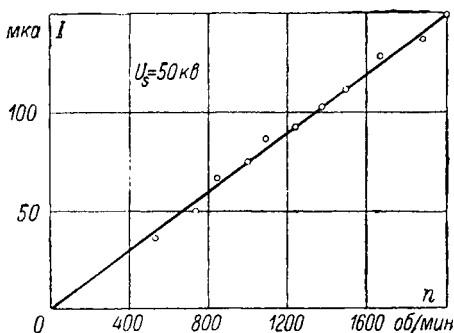


Рис. 23.

В целях уменьшения пульсаций тока генератора (§ 8) его роторные полудиски были сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол $\frac{\pi}{4}$.

При измерении тока замкнутого короткого генератора измерялся ток лишь близкий к току короткого замыкания, так как на искровых промежутках под щетками было некоторое напряжение. На рис. 22 представлена зависимость тока от напряжения возбуждения при постоянной скорости вращения. Зависимость тока от скорости вращения при неизменном напряжении возбуждения изображена на рис. 23. Как видно из этих графиков, ток меняется в зависимости от скорости вращения и напряжения возбуждения по линейному закону, что находится в согласии с формулой (113).

§ 18. Параллельное возбуждение

Для получения генератора с параллельным возбуждением необходимо статор включить параллельно ротору; электрическая схема такого генератора представлена на рис. 2, ж. В этом случае напряжение возбуждения равно

напряжению генератора, а индуктированный ток определяется соотношением (113), в котором U_s заменено на U , т. е.

$$I_0 = AnU. \quad (132)$$

Отличие от равенства (113) заключается еще и в том, что ток I_0 , не являющийся теперь постоянной величиной, не равен току короткого замыкания, так как генератор с параллельным возбуждением не может работать в режиме короткого замыкания.

Рассмотрим работу генератора с параллельным возбуждением на нагрузку при проводимостях утечек, зависящих от напряжения, т. е. при

$$g_i = a + bU^m; \quad (133)$$

здесь g_i является суммарной проводимостью утечек статора и ротора.

Тогда ток в нагрузке равен, согласно равенству (124)

$$I = (An - a)U - bU^{m+1}. \quad (134)$$

Полагая ток равным нулю, найдем напряжение холостого хода:

$$U_{xx} = \sqrt[m]{\frac{An - a}{b}}. \quad (135)$$

Максимальное значение тока

$$\begin{aligned} I_{\text{макс}} &= \frac{m}{\sqrt[m]{m+1}} (An - a) \sqrt[m]{\frac{An - a}{b}} = \\ &= mb \left(\frac{U_{xx}}{\sqrt[m]{m+1}} \right)^{m+1} \end{aligned} \quad (136)$$

получается при напряжении

$$U_{I_{\text{макс}}} = \sqrt[m]{\frac{An - a}{(m+1)b}} = \frac{U_{xx}}{\sqrt[m]{m+1}}. \quad (137)$$

Мощность генератора

$$P = (An - a)U^2 - bU^{m+2} \quad (138)$$

имеет максимум

$$P_{\text{макс}} = b \frac{m}{m+2} \sqrt[m]{\left(\frac{2}{m+2}\right)^2} U_{xx}^{m+2} \quad (139)$$

при

$$\left. \begin{aligned} U_{P_{\max}} &= \sqrt{\frac{2}{m+2}} U_{xx} \\ I_{P_{\max}} &= b \frac{m}{m+2} \sqrt{\frac{2}{m+2}} U_{xx}^{m+1}. \end{aligned} \right\} \quad (140)$$

Из приведенных соотношений следует, что максимум мощности не совпадает с максимумом тока; последний имеет место при несколько меньшем напряжении.

Зависимость к. п. д. генератора от напряжения определяется соотношением

$$\eta = \frac{An - a}{An} - \frac{b}{An} U^m, \quad (141)$$

из которого видно, что к. п. д. стремится к своему наибольшему значению

$$\eta_{\max} = \frac{An - a}{An} \quad (142)$$

при приближении к короткому замыканию.

При условии, что $A \gg a$ равенства (134) — (141) могут быть заменены приближенными:

$$\left. \begin{aligned} I &= AnU - bU^{m+1}; \quad U_{xx} = \sqrt[m]{\frac{An}{b}}; \\ I_{\max} &= \frac{mAn}{m+1} \sqrt[m]{\frac{An}{b}}; \quad U_{I_{\max}} = \sqrt[m]{\frac{An}{(m+1)b}}; \\ P &= AnU^2 - bU^{m+2}; \quad U_{P_{\max}} = \sqrt[m]{\frac{An}{(m+2)b}}; \\ \eta &= 1 - \frac{b}{An} U^m = 1 - \left(\frac{U}{U_{xx}}\right)^m. \end{aligned} \right\} \quad (143)$$

Все приведенные соотношения удобнее представить в относительных координатах. Так же, как и для генератора с независимым возбуждением, этими координатами являются отношения тока и напряжения к их макси-

мальным значениям, т. е. $I' = \frac{I}{I_{\max}}$ и $U' = \frac{U}{U_{xx}}$.

Внешняя характеристика в этих координатах запишется так:

$$I' = \frac{(m+1)^{\frac{m+1}{m}}}{m} U' (1 - U'^m) \quad (144)$$

и соответственно

$$U'_{I_{\max}} = \frac{1}{\sqrt[m]{m+1}}. \quad (145)$$

Мощность в относительных координатах

$$P' = \frac{(m+1)^{\frac{m+1}{m}}}{m} U'^2 (1 - U'^m). \quad (146)$$

При максимуме мощности напряжение, ток и мощность равны:

$$\left. \begin{aligned} U'_{P_{\max}} &= \sqrt[m]{\frac{2}{m+2}}; & I'_{P_{\max}} &= m\sqrt{2} \left(\frac{m+1}{m+2}\right)^{\frac{m+1}{m}}; \\ P'_{\max} &= \sqrt[m]{\frac{4(m+1)^{m+1}}{(m+2)^{m+2}}}. \end{aligned} \right\} \quad (147)$$

На рис. 24 представлены графики тока, мощности и к. п. д. в относительных координатах.

Из этих графиков видно, что для генератора с параллельным возбуждением область наивыгоднейших режимов лежит при напряжениях больших, чем $\frac{U_{\text{хх}}}{2}$ и тем ближе к $U_{\text{хх}}$, чем больше величина m .

Из уравнения внешней характеристики (134) можно определить минимальную скорость вращения, ниже которой самовозбуждение становится невозможным:

$$n_{\min} = \frac{g + a + bU^m}{A}. \quad (148)$$

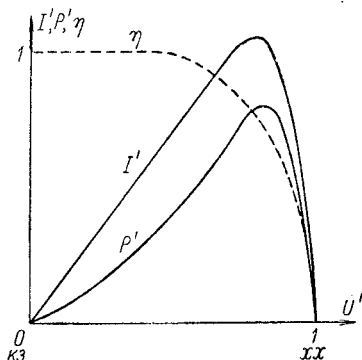


Рис. 24.

Минимальная скорость вращения оказывается различной в зависимости от нагрузки генератора; ее наименьшее значение при холостом ходе

$$(n_{\text{мин}})_{\text{мин}} \approx \frac{a}{A},$$

а так как $a \ll A$, то практически генератор будет возбуждаться с самого начала вращения.

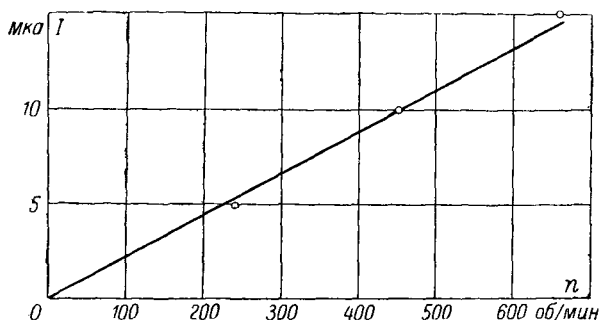


Рис. 25.

Проверка теоретических выводов была проведена на машине Уимшерста. Обычно работу такой машины объясняют довольно сложно, но в действительности машина Уимшерста является емкостной машиной с параллельным возбуждением.

Один диск следует считать статором, другой — ротором; то обстоятельство, что оба диска вращаются, не вносит принципиально никаких изменений в характер работы машины.

Для того чтобы исследовать такую машину в чистом виде, были отключены лейденские банки, обычно включенные параллельно машине.

В первую очередь была определена зависимость тока от скорости вращения при коротком замыкании зажимов генератора. При этом измеренный ток не являлся током короткого замыкания (для генератора с параллельным возбуждением, равным нулю), так как током осуществлялся через искровой промежуток. На рис. 25 представлен ток в функции скорости вращения.

Линейный характер этой зависимости, противоречащий равенству (134), объясняется тем, что работе генератора соответствовали сравнительно низкие напряжения, при которых еще не сказывается нелинейный характер проводимости утечек генератора.

Затем была снята внешняя характеристика генератора при неизменной скорости вращения. На рис. 26 кружками отмечены данные опыта. Путем экстраполяции можно было определить истинное значение напря-

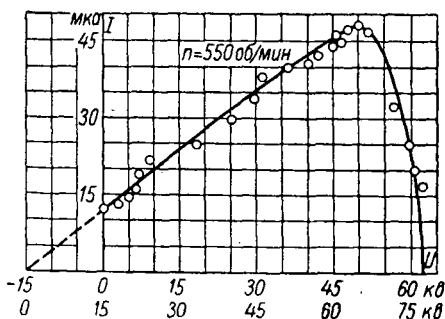


Рис. 26.

жения генератора; поправка совпадала с измеренным напряжением на искровом промежутке (15 кВ). На рис. 26 нижний ряд цифр на оси абсцисс соответствует истинному значению напряжения генератора. По значениям $I_{\text{макс}}$, $U_{I_{\text{макс}}}$ и $U_{\text{хх}}$ по формулам (135), (136), (137) были определены значения параметров генератора. Для определения m получается уравнение:

$$\lg(m + 1) = m \lg \frac{U_{\text{хх}}}{U_{I_{\text{макс}}}}$$

откуда, по подстановке численных значений, решая графическим путем, находим $m = 15$. Соответственно, $A_n - a = 0,788$, $b = 3,16 \cdot 10^{-29}$; здесь ток в микроамперах, напряжение в киловольтах. Подставляя найденные значения в уравнение (134), получим внешнюю характери-

стику генератора; она представлена на рис. 26 сплошной линией.

При измерении напряжения холостого хода также необходимо было ввести поправку на напряжение в искровом промежутке диск — щетки. На рис. 27 представ-

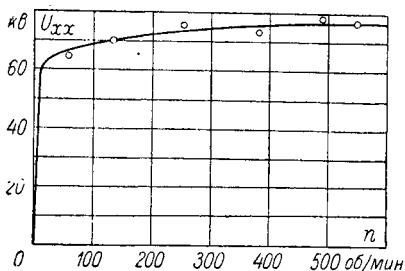


Рис. 27.

лена зависимость напряжения холостого хода (исправленного) от скорости вращения; кружками отмечены значения, полученные из опыта. Определяя значения параметра $An - a$ при различных значениях скорости вращения, мы убедились, что величиной a можно пренебречь по сравнению с A ; при этом численное значение A сов-

пало с найденным выше из внешней характеристики. На рис. 27 сплошной линией проведена кривая, соответствующая уравнению (135) при $a = 0$ и $A = 1,43 \cdot 10^{-3}$.

§ 19. Последовательное возбуждение

Электрическая схема генератора с последовательным возбуждением изображена на рис. 2, з. К равенству (113), в котором U_S теперь не остается неизменным, а зависит от нагрузки, следует добавить соотношения:

$$U_R = U_S + U; \quad I = I_0 - a_R U_R - b_R U_R^{m+1}. \quad (149)$$

Примем, что характер зависимости проводимостей утечек ротора и статора от напряжения один и тот же — то же значение m , но разные a и b . Это будет справедливо для генератора, в котором утечка в основном определяется утечкой за счет ионизации воздуха.

Из равенств (114) и (149) после преобразований получается уравнение внешней характеристики

$$U = \frac{I b_R}{An} \left\{ \frac{An - (a_R + a_S)}{An b_S + a_S b_R - a_R b_S} \right\}$$

$$- \left(\frac{b_R + b_S}{Anb_S + a_S b_R - a_R b_S} \right)^{m+1} I^m \}; \quad (150)$$

из этого выражения находим ток короткого замыкания

$$I_{кз} = \frac{Anb_S + a_S b_R - a_R b_S}{b_R + b_S} \sqrt[m]{\frac{An - (a_R + a_S)}{b_R + b_S}}. \quad (151)$$

Максимальное значение напряжения

$$U_{\max} = \frac{m}{(m+1)^{\frac{m+1}{m}}} \cdot \frac{b_R}{b_R + b_S} \frac{An - (a_R + a_S)}{An} \times \\ \times \sqrt[m]{\frac{An - (a_R + a_S)}{b_R + b_S}} \quad (152)$$

имеет место при значении тока

$$I_{U_{\max}} = \frac{1}{m \sqrt[m]{m+1}} I_{кз}. \quad (153)$$

При $A \gg a_R$ и $A \gg a_S$ выражения (150) — (153) можно заменить приближенными:

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{I b_R}{An} \left\{ \frac{1}{b_S} - \left(\frac{b_R + b_S}{Anb_S} \right)^{m+1} I^m \right\} \\ I_{кз} &= An \frac{b_S}{b_R + b_S} \sqrt[m]{\frac{An}{b_R + b_S}} \\ U_{\max} &= \frac{m}{(m+1)^{\frac{m+1}{m}}} \cdot \frac{b_R}{b_R + b_S} \sqrt[m]{\frac{An}{b_R + b_S}} \\ I_{U_{\max}} &= \frac{An}{m \sqrt[m]{m+1}} \frac{b_S}{b_R + b_S} \sqrt[m]{\frac{An}{b_R + b_S}} \end{aligned} \right\} \quad (154)$$

Как и в предыдущих случаях перейдем к относительным координатам $I' = \frac{I}{I_{кз}}$ и $U' = \frac{U}{U_{\max}}$. Тогда уравнение внешней характеристики

$$U' = \frac{(m+1)^{\frac{m+1}{m}}}{m} I' (1 - I'^m). \quad (155)$$

Это уравнение, как и следовало ожидать, соответствует уравнению для машины с параллельным возбуждением (144) при условии замены местами тока и напряжения.

Значение тока, соответствующее максимальному напряжению, в относительных координатах

$$I'_{U_{\max}} = \frac{1}{m\sqrt{m+1}}. \quad (156)$$

Уравнение мощности машины в относительных координатах

$$P' = \frac{(m+1)^{\frac{m+1}{m}}}{m} I'^2 (1 - I'^m). \quad (157)$$

При максимуме мощности ток и напряжение принимают значения:

$$I'_{P_{\max}} = \sqrt[m]{\frac{2}{m+2}}; \quad U'_{P_{\max}} = m\sqrt{2} \left(\frac{m+1}{m+2}\right)^{\frac{m+1}{m}}. \quad (158)$$

Выражение для максимальной мощности

$$P'_{\max} = \sqrt[m]{\frac{4(m+1)^{m+1}}{(m+2)^{m+2}}}$$

совпадает с формулой (147).

При максимальном напряжении мощность будет равна

$$P'_{U_{\max}} = \frac{1}{m\sqrt{m+1}}. \quad (159)$$

Таким образом, максимум мощности не совпадает с максимумом напряжения; максимум мощности несколько сдвинут в сторону короткого замыкания.

К. п. д.

$$\eta = \frac{1 - I'^m}{\frac{(b_R + b_S) An}{Anb_S + a_S b_R - a_R b_S} \left\{ \frac{(b_R + b_S) An}{b_R [An - (a_K + a_S)]} - 1 + I'^m \right\}} \quad (160)$$

стремится к наибольшему значению при холостом ходе. Приближенное выражение для к. п. д.

$$\eta = \frac{1 - I'^m}{\frac{b_R + b_S}{b_S} \left(\frac{b_S}{b_R} + I'^m \right)}; \quad (161)$$

его наибольшее значение

$$\eta_{\text{макс}} = \frac{b_R}{b_R + b_S}.$$

Из приведенных соотношений вытекает, что для генератора с последовательным возбуждением, помимо общего для всех генераторов требования, чтобы b_R и b_S имели возможно меньшие значения, существенно также, чтобы $b_R > b_S$.

На рис. 28 представлены все графики в относительных координатах. На кривых указаны стрелки соответствующие движению в направлении от короткого замыкания к холостому ходу.

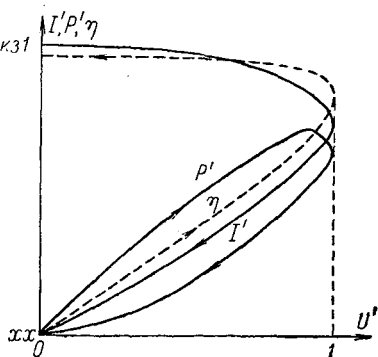


Рис. 28.

Из этих кривых следует, что область наиболее выгодной работы для генератора с последовательным возбуждением соответствует напряжениям, лежащим вблизи максимального значения на восходящей ветви внешней характеристики до ее загиба.

Из приближенного выражения внешней характеристики (154) определяется минимальная скорость вращения, необходимая для самовозбуждения генератора в режиме короткого замыкания:

$$n_{\text{мин}} = \frac{b_R + b_S}{Ab_S} \sqrt[m+1]{b_S I_{\text{кз}}^m}; \quad (162)$$

как и в предыдущем случае, минимальная скорость вращения зависит от нагрузки, возрастая вместе с ней.

Опыты производились на той же машине, что и в предыдущем случае. Для испытания ее по схеме последова-

тельного возбуждения пришлось разрезать щетки, общие для обоих дисков, затем пересоединить их согласно рис. 2, 3.

Машина возбуждалась, но развивала малый ток при относительно малых напряжениях.

Причиной этого являлось нерациональное соотношение между параметрами цепей ротора и статора и наличие искровых промежутков.

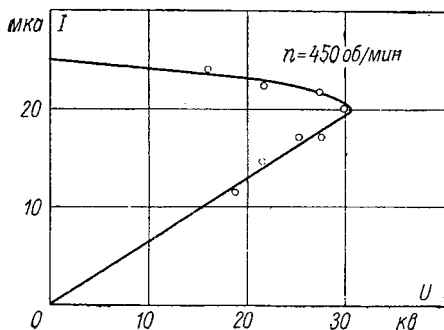


Рис. 29.

Была снята лишь одна зависимость — тока от напряжения при неизменной скорости вращения. Результаты измерений приведены на рис. 29; напряжение здесь исправлено, как и в предыдущем случае, на величину напряжения на искровых промежутках. Кружками обозначены данные опыта; сплошная кривая соответствует расчету, при тех же значениях параметров, что и в предыдущем случае.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕМКОСТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

§ 20. Параллельное возбуждение

Емкостные машины, как и индуктивные, обратимы. При работе емкостной машины в качестве двигателя возможны те же схемы соединения цепей ротора и статора, что и в генераторном режиме.

Если при переходе к двигательному режиму поляр-

ность напряжения возбуждения и напряжения ротора сохраняются неизменными, то машина будет вращаться в сторону, обратную той, в которую она вращается при работе генератором.

При изменении полярности одного только напряжения (возбуждения или ротора) направление вращения двигателя и генератора совпадают.

Исходя из этого ясно, что при переходе от генераторного режима к двигательному, машина с параллельным возбуждением сохраняет свое направление вращения, а машина с последовательным возбуждением — меняет на обратное.

Электрическая схема двигателя с параллельным возбуждением представлена на рис. 30. Здесь g_i — суммарная проводимость утечек ротора и статора, включенных параллельно друг другу. Ток I , потребляемый двигателем из сети, равен сумме токов ротора I_0 и внутренней утечки Ug_i . Принимая, что для двигателя остаются в силе равенства (132) и (133), установленные для генератора, получим

$$I = I_0 + Ug_i = U(An + a + bU^m). \quad (163)$$

Мощность, потребляемая двигателем

$$P_n = UI = U^2(An + a + bU^m). \quad (164)$$

Мощность на валу двигателя

$$P = UI_0 = AnU^2, \quad (165)$$

а вращающий момент, развиваемый двигателем

$$M = \frac{30P}{\pi n} = \frac{30}{\pi} AU^2. \quad (166)$$

К. п. д. двигателя

$$\eta = \frac{An}{An + a + bU^m}; \quad (167)$$

так как $An \gg a$, то приближенно

$$\eta = \frac{An}{An + bU^m}. \quad (168)$$

Из последнего выражения видно, что область напряжений, соответствующих высоким значениям к. п. д., ограничена сверху

$$U < \sqrt[m]{\frac{An}{b}}$$

Графики зависимости тока, вращающего момента и к. п. д. от напряжения при постоянной скорости вращения приведены на рис. 31. На рис. 32 даны те же вели-

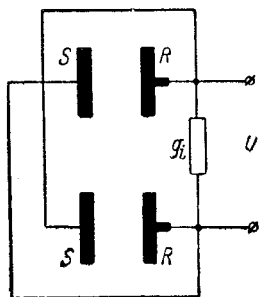


Рис. 30.

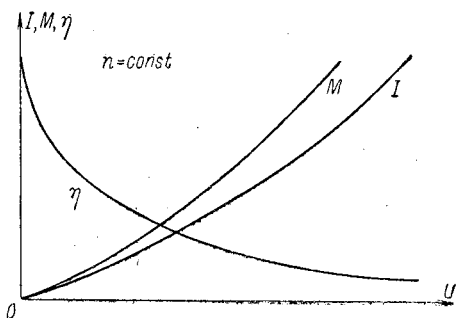


Рис. 31.

чины в функции скорости вращения при неизменном напряжении.

В качестве двигателя с параллельным возбуждением была использована та же машина Уимшерста, испытанная ранее в генераторном режиме. С целью уменьшения механических потерь она была переделана — диски были поставлены на шарикоподшипники; электрическая схема полностью соответствовала рис. 30, только коротко замкнутый проводник был переставлен относительно щеток на тот же угол, но не в направлении вращения диска, как у генератора, а в противоположном.

Ввиду малой мощности двигателя скорость вращения определялась стробоскопическим методом и все испытание ограничилось измерением напряжения, тока и скорости вращения (табл. 2). Так же, как и в генераторном режиме, в величину напряжения на роторе вводи-

лась поправка на падение напряжения на искровом промежутке под щетками.

Для сопоставления данных опыта с теорией был рассчитан ток по формуле (163) при тех же значениях постоянных, что и для генераторного режима. Как видно

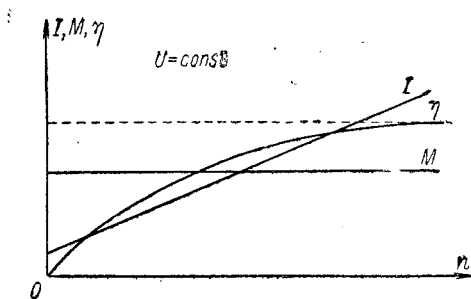


Рис. 32.

из последних столбцов табл. 2, совпадение теории с опытом вполне удовлетворительное.

Таблица 2

U, кв	n, об/мин	I, мка	
		вычисления	измерения
42	130	7,6	8
52	180	14	16
61	300	28,5	30
71	360	50,5	50
79	430	128	135
85	550	335	350

§ 21. Последовательное возбуждение

На рис. 33 изображена электрическая схема двигателя с последовательным возбуждением. Основными уравнениями теперь будут

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= AnU_S; & I &= I_0 + a_R U_R + b_R U_R^{m+1}; \\ U &= U_R + U_S. \end{aligned} \right\} \quad (169)$$

Как и в случае генератора, принимаем, что величина

m в выражении проводимости утечки одна и та же для ротора и статора. Произведя те же преобразования при $A \gg a_S$ и $A \gg a_R$, получим уравнение внешней характеристики:

$$U = \frac{I b_R}{A n} \left\{ \frac{1}{b_S} + \left(\frac{b_R + b_S}{A n b_S} \right)^{m+1} I^m \right\}. \quad (170)$$

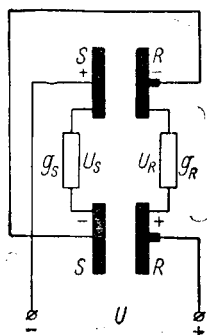


Рис. 33.

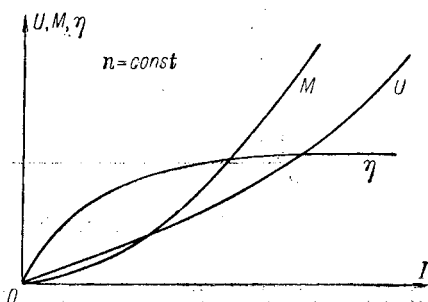


Рис. 34.

Мощность, потребляемая двигателем,

$$P_{\text{п}} = UI = \frac{I^2 b_R}{A n} \left\{ \frac{1}{b_S} + \left(\frac{b_R + b_S}{A n b_S} \right)^{m+1} I^m \right\}. \quad (171)$$

Мощность на валу двигателя

$$P = U_R I_0 = I^2 \frac{b_R + b_S}{A n b_S} \left\{ b_R \left(\frac{b_R + b_S}{A n b_S} \right)^{m+1} I^m - 1 \right\}. \quad (172)$$

Вращающий момент

$$M = \frac{30}{\pi} I^2 \frac{b_R + b_S}{A n^2 b_S} \left\{ b_R \left(\frac{b_R + b_S}{A n b_S} \right)^{m+1} I^m - 1 \right\}, \quad (173)$$

а к. п. д. двигателя

$$\eta = \frac{(b_R + b_S) \left\{ b_R \left(\frac{b_R + b_S}{A n b_S} \right)^{m+1} I^m - 1 \right\}}{b_R \left\{ b_S \left(\frac{b_R + b_S}{A n b_S} \right)^{m+1} I^m + 1 \right\}}. \quad (174)$$

На рис. 34 представлены напряжение, вращающий момент и к. п. д. в функции тока при постоянной ско-

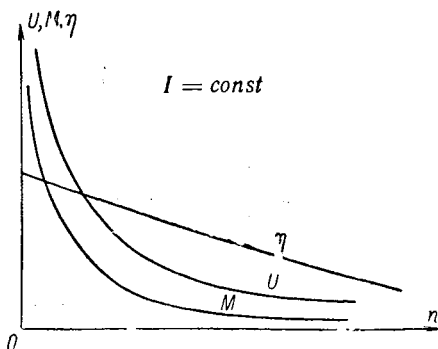


Рис. 35.

рости вращения. Эти же величины в функции скорости вращения при неизменном токе представлены графиками рис. 35.

§ 22. Двигатель с объединенными цепями возбуждения и якоря

При малой мощности двигателя его целесообразно выполнить по упрощенной схеме [Л. 134], представленной на рис. 36. Здесь R — диэлектрический цилиндр — ротор — вращающийся вокруг своей оси, a, a' и b, b' — щетки, осуществляющие токоподвод к ротору; U — постоянное напряжение. Ротор и щетки имеют осевую длину l .

Электрическое поле в теле ротора в основном сосредоточено между щетками $a-a'$ и $b-b'$ (на рис. 36 показано сплошными линиями); часть поля — поле рассеяния — существует в остальной части ротора, между щетками $a-b$ (на рис. 36 показано пунктиром). При условии $r \gg d$ потоком рассеяния можно пренебречь по сравнению с основным потоком.

Если щетки (рис. 36) расположены под углом β к горизонтали, то электрическое поле с одной стороны от них оказывается слабее, чем с другой, и элемент ротора, втягиваясь в более сильное поле, вызывает вращение

ротора; на рис. 36 направление вращения указано стрелкой.

При вращении ротора под щетки a и b приходят все новые элементы ротора с емкостью C' (рис. 36); таким образом, происходит непрерывное изменение емкости в цепи, находящейся под напряжением U .

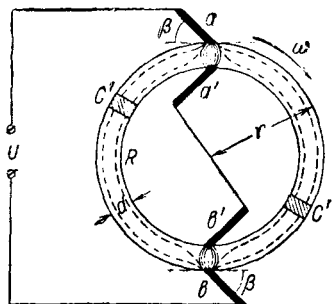


Рис. 36.

В этой системе с одной степенью свободы при переменной емкости C и неизменном напряжении U возникает вращающий момент

$$m = \frac{U^2}{2} \frac{dC}{d\alpha},$$

причем система потребляет ток

$$i = U \frac{dC}{dt};$$

здесь α — угол поворота ротора.

Равномерно вращающийся двигатель, не имеющий сопротивления под щетками, без потока рассеяния и механических потерь, назовем «идеальным» двигателем.

Для такого двигателя

$$M = \frac{U^2}{2} \frac{dC}{d\alpha} = U^2 \frac{C_0}{\omega T} = \frac{U^2 C_0}{2\pi} \quad (175)$$

и

$$I = U \frac{dC}{dt} = \frac{UC_0}{T} = \frac{UC_0 n}{60}, \quad (176)$$

где $C_0 = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r}{r-d}}$ — емкость всего ротора, как цилиндри-

ческого конденсатора длиной l , внешнего радиуса r с диэлектриком толщиной d и проницаемостью ϵ . Таким образом, идеальный двигатель, потребляя постоянный ток, развивает момент, не зависящий от скорости вращения.

Мощность, развиваемая идеальным двигателем,

$$P = \omega M = \frac{U^2 C_0 n}{60} \quad (177)$$

равна мощности P_n потребляемой из сети

$$P_n = UI = \frac{U^2 C_0 n}{60} = P$$

и к. п. д. идеального двигателя $\eta = \frac{P}{P_n} = 1$.

Из выражения (175) видно, что реверсирование двигателя изменением знака напряжения невозможно. Направление вращения определяется, как было указано выше, только наклоном щеток;

при $\beta < \frac{\pi}{2}$ двигатель имеет правое вращение, при $\beta > \frac{\pi}{2}$ — левое,

при $\beta = \frac{\pi}{2}$ двигатель момента не развивает, так как нет изменения емкости в системе. Это было проверено нами на различных макетах, причем щеткам придавалось несколько изогнутая форма; для каждого вида щеток можно подобрать оптимальное положение, при котором двигатель развивает наибольший момент.

Двигатель, изображенный на рис. 36, представляет собой двухполюсную машину; он может быть выполнен и многополюсным.

При желании снизить вдвое напряжение источников питания, при том же моменте, двигатель выполняется по параллельной схеме (рис. 37). Преимуществом этой схемы является лучшее использование поверхности ротора — момент создается не только на внешней, но и на внутренней поверхности ротора.

Недостатком этого варианта является необходимость изоляции щеток a' и b' друг от друга на полное напряжение, что трудно выполнимо в микромашинах.

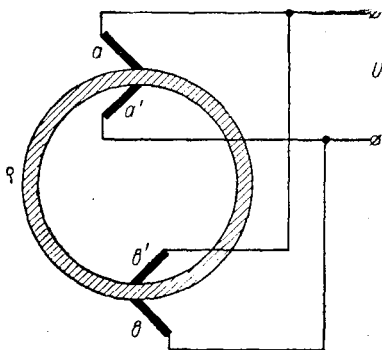


Рис. 37.

Осуществить токоподвод к диэлектрическому ротору без разрядного промежутка не представляется возможным. Поэтому в реальном двигателе в первую очередь необходимо учитывать сопротивление под щетками, что приводит к характеристикам, значительно отличающимся от характеристик идеального двигателя.

В отличие от идеального двигателя, в котором напряжение на роторе при любой скорости вращения равно напряжению U сети, в реальном двигателе напряжение на роторе тем меньше, чем больше скорость вращения, так как уменьшается время зарядки емкости через сопротивление. Это сопротивление непостоянно (§ 17) и аппроксимируется равенством (123): $g = a + bu^m$.

Каждая пара диаметрально противоположных элементов ротора (рис. 36) представляет конденсатор емкостью $\frac{C'}{2}$, где C' — емкость одного элемента. При входе такой пары под щетки она имеет напряжение обратного знака $U_{ск} < U$, до которого она успела зарядиться под другими щетками, за время t_k пребывания под ними.

Обозначив мгновенное значение напряжения на разрядном промежутке через u_p , получим исходное уравнение для промежутка $0 \div t_k$:

$$\frac{2}{C'} \int idt + u_p = U \quad \text{или} \quad \frac{2}{C'} i + \frac{du_p}{dt} = 0. \quad (178)$$

Подставляя $i = u_p g = u_p (a + bu_p^m)$, придем к уравнению

$$\frac{2}{C'} u_p (a + bu_p^m) + \frac{du_p}{dt} = 0. \quad (179)$$

Начальные условия:

при $t = 0$, $u_c = -U_{ск}$, что дает $u_p = U + U_{ск}$.

Разделяя переменные в (179) и интегрируя, получим

$$\frac{u_p}{\sqrt[m]{a + bu_p^m}} = Ae^{-\frac{2a}{C'} t}, \quad (180)$$

где A — постоянная интегрирования.

При $t = 0$

$$\frac{U + U_{\text{ск}}}{\sqrt[m]{a + b(U + U_{\text{ск}})^m}} = A;$$

подставляя в (180) и заменяя $u_p = U - u_c$, получим после преобразований

$$u_c = U - (U + U_{\text{ск}}) e^{-\frac{2a}{C'} t} \times \\ \times \sqrt[m]{\frac{a}{a + b(U + U_{\text{ск}})^m \left(1 - e^{-\frac{2a}{C'} mt}\right)}}. \quad (181)$$

В момент выхода элемента C' из-под щетки при $t = t_k$ находим

$$U_{\text{ск}} = U - (U + U_{\text{ск}}) \times \\ \times \sqrt[m]{\frac{a}{ae^{\frac{2a}{C'} mt_k} + b(U + U_{\text{ск}})^m \left(e^{\frac{2a}{C'} mt_k} - 1\right)}}. \quad (182)$$

Точно решить (182) относительно $U_{\text{ск}}$ не удастся, поэтому ограничимся приближением, раскладывая показательную функцию в ряд и ограничиваясь двумя членами:

$$U_{\text{ск}} = U - (U + U_{\text{ск}}) \times \\ \times \sqrt[m]{\frac{C_0 n}{C_0 n + 120m[a + b(U + U_{\text{ск}})^m]}};$$

Так как U_c и $U_{\text{ск}}$ того же порядка, что и U , то пренебрегая малыми величинами, приходим к

$$U_{\text{ск}} = U - \sqrt[m]{\frac{C_0 n}{120mb}}. \quad (183)$$

Подставляя (183) в (181), найдем

$$u_c = U - \left(2U - \sqrt[m]{\frac{C_0 n}{120mb}} \right) e^{-\frac{2a}{C'} t} \times \\ \times \sqrt[m]{\frac{a}{a + b \left(2U - \sqrt[m]{\frac{C_0 n}{120mb}} \right)^m \left(1 - e^{-\frac{2a}{C'} mt} \right)}};$$

приближенно

$$u_c = U - \frac{2U - \sqrt[m]{\frac{C_0 n}{120mb}}}{\sqrt[m]{1 + Nt}}, \quad (184)$$

где

$$N = \frac{2m}{C'} \left[a + b \left(2U - \sqrt[m]{\frac{C_0 n}{120mb}} \right)^m \right].$$

Среднее значение за время t_k

$$U_c = U - \frac{U + U_{\text{ск}}}{Nt_k} \frac{m}{m-1} \left[(1 + Nt_k)^{1 - \frac{1}{m}} - 1 \right],$$

что после подстановки выражения для N и пренебрежении малыми величинами дает

$$U_c = U + \frac{C_0 n}{120(m-1)b(U + U_{\text{ск}})^{m-1}} - \\ - \frac{m}{m-1} \cdot \sqrt[m]{\frac{C_0 n}{120mb}}. \quad (185)$$

Ток зарядки емкости $\frac{C'}{2}$

$$i = \frac{C'}{2} \frac{du_c}{dt}; \quad (186)$$

используя (182—186) и пренебрегая малыми величинами, найдем среднее значение тока за время t_k :

$$I = \frac{C_0 n}{60} \left(U - \sqrt[m]{\frac{C_0 n}{120mb}} \right) = \frac{U_{\text{ск}} C_0 n}{60}. \quad (187)$$

В соответствии с (185) и (187) получим выражение

для момента:

$$M = \frac{U_c J_{60}}{2\pi n} = \frac{C_0 \left(U - \sqrt{\frac{C_0 n}{120mb}} \right)}{2\pi} \times$$

$$\times \left[U + \frac{C_0 n}{120(m-1)b(U+U_{\text{ск}})^{m-1}} - \frac{m}{m-1} \sqrt{\frac{C_0 n}{120mb}} \right]; \quad (188)$$

пусковой момент по-прежнему определяется (175).

К. п. д. двигателя

$$\eta = \frac{U_c}{U} = 1 + \frac{C_0 n}{120(m-1)bU(U+U_{\text{ск}})^{m-1}} -$$

$$- \frac{m}{(m-1)U} \sqrt{\frac{C_0 n}{120mb}}. \quad (189)$$

Ток достигает максимального значения

$$I_{\text{макс}} = 2bU^{m+1} \left(\frac{m}{m+1} \right)^{m+1} \quad (190)$$

при

$$n_{I_{\text{макс}}} = \frac{120bU^m}{C_0} \frac{m}{(m+1)^m}.$$

Кривые $M(n)$, $U_c(n)$ и $\eta(n)$ экстремумов не имеют и вместе с кривой $I(n)$ обращаются в нуль при

$$n_0 = \frac{120mbU^m}{C_0} = \left(\frac{m+1}{m} \right)^m n_{I_{\text{макс}}}.$$

Зависимости $I(n)$, $M(n)$, $U_c(n)$ и $\eta(n)$ представлены на рис. 38.

Скорость вращения n_0 соответствует идеальному режиму холостого хода, когда двигатель полностью разгружен и момент равен нулю. В действительности физический смысл имеют лишь начальные части кривых до значения скорости вращения n_m , соответствующей реальному холостому ходу, причем $n_m < n_{I_{\text{макс}}}$. Только для микродвигателей, при очень малых потерях на трение

о воздух, возможно, что $n_m > n_{I_{\max}}$; это наблюдалось нами на одном из наших макетов.

Хотя скорость вращения n_0 и не имеет физического смысла, однако ее введение удобно для записи характеристик двигателя в относительных координатах; в этом отношении n_0 аналогично синхронной скорости для асинхронного двигателя, также недостижимой.

Введя относительные координаты, как отношение величины к ее максимальному значению, $n' = \frac{n}{n_0}$, $I = \frac{I}{I_{\max}}$

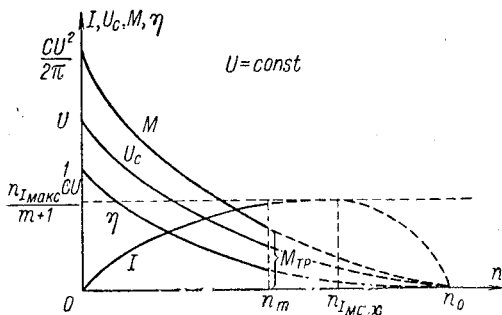


Рис. 38.

$M' = \frac{M}{M_0}$, можно преобразовать равенства (187) и (188) к виду

$$I' = \left(\frac{m+1}{m}\right)^{m+1} n' \left(1 - \sqrt[m]{n'}\right) \quad (191)$$

и

$$M' = \left(1 - \sqrt[m]{n'}\right) \left\{ 1 - \frac{m}{m+1} \sqrt[m]{n'} \left[1 - \left(\frac{\sqrt[m]{n'}}{2 + \sqrt[m]{n'}}\right)^{m-1} \right] \right\}. \quad (192)$$

Для проверки теории был изготовлен макет, полностью соответствующий схеме рис. 36; макет двигателя исследовался при переменной нагрузке и постоянном напряжении. Помимо тока, напряжения и скорости вращения (по стробоскопу) определялся еще момент, развиваемый двигателем, но не непосредственно, а через время выбега t_b . Совпадение расчетного времени с определенным из опыта указывает на совпадение расчетного

и экспериментального значения вращающего момента.

При выводе выражения для времени выбега воспользуемся уравнением движения двигателя, отключенного от сети

$$J \frac{d\omega}{dt} = -M_{\text{тр}} = -M_1 - M_2; \quad (193)$$

здесь J — осевой момент инерции ротора, M_1 — момент трения в подшипниках, M_2 — момент трения в воздухе. Как известно, M_1 не зависит от скорости, а M_2 пропорционален квадрату скорости $M_2 = s\omega^2$.

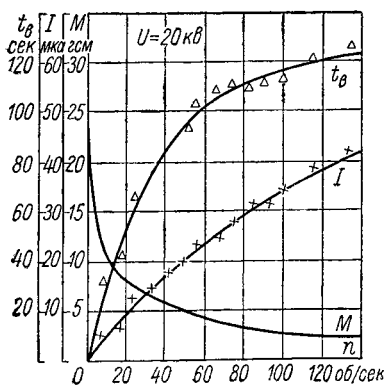


Рис. 39.

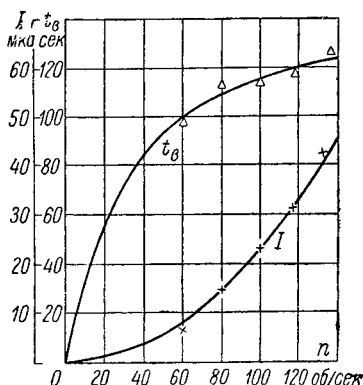


Рис. 40.

Интегрирование (193) при начальных условиях — $t=0$ и $\omega = \omega_n$ где ω_n — скорость в момент отключения двигателя от сети, дает

$$t = \frac{J}{\sqrt{M_1 s}} \left(\text{arctg} \sqrt{\frac{s}{M_1}} \omega_n - \text{arctg} \sqrt{\frac{s}{M_1}} \omega \right),$$

а время выбега

$$\begin{aligned} t_b &= \frac{J}{\sqrt{M_1 s}} \text{arctg} \sqrt{\frac{s}{M_1}} \omega_n = \\ &= \frac{J}{\sqrt{M_1 s}} \text{arctg} \frac{\pi}{30} \sqrt{\frac{s}{M_1}} n_n. \end{aligned} \quad (194)$$

На рис. 39 сплошными линиями изображены зависимости $I(n)$, $M(n)$ и $t_b(n)$ при $U = 20 \text{ кВ}$, $J = 5,6 \cdot 10^{-2} \text{ г} \cdot \text{см} \cdot \text{сек}$, $M_1 = 0,11 \text{ кг} \cdot \text{см}$, $s = 3,5 \cdot 10^{-6}$, $a = 1,2 \cdot 10^{-9}$, $b =$

$= 4 \cdot 10^{-24}$, $m = 3,5$; треугольниками и крестиками отмечены экспериментальные точки.

Кроме того, были измерены ток и время выбега ненагруженного двигателя при различных напряжениях.

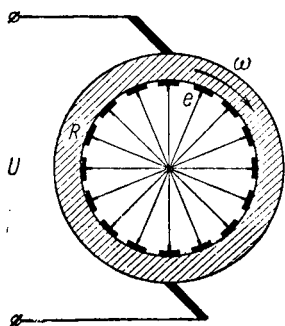


Рис. 41.

Результаты измерений представлены на рис. 40, где треугольниками и крестиками отмечены экспериментальные точки, а сплошные линии соответствуют расчету по формулам (187) и (194).

С целью уменьшения числа разрядных промежутков двигатель может быть выполнен по схеме рис. 41; диаметрально противоположные электроды на внутренней поверхности ротора соединены друг с другом. Подобный макет был также испытан и показал полное совпадение с теорией.

Увеличение мощности двигателя может быть достигнуто за счет использования диэлектрика с высокой проницаемостью (увеличения C_0). Однако из выражений (185), (187) и (188) видно, что использование такого диэлектрика влечет за собой требование уменьшения сопротивления разрядного промежутка под щетками. В противном случае увеличение C_0 может привести даже к уменьшению мощности из-за резкого снижения U_c .

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПУТИ УВЕЛИЧЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЕМКОСТНЫХ МАШИН

§ 23. Введение электрически прочной среды

Из изложенного в гл. II следует, что удельная мощность P_0 емкостной машины пропорциональна скорости вращения n и удельной энергии W_0

$$P_0 \sim n W_0. \quad (195)$$

Выражая удельную энергию через диэлектрическую проницаемость ϵ и напряженность поля E , получим

$$P_0 \sim n \epsilon E^2. \quad (196)$$

Из этого выражения видно, что удельная мощность может быть увеличена тремя путями: 1) увеличением скорости вращения, 2) увеличением рабочей напряженности поля и 3) увеличением диэлектрической проницаемости рабочего диэлектрика (другими словами, увеличением максимальной емкости статор — ротор).

Первый путь весьма ограничен, поскольку предел скорости вращения определяется механической прочностью ротора, и рассчитывать на возможность значительного увеличения скорости вращения не приходится.

Второй путь — увеличение напряженности поля — заманчив, поскольку напряженность поля входит в выражение удельной мощности машины в квадрате; этим путем идет большинство исследователей. Увеличение напряженности поля возможно введением в машину диэлектрической среды с большей, чем для воздуха (30 *кв/см*), электрической прочностью; к таким средам относятся вакуум, жидкие диэлектрики и сжатые газы.

Электрическая прочность вакуума достигает весьма высоких значений, превышающих 1000 *кв/см*. При этом электрическая прочность вакуума в значительной мере зависит от материала электродов, от состояния их поверхности, от расстояния между ними и от степени неоднородности поля. В табл. 3 приведены данные опытов Андерсона для различных материалов электродов при расстоянии между ними в 1 *мм*.

Таблица 3

Материал электродов	Напряжение пробоя <i>кв_{макс}</i>	Электрическая проч- ность, <i>кв_{макс}/см</i>
Сталь	122	1220
Никель	96	960
Алюминий	41	410
Медь	31	310

Из данных табл. 3 видно, что наилучшим материалом является сталь.

С увеличением расстояния между электродами напряжение пробоя возрастает, но электрическая прочность вакуума падает. На рис. 42 приведена зависи-

мость электрической прочности и напряжения пробоя от расстояния между электродами — стальным шаром диаметром 25 мм и стальным диском диаметром 50 мм [Л. 88]. Как видно из этих кривых при напряжениях около 20 кВ электрическая прочность вакуума составляет 4000 кВ/см, но при 200 кВ она не превышает 500 кВ/см и продолжает уменьшаться с увеличением напряжения.

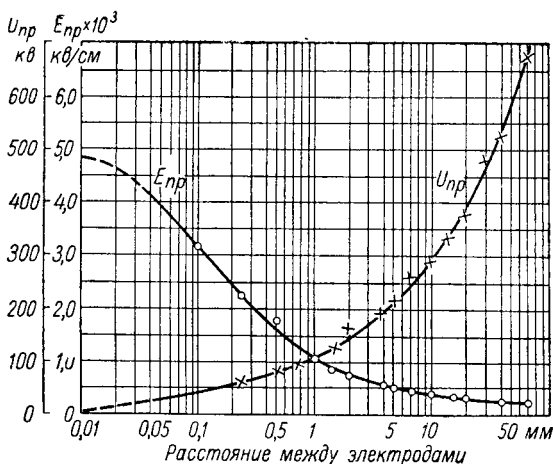


Рис. 42.

Применение вакуума имеет ту положительную сторону, что случайные разряды в машине не сопровождаются появлением озона, который выводит изоляцию из строя.

Помимо указанных преимуществ, применение вакуума в емкостной машине сопровождается отсутствием потерь на трение в среде, что увеличивает к. п. д. машины.

Использование вакуума в емкостной машине определяет материал ротора — он должен быть проводящим. Объясняется это тем, что токосъем с проводящего ротора осуществляется щетками путем непосредственного контакта, возможного и при высоком вакууме. Токосъем с диэлектрического ротора происходит за счет разряда у гребенок; этот разряд в вакууме невозможен.

Однако применение вакуума в емкостной машине связано с целым рядом весьма серьезных трудностей электрического и технологического характера.

К первым относится невозможность создания в реальной машине однородного поля; как известно, это приведет к снижению электрической прочности и, следовательно, удельной мощности машины.

Ко вторым относятся: трудность обезгаживания больших металлических поверхностей, необходимость вакуумных уплотнений при выводе вала машины в атмосферу, неизбежное натекание воздуха в машину и, следовательно, необходимость в насосной установке для поддержания высокого вакуума, плохая работа скользящего контакта.

При значительных размерах металлических деталей емкостной машины прогрев их при откачке может вызвать коробление металла, что для емкостной машины совершенно недопустимо.

Вывод вала из вакуума в атмосферу с помощью вакуумных уплотнений не является еще полностью решенной задачей. Использование приема, позволяющего обходиться без вывода вала из вакуума, примененного, например, в молекулярных насосах Гольвека (ротор помещается в вакууме, статор в атмосфере), возможно лишь при электрическом первичном двигателе. Подобная система имеет смысл лишь для емкостных машин малой и средней мощности; для емкостной машины большой мощности двигатель должен быть неэлектрическим.

Необходимость насосной установки для поддержания высокого вакуума является серьезным недостатком для емкостных машин малой мощности, когда мощность, потребляемая насосом, сравнима с мощностью самой машины.

С ростом мощности машины мощность, потребляемая насосом, становится относительно меньше, так как натекание воздуха через вакуумные уплотнения растет медленнее, чем объем машины. Поэтому для емкостных машин большой мощности наличие насоса не является существенным недостатком.

Трамп [Л. 92] в своей емкостной машине, работавшей в вакууме, достиг напряженности поля всего лишь в 100 кв/см ; при напряжении машины в 90 кв она разви-

вала мощность в 60 вт при значении к. п. д. большем, чем 99%.

Результаты, полученные Трампом, подтверждают изложенное выше.

Работа скользящего контакта в высоком вакууме весьма затруднена из-за отсутствия газовой прослойки между трущимися поверхностями. Сильное трение, обусловленное этим, будет быстро выводить из строя щетку, одновременно ухудшая вакуум. Вынос коллектора в атмосферу потребует вывода высокого напряжения через вал машины, что вряд ли осуществимо, по крайней мере, в настоящее время.

Необходимо отметить, что машина Трампа была машиной переменного тока и не имела скользящего контакта в вакууме.

Использование жидкого диэлектрика в емкостной машине, несмотря на значительную электрическую прочность и несколько повышенную по сравнению с воздухом диэлектрическую проницаемость этих диэлектриков, на наш взгляд, представляется совершенно нереальным.

Действительно, электрическая прочность жидких диэлектриков достигает значений в 250—350 кв/см лишь при тщательной очистке от посторонних примесей и в первую очередь от влаги. Кроме того, высокое значение электрической прочности относится к однородному полю и малым расстояниям между электродами. В емкостной машине при значительном объеме жидкого диэлектрика нет возможности провести тщательную очистку жидкого диэлектрика, а при работе машины неизбежно загрязнение жидкости.

Так как поле в реальной машине не совсем однородно, а расстояние между электродами значительно, то практически электрическая прочность жидкости оказывается в несколько раз меньше приведенной выше величины, лишь незначительно отличаясь от прочности воздуха.

Стремление скомпенсировать практически невысокую электрическую прочность жидкости большой величиной относительной диэлектрической проницаемости, достигающей для некоторых жидкостей нескольких десятков, не приводит к цели, так как сильно полярные жидкости (имеющие большую диэлектрическую проницаемость)

обладают недопустимо большой проводимостью, как это видно из данных табл. 4.

Помимо указанных выше недостатков электрического характера, жидкие диэлектрики обладают большой плотностью, что является причиной чрезмерного возрастания механических потерь при движении ротора в жидкости.

Исследования Иоффе и Гохберга [Л. 58, 59], первыми пытавшихся осуществить емкостную машину с жидкой диэлектрической средой, не считая патентных заявок [Л. 19], не осуществленных на практике, подтверждают правильность наших утверждений.

Таблица 4

Диэлектрик	Вода	Нитробензол	Этиловый спирт	Ацетон
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r	81	37	26	22
Удельное сопротивление ρ ом·см	10^5 — 10^6	10^6 — 10^7	10^6 — 10^7	10^6 — 10^7

Используя в качестве диэлектрика тщательно очищенный керосин ($\epsilon_r = 2,1$), они в малой машине достигли напряженности поля в 200 кв/см; в большой машине, требовавшей несколько тонн керосина, достигнутая напряженность поля не превышала 90 кв/см. Что касается механических потерь на трение ротора в керосине, то Иоффе и Гохберг этим вопросом не интересовались, создавая свои генераторы для физических экспериментов, где величина к. п. д. не имела существенного значения.

Значительно более многообещающим является применение в емкостной машине сжатых газов; это направление для получения электрически прочной среды известно уже несколько десятков лет. Первым использовал сжатый газ, как электрически прочную среду, Чернышев, еще в 1916 г. создавший электростатический вольтметр на 300 кв, работавший при давлении газа

в 10 атм. С этой целью используются самые различные газы — воздух, углекислый газ, азот, водород, четыреххлористый углерод, фреон, хлороформ, элегаз. Последний был исследован Гохбергом и др.

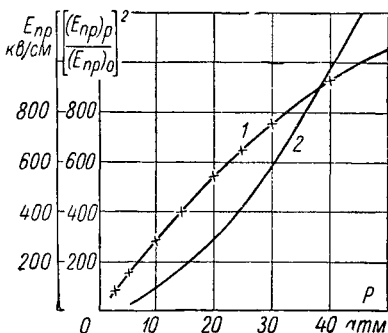


Рис. 43.

Последний был исследован Гохбергом и др. [Л. 89] именно в связи с работами над емкостными машинами. Этот газ—шестифтористая сера SF_6 —обладающий повышенной электрической прочностью и рядом других замечательных свойств (высокое давление сжижения, химическая стойкость и др.), с успехом применяется для газонаполненных высокочастотных конденсаторов и т. п. В последние годы этот газ все чаще стали при-

менять вместо фреона в машинах ленточного типа [Л. 87].

Одним из существенных моментов, говорящих в пользу применения сжатых газов в емкостной машине, является увеличение электрической прочности с давлением (кривая 1 на рис. 43); график построен для воздуха [Л. 69]. Диэлектрическая проницаемость от давления практически не зависит.

Таким образом, увеличение удельной мощности машины оказывается равным квадрату отношения электрической прочности при данном давлении $(E_{пр})_p$ к электрической прочности при нормальном давлении $(E_{пр})_0$; эта величина $\left(\frac{(E_{пр})_p}{(E_{пр})_0}\right)^2$ в функции давления изображена кривой 2 рис. 43.

Как уже указывалось, в емкостной машине неизбежно загрязнение рабочей диэлектрической среды; в силу этого реально достигнутые в машинах напряженности поля несколько меньше, чем полученные при лабораторных исследованиях. Так, Жоливе [Л. 83], работая с углекислым газом при давлении в 27 атм, достиг

напряженности поля в 660 кв/см; Феличи [Л. 91, 118] получал в водороде напряженность поля в 620 кв/см при давлении в 37 атм. Эти напряженности поля были достигнуты при малых расстояниях (2—3 мм), что соответствует напряжениям около 200 кв. С увеличением расстояния между электродами электрическая прочность сжатых газов уменьшается, но несколько медленнее, чем в вакууме,— еще одно соображение в пользу сжатых газов.

Из формулы (114) следует, что полезная мощность машины может быть представлена формулой:

$$P = kE^2n, \quad (197)$$

где k — коэффициент пропорциональности, определяемый конструкцией машины и рабочей средой.

Мощность потерь на трение пропорциональна кубу скорости вращения и плотности газа δ :

$$P_{\text{тр}} = k_1 \delta n^3, \quad (198)$$

где k_1 зависит от формы и размеров ротора.

Отношение полезной мощности к мощности потерь

$$\frac{P}{P_{\text{тр}}} = \frac{k}{k_1} \frac{1}{n^2} \frac{E^2}{\delta} \quad (199)$$

пропорционально отношению квадрата напряженности поля в газовой среде к ее плотности. Поэтому качество газа, используемого для емкостной машины, может быть

охарактеризовано отношением $\frac{E_{\text{пр}}^2}{\delta}$, где $E_{\text{пр}}$ — электрическая прочность газа.

В табл. 5 [Л. 89] приведены относительные значения δ , $E_{\text{пр}}$ и $\frac{E_{\text{пр}}^2}{\delta}$ для различных газов (при нормальных условиях) по отношению к воздуху.

Помимо высокой электрической прочности и большего значения отношения $\frac{E_{\text{пр}}^2}{\delta}$, газ для использования в емкостной машине должен обладать еще целым рядом дополнительных физических и химических свойств. К чи-

слу главнейших требований относятся: 1) химическая инертность газа, особенно по отношению к материалам, используемым в емкостной машине; 2) слабое разложение в электрическом разряде; 3) низкая температура кипения, дающая возможность использования газа при значительных давлениях и обычных температурах.

Таблица 5

Газ	Плотность	Электрическая прочность	$\frac{E^2}{\delta}$ пр	Температура кипения °С
Воздух	1	1	1	—193
Углекислый газ	1,53	0,9	0,53	—78,5 ¹
Азот	0,97	1	1,03	—196
Элегаз	5,1	2,5	1,23	— 62 ¹
Фреон	4,26	2,5	1,47	— 28
Хлороформ	4,09	4,2	4,3	61
Четыреххлористый углерод	5,4	6,3	7,35	76
Водород	0,07	0,65	6,03	—253

¹ Упругость насыщенных паров над твердым веществом при этой температуре равна 760 мм рт. ст.

Необходимость удовлетворить всем требованиям резко сокращает число газов, могущих быть использованными в емкостной машине.

Как правило, большей электрической прочностью обладают газы с большим молекулярным весом, однако, эти газы обладают также большой плотностью.

Кроме того, соединения, обладающие повышенной электрической прочностью в газообразном состоянии, не допускают значительного повышения давления при обычных температурах из-за сжижения или даже при этих температурах находятся в жидком состоянии.

Так, например, четыреххлористый углерод, электрическая прочность которого больше, чем у воздуха в 6,3 раза, при обычных температурах находится в жидком состоянии; упругость его паров составляет всего около 0,1 атм. При разряде в нем происходит разложение с выделением хлора, оказывающего вредное действие на отдельные части машины. Кроме того, если

электрический разряд происходит в смеси четыреххлористого углерода с воздухом (случай весьма возможный в емкостной машине), то происходит окисление, в результате чего появляется фосген. Все это позволяет утверждать, что, несмотря на свою высокую электрическую прочность, четыреххлористый углерод непригоден для использования его в емкостной машине.

Хлороформ, обладая высокой электрической прочностью и большим значением отношения $\frac{E_{\text{пр}}^2}{\delta}$, также является при обычных температурах жидкостью и при разряде разлагается, выделяя хлор; как и четыреххлористый углерод, не пригоден для использования в емкостных машинах.

Фреон, широко используемый в холодильной промышленности, нашел некоторое применение и для емкостных машин, в частности, ленточного типа. Хотя фреон и обладает значительной химической инертностью, однако при обычных температурах он может быть сжат лишь до нескольких атмосфер, что не дает значительного увеличения электрической прочности по сравнению с воздухом. Кроме того, величина $\frac{E_{\text{пр}}^2}{\delta}$, имеющая существенное значение для использования газа в емкостной машине, для фреона всего лишь в 1,5 раза больше, чем для воздуха.

Элегаз при такой же электрической прочности, как и фреон, обладает по сравнению с последним целым рядом преимуществ. При температуре -62°C упругость паров над твердым элегазом составляет 760 мм рт. ст.; при $-50,8^\circ\text{C}$ он плавится и давление насыщенного пара составляет 1710 мм рт. ст.; при комнатных температурах упругость паров достигает нескольких десятков атмосфер; критическая температура 54°C . Элегаз не имеет запаха, безвреден, не горюч, исключительно химически инертен и допускает получение больших давлений при обычных температурах.

Однако значительная плотность элегаза и соответственно с этим невысокое значение отношения $\frac{E_{\text{пр}}^2}{\delta}$ (всего

лишь 1,23) указывают на малую пригодность элегаза (весьма выгодного для газонаполненных конденсаторов) для емкостных машин.

Таким образом, сложные газы, несмотря на свою высокую электрическую прочность, оказываются не в состоянии служить электрически прочной средой в емкостных машинах.

Воздух оказывается более пригодным, но его основным недостатком при повышенном давлении является вызываемое им окисление из-за образования озона и повреждение частей машины при разряде; искры в сжатом воздухе горячие, ослепительно яркие, сопровождаются резким шумом и выделяют много тепла. Кроме того, при высоком давлении в воздухе возможно самовозгорание органической изоляции.

Наилучшим газом является водород, несмотря на то, что его электрическая прочность почти в два раза меньше, чем у воздуха при том же давлении; это означает, что использование водорода требует более высоких давлений. Но переход к большим давлениям в настоящее время не представляет особых затруднений; техника создания всевозможных машин с давлениями 60—75 атм и более достаточно хорошо разработана и освоена. Помимо малой плотности водород обладает еще целым рядом замечательных свойств — большой теплопроводностью, большой теплоемкостью, отсутствием в атмосфере водорода окисления. Именно эти свойства предопределили широкое использование водорода для охлаждения мощных генераторов. Кроме того, искры в сжатом водороде холодные, сопровождаются легким шумом и значительно менее вредны для частей машины.

Использование сжатого газа в емкостной машине, в отличие от вакуума, возможно как при проводящем, так и при диэлектрическом роторе, однако вызывает ряд затруднений. Токосъем с проводящего ротора возможен при высоких давлениях газа, хотя работа скользящего контакта в этих условиях требует еще дополнительных исследований. Еще большее затруднение возникает при токосъеме с диэлектрического ротора, так как с возрастанием давления газа и одновременном увеличении электрической прочности становится затруднен-

ным разряд под гребенками. Кроме того, постоянный разряд под гребенками может привести к ухудшению свойств сжатого газа.

На первый взгляд может показаться, что возрастание давления газа, а следовательно, и его плотности, вызовет такое увеличение потерь на трение ротора в газе, что это резко снизит к. п. д. машины. Другими словами, при повышенном давлении газа машина должна работать при пониженных скоростях вращения, обеспечивающих достаточно высокий к. п. д., но при меньшей мощности.

Ошибочность этого положения может быть легко усмотрена из равенства (199). Если считать, что с изменением давления мы желаем сохранить к. п. д. постоянным, то из равенства (199) следует (оставляя в стороне электрические потери)

$$\frac{E}{n\sqrt{\delta}} = \text{const};$$

так как $\frac{E^2}{\delta}$ растет с давлением, то и скорость вращения

также должна возрастать. Приняв для машины, работающей в воздухе при нормальном давлении, что величина к. п. д. еще вполне приемлема при скорости вращения n_0 и считая, что рабочая напряженность поля составляет одну и ту же часть от электрической прочности при данном давлении, мы для воздуха при избыточном давлении в 40 атм (рис. 43) получим то же самое значение к. п. д. при скорости вращения

$$n = \frac{E}{E_0} \sqrt{\frac{\delta_0}{\delta}} n_0 = 4,9 n_0.$$

Существенным недостатком сжатых газов является то обстоятельство, что их электрическая прочность в гораздо большей степени, чем при нормальном давлении, зависит от характера поля, резко падая в неоднородном поле. Этим объясняется тот факт, что применение сжатого газа в емкостных машинах обычной конструкции дает увеличение мощности в несколько раз лишь при давлениях, не превышающих нескольких атмосфер. Дальнейшее повышение давления, вплоть до нескольких

десятков атмосфер, сопровождается только незначительным возрастанием мощности. Это означает, что старые конструкции емкостных машин, обладающие резко неоднородным полем из-за наличия острых краев, не дают возможности использовать высокую электрическую прочность сжатых газов. Машина, рационально сконструированная и обеспечивающая почти однородное поле во всем объеме, не только позволит с успехом применить сжатые газы, но и при нормальном давлении газа даст значительную мощность, намного превышающую мощность старых емкостных машин.

§ 24. Введение среды с большой диэлектрической проницаемостью

Третий путь увеличения мощности емкостной машины заключается в увеличении емкости статор — ротор за счет введения в машину среды с большой диэлектрической проницаемостью. Как уже указывалось, повышенная диэлектрическая проницаемость полярных жидкостей не может быть использована в емкостной машине. Даже если использование полярных жидкостей было возможным, это дало бы в лучшем случае увеличение удельной мощности лишь в несколько десятков раз; такое увеличение не вывело бы емкостные машины на широкую дорогу промышленного применения.

Предлагаемый нами способ увеличения мощности емкостной машины заключается в использовании твердых диэлектриков с весьма высокой диэлектрической проницаемостью (сегнетоэлектрики), в тысячи раз превышающей проницаемость воздуха.

Такие технически пригодные материалы были созданы в 1944—1945 гг. Вулом. Эти материалы керамические и содержат кристаллическую модификацию двуокиси титана — рутил, обуславливающий их высокую диэлектрическую проницаемость. Путем введения различных присадок (окиси бария, стронция, олова магния, циркония и т. п.) и изменения технологического процесса можно изменять свойства подобной керамики.

Все сегнетоэлектрики характеризуются зависимостью диэлектрической проницаемости от температуры и от напряженности поля; в них также наблюдается явление

диэлектрического гистерезиса. Электрическая прочность сегнетоэлектриков невелика, в однородном поле такая же, как и для воздуха. Удельное объемное сопротивление сравнительно невелико — порядка 10^{12} — 10^{13} ом·см, диэлектрические потери значительны.

Однако в процессе работы над созданием подобных материалов их электрические свойства все время улучшаются.

В настоящее время известен керамический материал [Л. 131], также состоящий из титанатов различных металлов, кроме бария. В отличие от указанных выше материалов этот диэлектрик не является сегнетоэлектриком, его диэлектрическая проницаемость не зависит от напряженности поля, в нём отсутствует диэлектрический гистерезис. Его диэлектрические свойства: относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 1000$, электрическая прочность $E_{пр} = 100$ кв/см, удельное объемное сопротивление $\rho_v = 10^{15}$ ом·см. Подобный материал больше, чем сегнетоэлектрики, подходит для использования в емкостных машинах.

Если в качестве рабочей среды в емкостной машине использовать материал с диэлектрической проницаемостью ϵ и электрической прочностью такой же, как и у воздуха, то ток и мощность машины, при том же напряжении возбуждения, возрастут в $\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ раз.

При условии, что диэлектрик будет обладать еще и большей электрической прочностью $E_{пр} > E_{0пр}$, напряжения машины и возбуждения возрастут в $\frac{E_{пр}}{E_{0пр}}$ раз,

ток — в $\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \frac{E_{пр}}{E_{0пр}}$ раз, а мощность машины — в $\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \left(\frac{E_{пр}}{E_{0пр}} \right)^2$ раз.

Так, введение материала, указанного выше ($\epsilon_r = 1000$, $E = 100$ кв/см), при условии полного использования его высокой диэлектрической проницаемости, дало бы увеличение в 11 000 раз. Интересно отметить, что для получения такого же эффекта в машине со сжатым газом необходимо довести электрическую прочность его до величины $E_{пр} = 33\,000$ кв/см. Этот пример ярко иллюстрирует преимущество введения материала с высокой диэлектрической проницаемостью в емкостную машину по сравнению со сжатым газом.

Основное затруднение в использовании диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью в качестве рабочей среды емкостной машины заключается в том, что введение твердого диэлектрика между статором и ротором емкостной машины возможно только при условии сохранения воздушного зазора, необходимого для свободного движения ротора. При этом, независимо от расположения твердого диэлектрика — на статоре и на роторе или только на статоре, пространство статор — ротор образует двухслойный конденсатор, емкость которого определяется емкостями и сопротивлениями слоев

$$C = \frac{C_0 r_0^2 + C_\varepsilon r_\varepsilon^2}{(r_0 + r_\varepsilon)^2} = C_\varepsilon \frac{1 + \frac{C_0}{C_\varepsilon} \left(\frac{r_0}{r_\varepsilon}\right)^2}{\left(1 + \frac{r_0}{r_\varepsilon}\right)^2},$$

где индекс 0 относится к воздушному зазору, индекс ε — к диэлектрику. Из этого выражения видно, что для приближения величины емкости статор — ротор к большой емкости C_ε , определяемой диэлектриком, необходимо, чтобы $r_0 = 0$, или, по крайней мере, $r_0 \ll r_\varepsilon$. В действительности же $r_0 > r_\varepsilon$ и емкость статор — ротор будет меньше емкости одного воздушного зазора.

Решением задачи являлось бы введение в воздушный зазор текучей проводящей среды. Однако этот прием технически нецелесообразен. Во-первых, введение в зазор проводящей среды потребует значительного усложнения конструкции машины с целью устранения замыкания между собой промежутков, находящихся под различными секторами. Во-вторых, наилучшей средой по своим электрическим свойствам является ртуть; однако введение ртути влечет за собой недопустимое возрастание механических потерь.

Поэтому единственным способом уничтожения воздушного промежутка является механический контакт между диэлектриком статора и ротора, когда максимальная емкость соответствует их непосредственному соприкосновению. Подобный контакт возможен как при поступательно-возвратном движении, так и при вращательном.

§ 25. Механический контакт

Поскольку соприкосновение с диэлектриком, имеющим неидеальную поверхность, происходит не по всей поверхности, возникает вопрос, насколько будет использована большая емкость, соответствующая идеальному соприкосновению по всей поверхности. Иными словами, на сколько может быть использована в реальных условиях высокая диэлектрическая проницаемость при механическом контакте.

Поэтому были произведены измерения с титанатом бария (тибаром) в качестве твердого диэлектрика; в качестве металлического электрода использовалась ртуть, латунь, алюминий, свинец.

При измерениях емкости с различными металлическими электродами тибаровая пластинка серебрилась с одной стороны, а с другой стороны приводилась в соприкосновение с металлическим электродом; при измерениях с твердым металлическим электродом последний прижимался к тибару с определенной силой.

При измерениях с ртутью в качестве второго электрода на тибаровую пластинку надевалась изоляционная манжетка, внутрь которой наливалась ртуть. Затем, для сравнения с истинной емкостью тибаровой пластины ее свободная поверхность серебрилась и опять измерялась емкость. Результаты измерений показали, что емкость в обоих случаях была одна и та же, т. е. что ртуть дает идеальный контакт с тибаром.

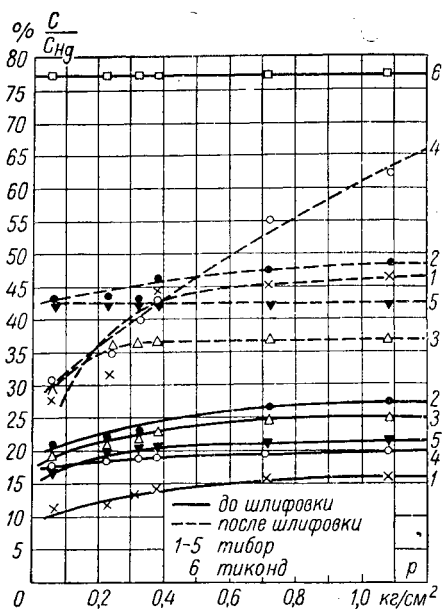


Рис. 44.

Результаты измерений с латунным электродом приведены на рис. 44; здесь по оси абсцисс отложено давление на электрод в $кг/см^2$, по оси ординат — отношение измеренной емкости с латунным электродом к емкости с ртутным электродом, выраженное в процентах. Первый раз емкость образцов тибара измерялась при сравнительно грубо обработанной поверхности, что на рис. 44 соответствует сплошной линии; второй раз после дополнительной шлифовки — пунктирные кривые (1—5).

Для сравнения приведены измерения с тикондовым образцом (кривая 6); этот образец имел более тщательно отшлифованную поверхность.

Из кривых рис. 44 видно, что емкость при контакте тибара с латуной достигает 50% от максимальной; она может быть и больше при лучшей обработке.

Кроме состояния поверхности, определяемой, помимо качества шлифовки, еще характером строения керамики, на величину емкости при механическом контакте керамики с металлом сказывается и величина диэлектрической проницаемости керамики. Действительно, чем более рыхлое, зернистое строение диэлектрика и чем больше его диэлектрическая проницаемость, тем сильнее будут сказываться на величине емкости неизбежные остатки воздуха между керамикой и металлом. Так, для тибара при его крупнозернистой структуре и $\epsilon_r \approx 1100$, относительная емкость оказалась меньше, чем для тиконда, имеющего мелкозернистое строение, и $\epsilon_r \approx 60$.

Измерения с различными металлическими электродами производились с тибаром и тикондом. Ниже указаны значения отношения емкости с данным металлом к емкости, измеренной с латунным электродом: свинец 87—100%, алюминий 83—85%; нижний предел для тибара, верхний — для тиконда.

Кроме того, был исследован механический контакт системы тибар — тибар. Образцы складывались вместе непосеребренными поверхностями, создавалось давление и измерялась емкость.

Результаты измерений при различных давлениях показали, что при механическом контакте тибаровых пластин также можно получить емкость, составляющую около 50% от максимальной.

§ 26. Емкостная машина с механическим контактом статор — ротор

Емкостная машина (биполярная и униполярная) с диэлектрическим ротором и поперечным полем реакции якоря была схематически представлена на рис. 14. Как было уже указано, такая машина принципиально не позволяет полезно использовать высокую диэлектрическую проницаемость ротора, так как емкость между элементом его поверхности (наружной) и статором определяется величиной воздушного зазора статор — ротор.

Для использования высокой диэлектрической проницаемости ротора необходимо осуществить непосредственный контакт между статором и ротором. Такая машина в цилиндрическом исполнении изображена на рис. 45, где два цилиндра S статора обкатываются по внутренней поверхности цилиндрического ротора R . Внутренние поверхности статорных цилиндров металлизированы и к ним подведено напряжение возбуждения. Длина цилиндров статора и ротора l ; радиус ротора r .

Принципиально статорные цилиндры могли бы быть целиком металлическими. Однако в процессе работы такой машины происходила бы металлизация ротора, препятствующая нормальной работе; это обстоятельство было неоднократно проверено на различных выполненных макетах.

При обкатке цилиндров статора по поверхности ротора механические потери возрастут незначительно, если линейные скорости поверхностей статора и ротора будут одинаковыми. Этого можно добиться путём соответствующей передачи от двигателя; тогда трение между статором и ротором — трение качения — будет весьма незначительно.

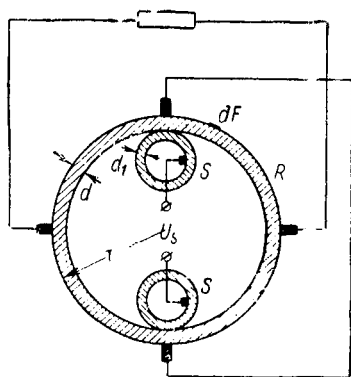


Рис. 45.

Теория такой машины не отличается, в основном, от приведенной в § 9, поэтому здесь остановимся лишь на некоторых деталях.

Емкость статор — ротор для малого элемента dF поверхности (наружной) ротора обращается в нуль при входе элемента под щетку, соединенную с нагрузкой. В момент нахождения этого элемента под одной из коротко замкнутых щеток эта емкость достигает максимума, в первом приближении равного

$$dC_m = \frac{\varepsilon dF}{d + d_1}, \quad (200)$$

где d и $d_1 \ll d$ — толщины роторного и статорного цилиндров.

Емкость рассеяния ротора

$$dC_R^S = 2 \frac{\varepsilon dF}{\pi \left(r - \frac{d}{2} \right)}. \quad (201)$$

Из выражений (200) и (201) видно, что такую машину следует выполнять так, чтобы $r \gg d$.

Максимальная емкость

$$C_m = \frac{\varepsilon \pi r l}{d + d_1}, \quad (202)$$

а индуктированный ток, согласно равенства (47)

$$I_\theta = \frac{U_S \pi \varepsilon r l n}{60 (d + d_1)}. \quad (203)$$

Возможность использования в емкостной машине с механическим контактом диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью была проверена на ряде макетов; приведем результаты, полученные на одном из них.

Макет, выполненный из тиконда Т80 с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 75$, соответствовал схеме рис. 45, но был четырехполюсным (рис. 46). В отличие от рис. 45 цилиндры статора находились не внутри, а снаружи ротора, что объяснялось малым диаметром имевшегося в нашем распоряжении цилиндра.

Ведущим цилиндром служил один из цилиндров возбуждения, ось которого была соединена изолирующей

втулкой с двигателем; все остальные цилиндры были ведомыми.

Для создания хорошего контакта между соприкасающимися поверхностями цилиндров статора и ротора оси цилиндров возбуждения имели возможность некоторого перемещения. Это достигалось тем, что шарикоподшипники осей цилиндров возбуждения свободно входили в основание; давление между цилиндрами ротора и статора создавалось пружинами, давившими на шарикоподшипник.

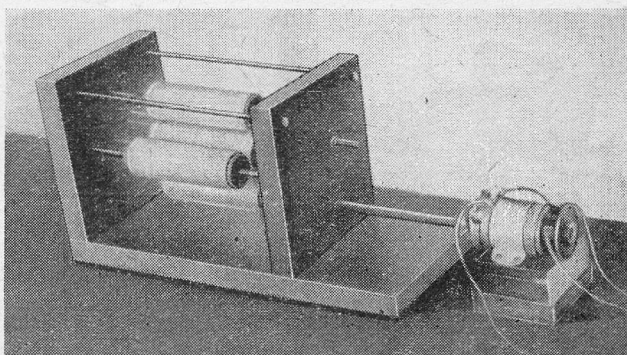


Рис. 46.

Малый диаметр цилиндра не позволял полностью использовать электрическую прочность тиконда из-за появления перекрытия. Из-за этого же пришлось ограничиться лишь измерением индуктированного тока.

Результаты измерения тока короткого замыкания в функции скорости вращения ротора при напряжении возбуждения $U_S = 25$ кв представлены на рис. 47.

Сравним полученные значения тока с рассчитанными по формуле, отличающейся от выражения (203) лишь множителем 2, соответствующему числу пар полюсов. При этом будем пренебрегать падением напряжения под щетками и принимать измеренный ток равным индуктированному. Для макета ($r = 30$ мм, $d = d_1 = 6$ мм, $l = 150$ мм, $U_S = 25$ кв, $\epsilon_r = 75$) при скорости вращения $n = 1000$ об/мин, расчетный ток $I_0 = 650$ мка. Это

значение тока соответствует полному использованию диэлектрической проницаемости.

Из графика рис. 47 при $n = 1000$ находим $I_0 = 450$ мка. Таким образом, коэффициент использования диэлектрической проницаемости тиконда, учитывающий уменьшение емкости за счет неидеального соприкосновения диэлектрика статора и ротора, составляет 69%. В статическом режиме для тиконда с относительной

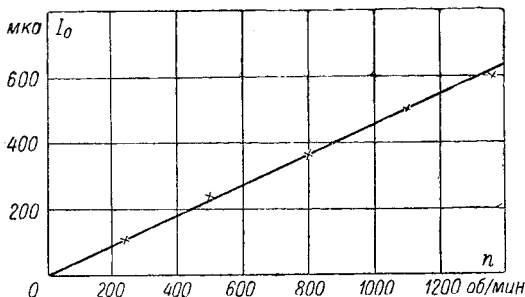


Рис. 47.

диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 60$ нами было получено значение этого коэффициента в 76% (рис. 44).

В связи с изложенным в § 12 относительно «предельной» поверхностной плотности заряда представляет интерес определить величину этой плотности в испытанном макете.

Величина индуктированного тока (47) может быть выражена через поверхностную плотность заряда σ :

$$I = \sigma F f, \quad (204)$$

где F — поверхность ротора. Эта формула выведена для двухполюсной машины; для четырехполюсной машины ток должен быть удвоен. Введя вместо частоты скорость вращения n в об/мин. получим для тикондового макета

$$I_0 = \frac{\pi \sigma r l n}{15}. \quad (205)$$

Отсюда, пользуясь графиком рис. 47, при размерах, указанных выше, найдем поверхностную плотность заряда на тиконде $\sigma = 480$ мкк/м², что в 18 раз превышает

«предельную» поверхностную плотность заряда при нормальном давлении (§ 12).

Таким образом, экспериментально подтверждается ошибочность определения предела для поверхностной плотности заряда.

§ 27. Перспективы создания мощных емкостных машин

Изложенное в предыдущих главах позволяет критически оценить перспективы создания мощных емкостных машин постоянного тока высокого напряжения.

Одно из основных затруднений в конструировании емкостной машины высокого напряжения заключается в необходимости изоляции отдельных частей машины, что трудно выполнимо из-за относительно малой поверхностной электрической прочности любых диэлектриков.

Как известно, поверхностная электрическая прочность диэлектрика слабо зависит от электрической прочности окружающей среды и определяется главным образом состоянием поверхности и характером поля. Загрязнение поверхности, особенно наличие влаги, резко снижает поверхностную электрическую прочность. Последняя также уменьшается, когда, кроме касательной составляющей напряженности поля, имеется еще нормальная составляющая. Величина поверхностной электрической прочности даже в атмосфере сжатого газа не превышает 30 кВ/см и значительно меньше объемной электрической прочности, достигающей нескольких сотен кВ/см .

Рассмотрим машины с проводящим и диэлектрическим ротором, работающие в атмосфере сжатого газа. В § 12 было показано, что принципиальной разницы между такими машинами нет. Как более совершенные, рассматриваются машины с поперечным полем реакции якоря.

В дисковом выполнении из-за необходимости изоляции отдельных элементов диска, находящихся под высоким напряжением, полезной площадью является часть диска, заключенная между окружностями радиуса r (радиус диска) и радиуса $\rho < r$. Величина ρ определяется напряжением машины и может быть приближенно най-

дена из условия максимума мощности машины. Ток машины пропорционален полезной площади

$$I \sim \pi (r^2 - \rho^2), \quad (206)$$

а напряжение пропорционально диаметру неиспользуемой части диска, т. е.

$$U \sim 2\rho. \quad (207)$$

Мощность машины из (206) и (207)

$$P \sim (r^2 - \rho^2) \rho. \quad (208)$$

Определяя максимум выражения (208), найдем

$$\rho_{\text{макс}} = \frac{r}{\sqrt{3}}. \quad (209)$$

Таким образом, в дисковом роторе не используется $1/3$ площади роторного диска.

В машине с проводящим ротором полезная площадь еще меньше за счет изоляционных промежутков между соседними секторами; это уменьшение может быть даже больше, чем в два раза. Таким образом, из-за малой поверхностной электрической прочности, в машине с проводящим ротором полезно используется не более $1/6$ площади диска. Это приводит к основному недостатку емкостных машин — весьма большому объему.

Трудности изоляции внутри машины могут быть преодолены путем уменьшения используемой площади диска и размещения разнополярных секторов ротора и статора в двух отдельных «полумашинах», как это схематически изображено на рис. 48 для четырехполюсной машины. На этом рисунке указано лишь по одному диску в каждой «полумашине»; в действительности, в каждой из них должно быть ω дисков, повернутых друг относительно друга на угол $\frac{\pi}{p\omega}$ (§ 8) (p — число пар полюсов). Обе «полумшины» могут быть размещены и на одном валу, в конструктивном отношении представляя собой одну машину.

Единственный недостаток машины с разнесенными разнополярными секторами — удвоение числа дисков при той же мощности — с избытком перекрывается ее преимуществами.

Первым из них является возможность полезно использовать больше, чем $\frac{1}{6}$ площади диска.

Второе преимущество — изоляция ротора от вала электрически нагружена, в основном, по объему и, в соответствии с большой объемной прочностью, занимает малый объем.

Третье преимущество заключается в том, что роторный диск представляет собой сплошное металлическое тело симметричной формы. Его легко сбалансировать и довести максимальную линейную скорость до 180 м/сек.

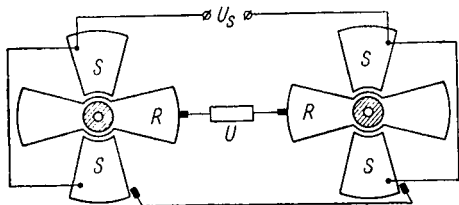


Рис. 48.

Таким образом, разнесение разнополярных секторов ротора и статора в две «полумашины» облегчает изоляцию, упрощает изготовление роторных и статорных дисков, увеличивает механическую прочность роторных дисков, допускает работу на высокой скорости вращения и резко уменьшает объем всей машины.

В такой машине будут ничтожные (при большом числе дисков) пульсации (§ 8) и малые напряжения между соседними дисками. Изоляция между соседними дисками на такое напряжение не представляет затруднений.

Подобная машина может быть выполнена на большие мощности и основным вопросом, требующим экспериментального исследования, является токоъем в атмосфере сжатого газа. При большом числе дисков весь ток машины распределяется между многими щетками; на каждую из них приходится относительно малый ток, что облегчает работу щетки.

Машины с диэлектрическим ротором обычно выполняются в цилиндрическом варианте, значительно упрощающем изоляцию. Недостатком такой машины является несколько худшее использование объема — внутренняя

полость ротора полезно не используется. Такие машины выпускаются фирмой SAMEС (Société Anonyme des Machines Electrostatiques) по разработке Гартнера и Феличи. Принципиальная схема этих машин соответствует рис. 14. б. В этих машинах, работающих в сжатом водороде, благодаря высококачественным материалам, равномерному распределению поля в зазоре с помощью полупроводящего статора, удалось достигнуть результатов, позволяющих говорить уже о промышленном применении емкостных машин. Так, по последним данным Феличи [Л. 118, 133], поверхностная плотность достигает $\sigma = 300 \text{ мкк/м}^2$, что при касательной составляющей напряженности поля $E_t = 20 \text{ кв/см}$ и линейной скорости $v = 50 \text{ м/сек}$ дает плотность мощности $\frac{P}{F} = 30 \text{ квт/м}^2$.

В дальнейшем эта величина существенно не увеличится, так как скорость вращения ограничена прочностью ротора, а плотность заряда не может превышать $\sigma_{\text{макс}}$ (§ 12). Для сравнения Феличи приводит значение плотности мощности современного турбогенератора при той же скорости: $\frac{P}{F} = 2500 \text{ квт/м}^2$. Поскольку турбогенератор является машиной переменного тока низкого напряжения, а емкостная машина — постоянного тока высокого напряжения, то последняя представляет технический интерес даже при таком соотношении плотности мощности.

Машина с диэлектрическим ротором с высокой диэлектрической проницаемостью, выполненная по схеме рис. 45, обладает несравненно более высокими показателями. При $\epsilon_r = 1000$ и допустимой напряженности поля в роторе $E_n = 70 \text{ кв/см}$, получим $\sigma = \epsilon E_n = 60 \text{ мкк/м}^2$. Но высокая диэлектрическая проницаемость используется только на 50% (§ 25); а касательная составляющая у поверхности диэлектрика уменьшается с ростом диэлектрической проницаемости. Поэтому для машины, работающей при том же давлении водорода и той же скорости, примем $\sigma = 30 \text{ мкк/м}^2$ и $E_t = 15 \text{ км/см}$, что даст $\frac{P}{F} = 2250 \text{ квт/м}^2$, т. е. почти равную значению для индуктивной машины.

Приведенные результаты будут справедливы при ма-

лом сопротивлению под щетками. В противном случае, элемент ротора не успеет зарядиться до полного напряжения возбуждения (§ 22) и ожидаемого эффекта не получится.

Для решения этой задачи могут быть использованы щетки в виде тонкой проволоки или тонкого лезвия, когда у острого края создается интенсивная ионизация.

Другим приемом является покрытие щетки радиоактивным составом, создающим интенсивную ионизацию под щеткой; ионизатор должен давать α -частицы с малой длиной пробега.

Наконец, третьим путем является помещение металлических электродов на внешней поверхности ротора (рис. 45), связанное с некоторым уменьшением полезной поверхности ротора.

Основным затруднением при создании мощной емкостной машины с диэлектрическим ротором, особенно из материалов с высокой проницаемостью, является его изготовление и обработка. В настоящее время подобные материалы допускают лишь изготовление сравнительно небольших деталей. Нет сомнения, что со временем технология изготовления крупных изделий будет освоена и тогда станет возможным осуществление мощной емкостной машины с диэлектриком высокой проницаемости.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАБОТЫ ЕМКОСТНОЙ МАШИНЫ

§ 28. Регулирование емкостной машины

Регулирование тока (напряжения) машины может производиться двумя способами — изменением скорости вращения и напряжения возбуждения. Первый способ ничем не отличается от общеизвестного для индуктивных машин и поэтому здесь не рассматривается.

Второй способ для емкостных машин имеет свои особенности, на которых мы и остановимся.

Если мощная емкостная машина имеет независимое возбуждение, то в качестве источника высокого напря-

жения возбуждения может быть использован или выпрямитель (при наличии сети переменного тока) или специальная емкостная машина — возбудитель; мощность возбудителя, малая по сравнению с мощностью основной машины, идет лишь на покрытие потерь ее цепи возбуждения.

При использовании в качестве возбудителя выпрямителя, регулирование может производиться путем изменения напряжения на первичной обмотке трансформатора, например, с помощью потенциал-регулятора, работающего автоматически от напряжения (тока) основной машины.

Более простым представляется использование в качестве возбудителя маломощной емкостной машины постоянного тока. Такой возбудитель может быть выполнен в виде машины с параллельным возбуждением. Регулирование напряжения такого возбудителя возможно двумя путями.

Первый из них заключается в том, что возбудитель приводится в движение отдельным маломощным двигателем постоянного тока. Скорость вращения двигателя, определяющая величину напряжения, даваемого возбудителем, изменяется автоматически в зависимости от величины напряжения (тока) основной машины.

Другой путь регулирования напряжения возбудителя предполагает, что возбудитель расположен на одном валу с мощной машиной. В этом случае изменение напряжения возбудителя может осуществляться путем изменения утечки цепи возбуждения главного генератора. Для этого параллельно цепи возбуждения подключено коронирующее устройство, например, в виде цилиндрического воздушного конденсатора с регулируемой глубиной погружения внутреннего цилиндра, снабженного коронирующими остриями, во внешний. Глубина погружения, увеличение которой понижает напряжение возбуждения, автоматически регулируется напряжением (током) мощной машины.

Мощность возбудителя должна быть настолько малой, чтобы работа его на утечку цепи возбуждения мощной машины соответствовала режиму, достаточно далекому от режима холостого хода. В противном случае изменение скорости вращения или проводимости на-

грузки будет мало сказываться на величине напряжения возбудителя (гл. IV).

Если машина меньшей мощности и не требует отдельного возбудителя, то при любом виде самовозбуждения (параллельном или последовательном) регулирование может производиться включением переменной утечки параллельно цепи возбуждения [Л. 102], как это было указано выше для возбудителя.

Независимое возбуждение необходимо не только для мощных машин, но и для униполярных машин, не могущих работать с самовозбуждением (гл. III).

Так же, как и для индуктивной машины, для регулирования напряжения (тока) емкостной машины используются электронные схемы [Л. 84, 105, 118, 133], воздействующие на напряжение возбуждения.

§ 29. Работа емкостной машины на емкостную нагрузку

Как уже указывалось во введении, применение емкостной машины постоянного тока целесообразно для зарядки конденсатора в импульсных схемах, для испытания высоковольтной аппаратуры — изоляторов, кабелей и т. п. Поэтому представляет интерес рассмотрение работы такой машины на зарядку конденсатора.

В дальнейшем предполагается, что время переходных процессов в цепи нагрузки значительно превышает время переходных процессов в самой машине; это позволяет пользоваться ее статической внешней характеристикой.

а) Независимое возбуждение [Л. 99]

Как первое приближение примем утечку машины постоянной. Схема включения представлена на рис. 49; здесь I_0 и g_i — элементы эквивалентной схемы машины, а g — проводимость утечки конденсатора. Машина сначала замкнута накоротко и отсчет времени ведется с момента размыкания ключа.

Уравнение внешней характеристики (113) и (114)

$$i = I_0 - ug_i, \quad I_0 = AnU_s = \text{const.}$$

Дифференциальное уравнение схемы рис. 49

$$C \frac{du}{dt} + (g + g_i)u = I_0 \quad (210)$$

имеет решение, при начальном условии $u_{t=0} = 0$,

$$u = \frac{I_0}{g + g_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad \text{где } \tau = \frac{C}{g + g_i}. \quad (211)$$

Ток конденсатора (включая и утечку)

$$i = \frac{I_0}{g + g_i} \left(g_i + g \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (212)$$

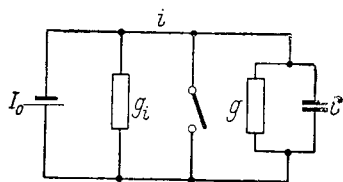


Рис. 49.

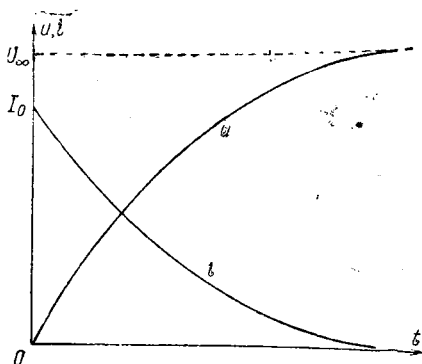


Рис. 50.

Напряжение, до которого зарядится конденсатор

$$U_{\infty} = \frac{I_0}{g + g_i} = U_{xx} \frac{g_i}{g + g_i} \quad (213)$$

меньше напряжения холостого хода.

Однако при $g_i > g$ это напряжение будет близким к напряжению холостого хода и потому может оказаться недопустимым для машины. Зарядку конденсатора емкостной машиной следует производить так, чтобы напряжение холостого хода значительно превышало напряжение, до которого необходимо зарядить конденсатор; по достижении необходимого напряжения конденсатор от-

ключается, а машина замыкается накоротко. Таким образом, зарядка конденсатора совершается на прямолинейной части характеристики, до ее загиба (§ 17). Этой части характеристики соответствует наше допущение о постоянстве проводимости утечки машины.

На рис. 50 представлены кривые тока и напряжения машины (конденсатора). Из этих кривых видно, что для машины включение на емкость проходит благополучно; ток от значения I_0 , имевшегося при коротком замыкании, постепенно уменьшается, напряжение от нуля плавно возрастает.

б) Параллельное возбуждение

Как и в предыдущем случае, примем, что зарядка конденсатора совершается на прямолинейной части характеристики, т. е. при $g_i = \text{const}$. При этом следует помнить, что машина с параллельным возбуждением не может работать в режиме короткого замыкания, с кото-

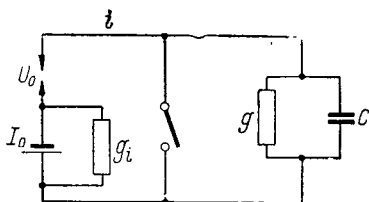


Рис. 51.

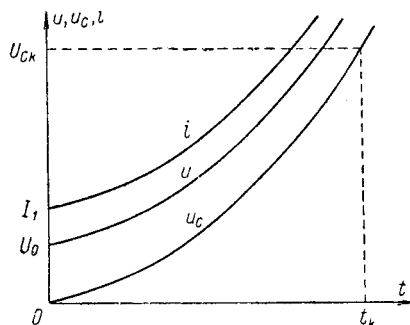


Рис. 52.

рого начинается зарядка конденсатора. Однако если ток с ротора совершается через искровой промежуток, то машина может работать и при коротком замыкании ее полюсов. При этом напряжение на роторе U_0 теряется на искровых промежутках под щетками. Именно этот случай, изображенный на рис. 51, мы и рассмотрим, причем, как первое приближение, примем, что $U_0 = \text{const}$.

Уравнение характеристики машины (§ 18)

$$i = Anu - g_i u = (An - g_i) u.$$

Учитывая, что $u_c = u - U_0$, получим дифференциальное уравнение

$$C \frac{du}{dt} - (An - g_i - g)u = U_0 g. \quad (214)$$

Решение этого уравнения будет различным, в зависимости от соотношения между параметрами машины $An - g_i$ и конденсатора g , т. е. от знака $An - g_i - g$. Рассмотрим оба случая.

1) $An - g_i > g$. Этот случай соответствует зарядке конденсатора машиной большой мощности.

При начальном условии $u_{t=0} = U_0$ решение уравнения (214)

$$u = \frac{U_0}{An - g_i - g} \left[(An - g_i) e^{\frac{t}{\tau}} - g \right], \text{ где } \tau = \frac{C}{An - g_i - g}. \quad (215)$$

Ток машины от начального значения $I_1 = U_0(An - g_i)$ растет по кривой

$$i = U_0 \frac{An - g_i}{An - g_i - g} \left[(An - g_i) e^{\frac{t}{\tau}} - g \right], \quad (216)$$

а напряжение на конденсаторе

$$u_c = U_0 \frac{An - g_i}{An - g_i - g} \left(e^{\frac{t}{\tau}} - 1 \right). \quad (217)$$

Графики тока и напряжений машины и конденсатора представлены на рис. 52. Из этих графиков видно, что процесс зарядки конденсатора машиной с параллельным возбуждением протекает совершенно плавно, без всяких скачков тока или напряжения, вплоть до U_{ck} , до которого должен быть заряжен конденсатор. Время зарядки до этого напряжения резко уменьшается по сравнению с зарядкой машиной независимого возбуждения. По достижении напряжения U_{ck} конденсатор отключается, а машина замыкается накоротко.

2) $An - g_i < g$. С таким случаем мы встречаемся при зарядке конденсатора емкостной машиной очень малой мощности. Естественно, что в таком случае зарядка будет происходить очень медленно. Тем не ме-

нее при отсутствии необходимости быстрой зарядки конденсатора этот случай представляет практический интерес.

Решение уравнения (214) при том же начальном условии теперь примет вид

$$u = \frac{U_0}{g + g_i - An} \left[g - (An - g_i) e^{-\frac{t}{\tau}} \right],$$

где $\tau = \frac{C}{g + g_i - An}$.

(218)

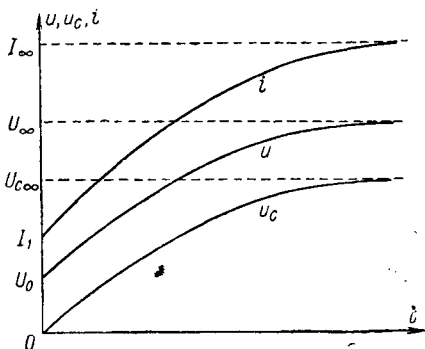


Рис. 53.

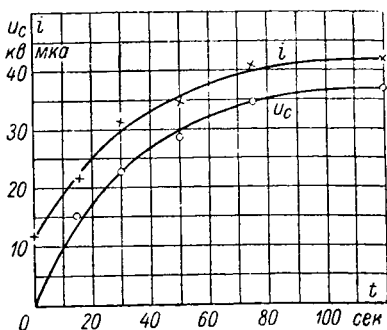


Рис. 54.

Ток машины

$$i = U_0 \frac{An - g_i}{g + g_i - An} \left[g - (An - g_i) e^{-\frac{t}{\tau}} \right],$$
(219)

а напряжение на конденсаторе

$$u_c = U_0 \frac{An - g_i}{g + g_i - An} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$
(220)

Конденсатор зарядится только до напряжения

$$U_{c\infty} = U_0 \frac{An - g_i}{g + g_i - An},$$
(221)

что соответствует напряжению машины

$$U_{\infty} = U_0 \frac{g}{g + g_i - An}.$$
(222)

Величина предельного напряжения определяется тем, что весь ток машины идет на покрытие утечки конден-

сатора. Значение тока, соответствующего предельному напряжению U_{∞} ,

$$I_{\infty} = U_0 (An - g_i) \frac{g}{g + g_i - An}. \quad (223)$$

На рис. 53 представлены ток и напряжение машины и конденсатора в функции времени. И в этом случае ток и напряжение плавно изменяются от своих начальных значений.

Приведенный расчет был проверен на опыте. В качестве маломощной машины с параллельным возбуждением использовалась та же машина Уимшерста, что и выше (§ 18). Этой машиной заряжался конденсатор емкостью $C = 0,01$ мкф с рабочим напряжением 80 кв.

Результаты измерений приведены на рис. 54, где крестиками и точками обозначены данные опыта, а сплошные кривые соответствуют расчету по формулам (219) и (220). Совпадение расчета с данными опыта вполне удовлетворительное.

§ 30. Работа емкостной машины на индуктивную нагрузку

Рассмотрим работу емкостной машины на цепь с индуктивностью, по-прежнему принимая $g_i = \text{const}$.

а) Независимое возбуждение [Л. 99]

Схема включения представлена на рис. 55; порядок включения остается прежним. Сочетая уравнение

внешней характеристики $i = I_0 - ug_i$ с равенством

$u = ri + L \frac{di}{dt}$, получим дифференциальное уравнение

$$g_i L \frac{di}{dt} + (1 + rg_i) i = I_0. \quad (224)$$

При начальном условии $i_{t=0} = 0$ решением уравнения (224) будет

$$i = \frac{I_0}{1 + rg_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad \text{где } \tau = \frac{Lg_i}{1 + rg_i}. \quad (225)$$

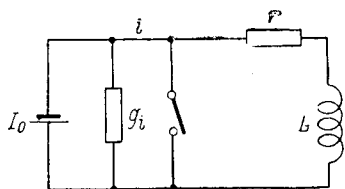


Рис. 55.

$$u = \frac{I_0 r}{1 + r g_i} \left(1 + \frac{1}{r g_i} e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (226)$$

Ток в индуктивности плавно возрастает от нуля до

$$I_\infty = \frac{I_0}{1 + r g_i}. \quad (227)$$

Ток машины в начальный момент скачком изменяется от I_0 до 0, а напряжение

$$u_{t=0} = \frac{I_0}{g_i} = U_{xx} \quad (228)$$

скачком возрастает от нуля до напряжения холостого хода; установившееся напряжение

$$U_\infty = \frac{I_0 r}{1 + r g_i}. \quad (229)$$

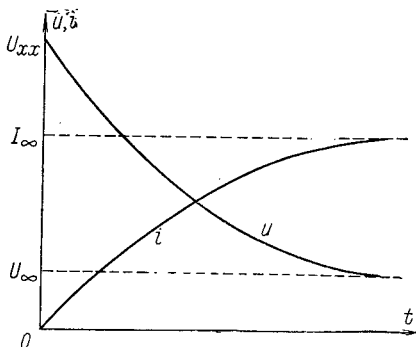


Рис. 56.

На рис. 56 представлены ток и напряжение в функции времени.

Скачок напряжения недопустим для машины и при включении индуктивной нагрузки необходимо принимать специальные меры. Наиболее целесообразной мерой защиты машины является замена ключа короткого замыкания, размыкающего цепь мгновенно, сопротивлением, постепенно возрастающим от нуля до некоторой величины и затем уже разрываемым.

Кроме того, скачкообразный переход к режиму холостого хода, при котором вся мощность, развиваемая машиной, расходуется в ее внутренней утечке, вызовет удар в системе емкостная машина — двигатель.

б) Параллельное возбуждение

В отличие от машины с независимым возбуждением машина с параллельным возбуждением с той же оговоркой относительно U_0 , как и выше, не может работать

в режиме холостого хода. Поэтому схема включения такой машины на цепь с индуктивностью должна отличаться от схемы рис. 55, так как там в момент размыкания из-за появления э. д. с. самоиндукции, машина оказывается в режиме

холостого хода. Во избежание этого параллельно машине включим проводимость g , как это показано на рис. 57. Из равенств

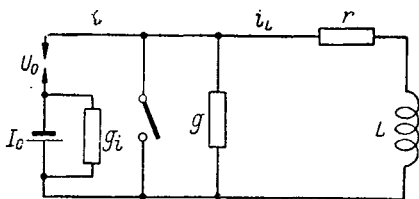


Рис. 57.

и

$$\left. \begin{aligned} i &= (An - g_i) u = (u - U_0) g + i_L \\ u &= L \frac{di_L}{dt} + r i_L + U_0, \end{aligned} \right\} \quad (230)$$

найдем уравнение для определения напряжения машины:

$$\begin{aligned} L(An - g_i - g) \frac{du}{dt} + [(An - g_i - g)r - 1]u + \\ + U_0(1 + rg) = 0. \end{aligned} \quad (231)$$

Из начального условия — при $t = 0$, $i_L = 0$ — и из равенства (230) получается выражение для напряжения машины в начальный момент:

$$u_{t=0} = -U_0 \frac{g}{An - g_i - g}. \quad (232)$$

В зависимости от соотношения между параметрами машины $An - g_i$ и проводимостью g рассмотрим два случая.

1) $An - g_i > g$. В этом случае решение уравнения (231) дает

$$u = \frac{U_0}{(An - g_i - g)r - 1} \left[\frac{An - g_i}{An - g_i - g} e^{-\frac{t}{\tau}} - (1 + rg) \right], \quad (233)$$

где

$$\tau = \frac{L(An - g_i - g)}{(An - g_i - g)r - 1}.$$

Из равенств (232) и (233) видно, что с момента включения на индуктивность машина изменяет свою полярность, напряжение скачком изменяется до величины

$$U_1 = -U_0 \frac{g}{An - g_i - g}, \quad (234)$$

и затем плавно растет, не изменяя знака до значения

$$U_\infty = -U_0 \frac{1 + rg}{(An - g_i - g)r - 1}, \quad (235)$$

как это представлено на рис. 58 (кривая 1). Этот случай соответствует $(An - g_i - g)r > 1$.

Если $(An - g_i - g)r < 1$, то

$$u = \frac{U_0}{1 - (An - g_i - g)r} \left[\frac{An - g_i}{An - g_i - g} e^{\frac{t}{\tau}} - (1 + rg) \right], \quad (236)$$

что соответствует кривой 2 на рис. 58.

2) $An - g_i < g$. В этом случае машина не изменяет своей полярности и от значения в начальный момент

$$u_{t=0} = U_0 \frac{g}{g + g_i - An} \quad (237)$$

напряжение плавно изменяется по кривой, определяемой выражением

$$u = \frac{U_0}{1 + (g + g_i - An)r} \left[(1 + rg) + \frac{An - g_i}{g + g_i - An} e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (238)$$

где

$$\tau = \frac{L(g + g_i - An)}{1 + (g + g_i - An)r},$$

до значения

$$U_{\infty} = U_0 \frac{1 + rg}{1 + (g + g_i - An)r}. \quad (239)$$

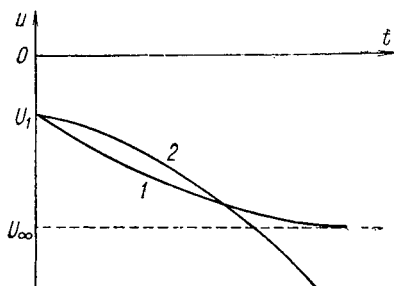


Рис. 58.

Ток машины

$$i = U_0 \frac{An - g_i}{1 + (g + g_i - An)r} \left[(1 + rg) + \frac{An - g_i}{g + g_i - An} e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (240)$$

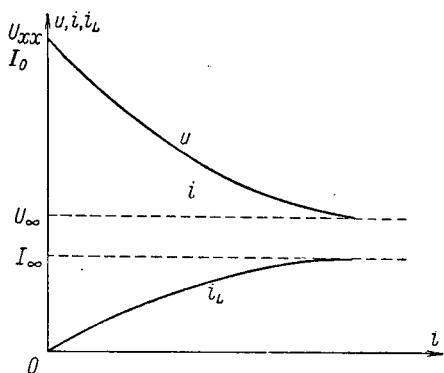


Рис. 59.

изменяется в пределах от

$$i_{t=0} = U_0 \frac{(An - g_i)g}{g + g_i - An} \quad (241)$$

до

$$I_{\infty} = U_0 \frac{(An - g_i)(1 + rg)}{1 + (g + g_i - An)r}. \quad (242)$$

Ток в индуктивности

$$i_L = U_0 \frac{An - g_i}{1 + (g + g_i - An)r} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (243)$$

и его установившееся значение

$$I_{L\infty} = U_0 \frac{An - g_i}{1 + (g + g_i - An)r} \quad (244)$$

На рис. 59 представлены кривые напряжения и тока машины и тока в индуктивности в функции времени.

Из изложенного вытекает, что во избежание изменения полярности машины с параллельным возбуждением включение ее на индуктивную нагрузку следует производить не размыканием ключа, а постепенным увеличением (от нуля) сопротивления, шунтирующего машину.

§ 31. О питании емкостной машиной нескольких приемников

Сопоставление характеристик емкостных машин с характеристиками индуктивных машин дает возможность оценить емкостные машины, по крайней мере, качественно, с точки зрения возможности использования емкостных машин в обычных (для индуктивных машин) схемах. Покажем это на примере емкостного генератора с независимым возбуждением.

На рис. 60 представлены внешние характеристики индуктивного (рис. 60, а) и емкостного (рис. 60, б) генераторов при постоянных скорости вращения и напряжении возбуждения; сплошной линией показана рабочая часть характеристик. Для индуктивного генератора рабочая часть характеристики лежит вблизи режима холостого хода; номинальное напряжение генератора близко к напряжению холостого хода, номинальный ток, составляет малую часть тока короткого замыкания. Наоборот, рабочая часть характеристики емкостного генератора лежит вблизи режима короткого замыкания; номинальный ток близок к значению тока короткого замыкания, номинальное напряжение в несколько раз меньше напряжения холостого хода.

Таким образом, с точки зрения внешней характеристики, различие между емкостной и индуктивной машиной сводится лишь к крутизне характеристики — индук-

тивная машина работает в пологой части характеристики, емкостная — на части характеристики с большой крутизной. Это означает, что одно и то же изменение тока приемника, в случае питания индуктивной машиной, вызовет незначительное изменение напряжения; при питании емкостной машиной это вызовет резкое изменение напряжения.

В связи с этим возникает вопрос о том, какие приемники могут питаться от емкостной машины и каково

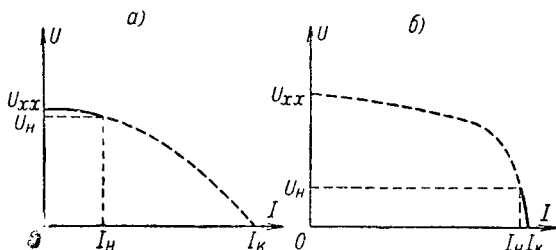


Рис. 60.

должно быть соединение этих приемников. Так, Каплянский [Л. 77] указывает, что емкостная машина требует приемников, рассчитанных на работу при неизменном токе — например, емкостных двигателей.

При последовательном соединении одинаковых двигателей, рассчитанных на номинальный ток машины и на напряжение, в несколько раз меньше номинального напряжения, преимуществом является практическое постоянство тока двигателя, при изменяющемся с нагрузкой двигателя напряжении на нем. Строго говоря, изменение нагрузки одного двигателя все же скажется на остальных, так как в действительности ток несколько изменится. При этом емкостная машина должна регулироваться на неизменную силу тока.

Недостатком этого способа соединения является необходимость изоляции двигателя от земли на напряжение, в несколько раз превышающее его номинальное напряжение.

Однако возможно и параллельное соединение емкостных двигателей, номинальное напряжение которых должно равняться номинальному напряжению машины,

а номинальный ток в несколько раз меньше номинального тока машины. Здесь изменение нагрузки одного двигателя будет сказываться на остальных двигателях в большей степени, чем при последовательном соединении. При таком соединении емкостная машина должна иметь регулировку на неизменное значение напряжения.

Недостатком этого метода является в силу крутизны внешней характеристики трудность поддержания неизменного напряжения машины, тогда как поддержание неизменного тока представляется более простой задачей.

Круто падающая внешняя характеристика емкостного генератора (рис. 60, б) оказалась чрезвычайно удобной при питании им нескольких параллельно соединенных распылителей для окраски изделий в электрическом поле. Незначительное увеличение тока — от номинального значения до значения при коротком замыкании — при резком уменьшении напряжения, обеспечило полную взрывобезопасность подобных установок, отсутствовавшую при использовании выпрямителей высокого напряжения.

Маломощные емкостные машины при питании ими нагрузок, требующих постоянства напряжения, должны выполняться так, чтобы они могли работать в режимах, близких к режиму холостого хода. При этом машина будет работать в пологой части внешней характеристики (рис. 60, б), т. е. так же, как и индуктивная.

Для стабилизации напряжения емкостной машины также используют электронные схемы [Л. 84, 105, 118, 133], обеспечивающие постоянство напряжения с точностью до сотых долей процента.

Более мощные емкостные машины должны работать на круто падающей части характеристики, соответствующей высокому значению к. п. д. (гл. IV).

Работа таких машин на зарядку конденсаторов должна происходить при параллельном соединении отдельных конденсаторов, как это следует из § 27. Чем круче падает внешняя характеристика $U(I)$, тем меньше время зарядки конденсаторов до требуемого напряжения.

Работа мощных емкостных машин постоянного тока высокого напряжения в схемах, требующих постоянства напряжения, может оказаться целесообразной при усло-

вии, что несмотря на необходимость более глубокого регулирования, емкостные генераторы будут экономически выгоднее, чем совокупность индуктивного генератора переменного тока, повышающего трансформатора и выпрямительного устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная нами теория емкостных машин постоянного тока высокого напряжения, общая для машин с диэлектрическим и проводящим ротором, позволила сделать ряд выводов о характеристиках генераторов и двигателей, конструкции и области применения этих машин.

Машина с диэлектрическим ротором, обладая скрытой коммутацией, имеет преимущество отсутствия пульсаций тока (напряжения). Недостатком диэлектрического ротора является токосъем через разрядный промежуток, к тому же требующий электрода (щетki), размеры которого определяются рабочей частью поверхности ротора. Большое сопротивление разрядного промежутка препятствует увеличению мощности машины при использовании диэлектрического ротора из материала высокой проницаемости.

В машине с проводящим ротором токосъем осуществляется щеткой, имеющей незначительную поверхность соприкосновения с ротором. Недостатками проводящего ротора являются пульсации тока (напряжения) и некоторое уменьшение полезной площади ротора из-за изоляционных промежутков между отдельными секторами.

Сравнение биполярных и униполярных машин показало преимущества первых — большие значения тока, напряжения и мощности при том же объеме машины.

Показано, что емкостные машины должны выполняться в виде машин с поперечным полем реакции якоря, позволяющих получить напряжения значительно большие напряжения возбуждения и пологую характеристику зависимости тока от напряжения машины при неизменном напряжении возбуждения.

Уменьшение пульсации в машинах с проводящим ротором может быть достигнуто путем выполнения их многодисковыми, с дисками, повернутыми друг относительно друга на малый угол.

Затруднения в изоляции отдельных секторов проводящего ротора и в креплении их на валу машины, могут быть преодолены путем разнесения разнополярных секторов ротора и статора в две полумашин. Это разнесение, наряду с облегчением изоляции, увеличивает механическую прочность машины и позволяет увеличить скорость вращения.

В емкостной машине, работающей в среде с повышенной электрической прочностью и малыми потерями на трение, может быть получена значительная удельная мощность; такой средой может быть вакуум или водород под давлением в несколько десятков атмосфер.

Выполнение емкостных машин малой мощности наиболее целесообразно с диэлектрическим ротором цилиндрического типа, работающим в сжатом водороде. Машины средней мощности в настоящее время целесообразно выполнять с проводящим многодисковым ротором в виде двух «полумашин», работающих также в сжатом водороде. После освоения технологии изготовления больших деталей из материалов с высокой диэлектрической проницаемостью целесообразно будет перейти к созданию машин средней мощности с диэлектрическим ротором.

Анализ емкостных машин показал также, что создание мощных машин достаточно большой удельной мощности и с высоким значением к. п. д. вполне осуществимо при современном уровне техники. Такая машина по весу и объему будет выгодней установки, содержащей, помимо источника переменного напряжения, повышающий трансформатор и систему вентиляей.

Основными задачами, подлежащими дальнейшему исследованию и разрешению, являются разработка деталей конструкции емкостных машин и исследование токосъема в атмосфере сжатого водорода.

Нет сомнения, что совместная работа исследователей и конструкторов приведет к улучшению маломощных машин и к созданию емкостных машин постоянного тока высокого напряжения средней и большой мощности.

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Учет нелинейности диэлектрика

В аналитической теории емкостной машины (гл. II), исходя из постоянства диэлектрической проницаемости, к зарядам (потокам вектора смещения) применялся принцип наложения. При нелинейности диэлектрика приходится отказаться от аналитической теории, заменив ее графическим рассмотрением. При этом принцип наложения может применяться только к напряженности поля (или, что то же, к напряжению), но не к заряду (а следовательно, току).

Как известно, диэлектрическая проницаемость нелинейного диэлектрика ϵ зависит от напряженности поля E (рис. П-1).

Основной кривой для графического рассмотрения является кривая индуктированного тока машины в функции напряжения возбуждения. Эта кривая (нижняя кривая на рис. П-2) легко может быть получена из кривой (рис. П-1), так как, согласно формулам (28) и (47), индуктированный ток

$$I_0 = k\epsilon U_S,$$

где k — коэффициент пропорциональности, а напряжение возбуждения U_S (при $U=0$) пропорционально напряженности поля.

При нагрузке машины ее индуктированный ток уже не будет совпадать с током короткого замыкания. Напряженность поля будет определяться теперь напряжениями U_S и U . Соответственно этому величина диэлектрической проницаемости изменится от ϵ_{U_S} при коротком замыкании до ϵ_{U_S+U} при нагрузке.

Таким образом, индуктированный ток будет равен: при коротком замыкании ($U=0$)

$$I_0 = k\epsilon_{U_S} U_S,$$

при нагрузке

$$I'_0 = k\epsilon_{U_S+U} U_S > I_0.$$

Кривая индуктированного тока I'_0 будет лежать выше кривой тока короткого замыкания, как это изображено на рис. П-2; эта кривая соответствует кривой тока короткого замыкания, для кото-

рой начало координат смещено на величину U в сторону отрицательных напряжений. Чем больше напряжение машины, тем выше лежит кривая индуцированного тока.

Величина индуцированного тока I'_0 не имеет физического смысла, являясь чисто расчетной величиной. Физический смысл имеет лишь ток машины I при напряжении U , определяемый равенством (54), как разность индуцированного тока и тока утечки ротора

$$I = I'_0 - U g_R.$$

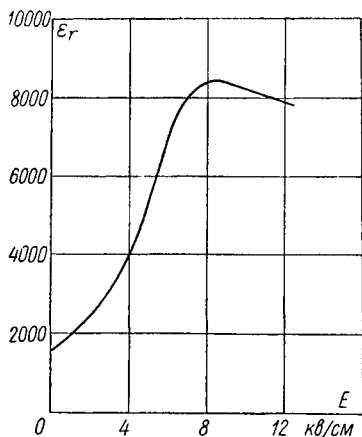


Рис. П-1.

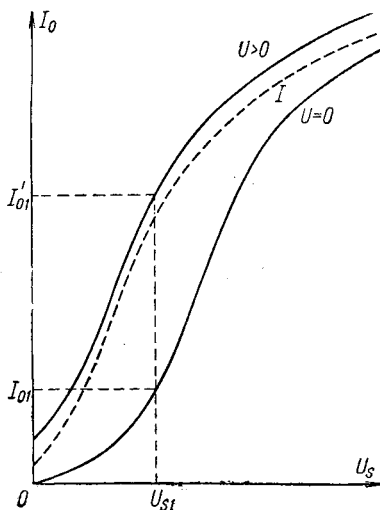


Рис. П-2.

На рис. П-2 кривая тока I в функции напряжения возбуждения U_S при неизменном напряжении машины U нанесена пунктирной линией. Как видно из рис. П-2, ток машины с нелинейным диэлектриком может быть больше тока короткого замыкания.

Проведенное графическое рассмотрение машины с нелинейным диэлектриком показывает, что при расчете такой машины необходимо выбирать номинальное напряжение машины и напряжение возбуждения так, чтобы сумма соответствовала круто поднимающейся части кривой $\epsilon(E)$ (рис. П-1) вблизи максимума диэлектрической проницаемости (конечно, с учетом запаса электрической прочности).

Ток и мощность машины при номинальном напряжении следует вычислять по формулам, выведенным в гл. II, но при значении диэлектрической проницаемости, соответствующей сумме напряжений возбуждения и номинального напряжения машины.

2. Расчет формы ротора по заданному закону изменения емкости статор — ротор

При круговых дисках ротора и статора емкость между их полудисками изменяется по треугольнику. На рис. П-3 сплошной линией изображен диск статора, пунктиром — ротора. Емкость статор — ротор пропорциональна разности площадей F_1 и F_2 полудиска ротора, находящихся против разных полудисков статора. Площади F_1 и F_2 , пренебрегая малыми величинами, равны

$$F_1 = \frac{1}{2} r^2 \left(\frac{\pi}{2} + \omega t \right) - ar;$$

$$F_2 = \frac{1}{2} r^2 \left(\frac{\pi}{2} - \omega t \right) - ar,$$

и их разность

$$F_1 - F_2 = r^2 \omega t$$

растет пропорционально углу поворота (ωt) до своего максимального значения, соответствующего $\omega t = \frac{\pi}{2}$. Затем эта разность убывает по линейному закону,

обращается в нуль при $\omega t = \pi$ и, достигнув минимума при $\omega t = \frac{3\pi}{2}$, линейно возрастает

до нуля при $\omega t = 2\pi$.

Таким образом, изменение емкости по треугольнику соответствует наиболее простой форме дисков и дает наибольшее значение максимальной емкости статор — ротор при том же диаметре.

Приданием соответствующей формы полудискам ротора можно варьировать закон изменения емкости и, в частности, получить синусоидальную зависимость емкости от угла поворота.

Определим требуемую для этого форму полудиска ротора, пренебрегая щелью между полудисками. На рис. П-4 сплошной линией изображен диск статора в виде круга радиуса r , пунктирной линией — фигурный симметричный диск ротора; его максимальный радиус также равен r . Расчет произведен в полярных координатах ρ , φ — полюс в центре диска, отсчет полярного угла φ ведется от оси щели диска ротора; остальные обозначения те же, что и на рис. П-3.

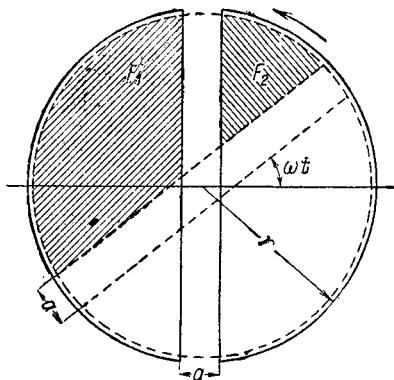


Рис. П-3.

Площадь фигурного полудиска

$$F_0 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho^2 d\varphi.$$

Площадь роторного полудиска, находящаяся перед правым полудиском статора

$$F_2 = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2} - \omega t} \rho^2 d\varphi.$$

Разность площадей, определяющая емкость между полудиском статора и ротора,

$$F_1 - F_2 = F_0 - 2F_2 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho^2 d\varphi - \int_0^{\frac{\pi}{2} - \omega t} \rho^2 d\varphi = \int_{\frac{\pi}{2} - \omega t}^{\frac{\pi}{2}} \rho^2 d\varphi.$$

Определим радиус-вектор ρ как функцию угла φ из условия

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho^2 d\varphi = A \sin \omega t,$$

или обозначая $\frac{\pi}{2} - \omega t = y$,

$$\int_y^{\frac{\pi}{2}} \rho^2 d\varphi = A \cos y.$$

Дифференцируя по y , найдем

$$-\rho^2 = -A \sin y,$$

или

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{A \sin y} = \\ &= \sqrt{A \sin \varphi}. \end{aligned}$$

При $\varphi = \frac{\pi}{2}$, по условию $\rho \frac{\pi}{2} = r$, откуда $A = r^2$

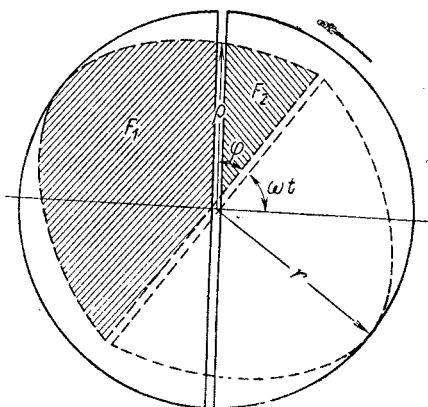


Рис. П-4.

$$\rho = r \sqrt{\sin \varphi}.$$

Форма полудиска ротора, соответствующая синусоидальному изменению емкости, приведена на рис. П-5, где она сопоставлена с полудиском статора. Недостатком такой формы ротора является его меньшая площадь, а следовательно, и меньшая максимальная емкость при той же величине наибольшего диаметра ротора. Площадь

$$F_0 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho^2 d\varphi = r^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi d\varphi = r^2$$

вместо $\frac{\pi r^2}{2}$ для полудиска; уменьшение величины максимальной

емкости оказывается в $\frac{\pi}{2} = 1,57$ раза.

С конструктивной точки зрения целесообразней выполнять статор фигурным, а ротор круговым, сохраняя тот же закон изменения емкости.

В гл. II было указано на преимущества изменения емкости по прямоугольнику. Получение такой формы кривой изменения емкости невозможно, так как

$$F_1 - F_2 = \int_{\frac{\pi}{2} - \omega t}^{\frac{\pi}{2}} \rho^2 d\varphi \neq \text{const}$$

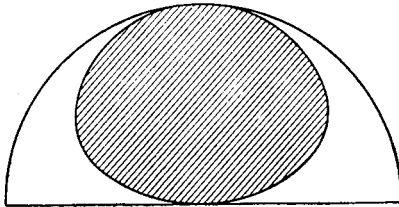


Рис. П-5.

Поэтому возможно только, как приближение к прямоугольной форме, получение трапециевидального изменения емкости.

Форма ротора определится из условия

$$\int_{\frac{\pi}{2} - \omega t}^{\frac{\pi}{2}} \rho^2 d\varphi = \frac{4A}{\pi\alpha} \left[\sin \alpha \sin \omega t + \frac{1}{9} \sin 3\alpha \sin 3\omega t + \right. \\ \left. + \frac{1}{25} \sin 5\alpha \sin 5\omega t + \dots \right],$$

где α — значение угла, соответствующее точке перехода от возрастающей части трапеции к ее верхнему основанию. Прделав вычисления, аналогичные приведенным выше, получим

$$\rho = \frac{r}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\alpha}{k}}} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \sin k \frac{\pi}{2} \frac{\sin k\alpha}{k} \sin k\varphi}.$$

при $k = 2n + 1$, а $n = 0, 1, 2, \dots$

ЛИТЕРАТУРА

1. Ломоносов М. В., Химические и оптические записки, Сочинения М. В. Ломоносова, т. VII, изд. АН СССР, 1934.
2. Болотов А. Т., Краткие и на опытности основанные замечания о электрицизме и о способности электрических машин к поможанию от разных болезней, СПб., 1803.
3. Петров В. В., Новые электрические опыты, СПб., 1804.
4. Armstrong A., A New Method for Production Electric Charges, Mech. Mag., 1845, 43, 64.
5. Toepler A.: 1) Über die Erzeugung einer eigenthümlichen Art von intensiven elektrischen Strömen mittelst eines Influenz Elektrometers, Pogg. Ann., 1865, 125, 469.; 2) Vergleichende Versuche über die Leistungen der Influenz-Maschine mit und ohne Metall-Belegung, Pogg. Ann., 1866, 127, 177; 3) Zur Construction und Leistung der Elektrophor-Maschine, Pogg. Ann., 1867, 130, 518.
6. Holtz W.: 1) Über eine neue Elektrisirmaschine, Pogg. Ann., 1865, 126, 157; 1866, 127, 320; 2) Über die höhere Ladung isolierender Flächen durch Seitenanziehung und die Übertragung dieses Principis auf die Construction von Influenzmaschinen, Pogg. Ann., 1867, 130, 128.
7. Thomson W., On a Self-Acting Apparatus for Multiplying and Maintaining Electric Charges, Proc. Roy. Soc., 1867, 16, 67.
8. Шведов Ф., Über die Verteilung der Elektrizität an den Scheiben der Holtz'schen Maschine, Pogg. Ann., 1871, 144, 597.
9. Теплов М. Н., Теория и новая конструкция электрофорных машин, Зап. Русского Техн. Об-ва, 1875, отд. II, прилож. стр. 1.
10. Под ред. Белькинда Л. Д., П. Н. Яблочков, Госэнергоиздат, 1944.
11. Пушков Н., Об упрощении электрофорной машины, «Электричество», 1883, 116.
12. Borns D., Die Influenzmaschinen von Wimshurst, ETZ, 1884, 5, 329.
13. Gray J., Les machines électriques à influence, Gauthier-Villars, 1892.
14. Wommelsdorf H.: 1) Die Kondensatormaschine, Ann. Phys., 1902, 9, 651; 2) Einfluss der Polarisatorstellung auf die Stromleistung der Influenzmaschinen, Ann. Phys., 1904, 15, 842; 3) Eine neue Art von Influenzmaschinen mit allseits in festes Isolationsmaterial eingebetteten Sektoren, Ann. Phys. 1905, 16, 334; 4) Über die Abhängigkeit von Polarisatorwiderstand, Scheibendicke und Scheibenabstand der Influenzmaschinen, Ann. Phys., 1907, 23, 601; 1907, 24, 483.

15. Barkhausen H., Das Problem der Schwingungserzeugung, S. Hirtzel, 1907.

16. Poincaré H., Sur quelques théorèmes généraux relatifs à l'électrotechnique, L'éclairage électr., 1907, N 9, 293.

17. Coehn A., Raydt U., Über die quantitative Gültigkeit des Ladungsgesetzes für Dielektrika, Ann. Phys., 1909, 30, 777.

18. Willard P., Abraham H., Sur une grande machine électrostatique, Compt. rend., 1911, 152, 1813.

19. Wommelsdorf H., Die Kondensatormaschine, ein neuer elektrostatischer Erzeuger hochgespannten Gleichstromes, ETZ, 1914, 35, 61; 1920, 41, 726; 1929, 50, 305; DRP, 1924, N 392554; 1925, N 420402.

20. Ollendorf F., Über Kapazitätsmaschinen, Arch. Elektr., 1923, N 4, 165.

21. Угримов Б. И. Die Treibriemen als Hochspannungs-Gleichstromerzeuger, ETZ, 1925, 46, 1237.

22. Chaumat H.: 1) Sur le calcul des machines électrostatiques, Compt. rend., 1929, 188, 1096; 2) Comparaison entre les machines électrostatiques et les machines dynamo à courant continu, Compt. rend., 1929, 188, 1232; 3) Une machine électrostatique à courant continu. Compt. rend., 1929, 188, 1490; 4) Les machines électrostatiques en fonctionnement sur des condensateurs, Compt. rend., 1929, 188, 1546.

23. Van de Graaff R. J., A 1500000 Volt Electrostatic Generator, Phys. Rev., 1931, 38, 1919.

24. Deutsch W., Über die Dichtverteilung unipolarer Ionenströme, Ann. Phys., 1931, 10, 847; 1933, 16, 588.

25. Barton H. A., Müller D. W., Van Atta L. C., A Compact High Potential Electrostatic Generator, Phys. Rev., 1932, 42, 901.

26. Vollrath R. E., A High-Voltage Direct Current Generator, Phys. Rev., 1932, 42, 298.

27. Вальтер А. К., Атака атомного ядра, ГНТИ УССР 1933.

28. Hochhäusler P., Eine Vervielfachungsschaltung für Influenzmaschinen, ETZ, 1933, 54, 704.

29. Van de Graaff R. J., Compton K. T., Van Atta L. C., The Electrostatic Production of High-Voltage for Nuclear Investigations, Phys. Rev., 1933, 43, 149.

30. Van Atta L. C., Samson E. W., Van de Graaff R. J., Progress Report of the Electrostatic High-Voltage Generator at Round Hill, Phys. Rev., 1933, 44, 316.

31. Compton K. T., 1) High-Voltage, Science, 1933, 78, 19 u 48; 2) The Battle of the Alchemist, El. Eng., 1933, 52, 75.

32. Jolivet P.: 1) Génératrice électrostatique autoexcitatrice, Compt. rend., 1933, 197, 744, 2) Générateurs électrostatiques, Rev. Gen. l'électr., 1934, 36, 698; 3) Nouveau moteur électrostatique, Compt. rend., 1936, 202, 1030.

33. Bramhall E. H., A Portable High-Voltage Generator of Practical Utility, Rev. Sc. Instr., 1934, 5, 18.

34. Bennet W. H., Electrostatic Generator with Small Vertical Clearance, Phys. Rev., 1935, 47, 791.

35. Grünewald H., Erzeugung und Verwendung hochgespannten Gleichstroms, VDI. Z., 1935, 79, 1375.

36. Strauch H., Die elektrostatischen Maschinen, Phys. Z., 1935, 17, 575.

37. Schimank H., Geschichte der Elektrisir-Maschinen bis zum Beginn des 19. Jahrhundert, Z. techn. Phys., 1935, 16, 245.

38. Tuve M. A., Hafstad L. R., Dahl O., High-Voltage Technic for Nuclear Physics Studies, Phys. Rev., 1935, 48, 315.

39. Van Atta L. C., Northrup D. L., Van Atta C. M., Van de Graaff R. J., The Design, Operation and Performance of the Round Hill Electrostatic Generator, Phys. Rev., 1936, 49, 761.

40. Вальтер А. К., Синельников К. Д., Электростатические генераторы постоянного высокого напряжения, ЖТФ, 1936, 6, вып. 12.

41. Pauthenier M., Moreau-Hanot M.: 1) Un générateur ionique à très haut potentiel, Bull. Soc. Franc. Electr., 1936, 6, 775. 2) Générateurs de haut tension à courant gazeux, J. Phys. Rad., 1937, 193.

42. Joliot F., Feldenrass M., Lazard A., Emploi du tetrachlorure de carbon pour l'élévation de la tension de générateurs électrostatiques du type Van de Graaff, Compt. rend., 1936, 202, 291.

43. Dahl O., Note on Disk-Type Electrostatic Generator, Rev. Sc. Instr., 1936, 7, 254.

44. Rodine M., Herb R., Effect of CCl_4 Vapor on the Dielectric Strength of Air, Phys. Rev., 1937, 51, 508.

45. Bouwers A., Kuntke F., Ein Generator für drei Millionen Volt Gleichspannung, Z. techn. Phys., 1937, 18, 209.

46. Herb R., Parkinson D., Kerst D., The Development and Performance of an Electrostatic Generator Operating under High Air Pressure, Phys. Rev., 1937, 51, 75.

47. Moreau-Hanot M., Transport d'ions par un courant gazeux, Compt. rend., 1938, 206, 1168.

48. Virgitti J., Etude théorique d'un transport d'ions par un courant de vapeur pour l'obtention de hautes tensions, Compt. rend., 1938, 206, 1367.

49. Wells W. H., Production of High Energy Particles, J. Appl. Phys., 1938, 9, 677.

50. Trump J. G., Merril F. H., Safford F. J., Van de Graaff Generator for General Laboratory Use, Rev. Sc. Instr., 1938, 9, 398.

51. Klein W., Generatoren für Gleichstrom-Höchstspannungen, Bull. Ass. Suisse Electr., 1938, 29, 436.

52. Neubert U., Selbsterregender, elektrostatischer Generator mit in Pressgas laufenden Ladungsbändern, Z. Phys., 1938, 110, 334.

53. Жежерин Р. П., Бабат Г. И., Физико-технические основания ионно-конвекционного генератора, «Электричество», 1938, № 1, 39.

54. Вальтер А. К., Синельников К. Д., Таранов А. Е., Электростатический генератор и высоковольтная разрядная трубка Украинского Физико-Технического Института, Изв. АН СССР, ОМЭИ, 1938, № 1—2, 13.

55. Kossel W., Bemerkungen über elektrostatische Maschinen, Z. Phys., 1938, 111, 264.

56. Kossel W., Heise F., Elektrostatische Maschine mit übernormaler Ladungsdichte, Z. Phys., 1939, 113, 769.

57. Иоффе А. Ф., Электростатический генератор, ЖТФ, 1939, 9, 2071.

58. Бобковский С. А., Гохберг Б. М., Иоффе А. Ф., Рейнов Н. М., Высоковольтный электростатический генератор, ЖТФ, 1939, 9, 2090.

59. Иоффе А. Ф., Гохберг Б. М., Рейнов Н. М., 1) Модели электростатических генераторов, работающих в жидком диэлектрике, ЖТФ, 1939, 9, 2081; 2) Модели многодисковых электростатических генераторов, ЖТФ, 1939, 9, 2094.

60. Pauthenier M.: 1) Générateurs de haute tension à courant gazeux. *Compt. rend.*, 1938, 207, 126; 2) La théorie de la charge électrique les poussières et les générateurs de haute tension à courant gazeux, *Rev. Gen. l'électr.*, 1939, 45, 583.

61. Condon E. V., Die Entwicklung der Van de Graaff Generatoren in Amerika, *ETZ*, 1939, 59, 1039.

62. Charlton E. E., Westendorp W. F., Dempster L. E., Hotelling G., A New Million-Volt X-Ray Outfit, *J. Appl. Phys.*, 1939, 10, 374.

63. Bouwers A. Elektrische Höchstspannungen, J. Springer, 1939.

64. Baumhauer W., Kunze P., Ein waagrecht liegender Bandgenerator 1 MV nach Van de Graaff, *Z. Phys.*, 1939, 114, 197.

65. Trump J. G., Van de Graaff R. J., A Compact Pressure Insulated Electrostatic X-Ray Generator, *Phys. Rev.*, 1939, 55, 1160.

66. Heise F., Erregung-und Transportvorgänge an einer selbsterregenden Van de Graaff Maschine, *Z. Phys.*, 1940, 116, 317.

67. Бобковский С. А. Общая теория электростатических генераторов, ЖТФ, 1940, 10, 1404.

68. Иоффе А. Ф., Гохберг Б. М., Модели электростатических генераторов, Изв. АН СССР, 1940, Сер. физ. 4, 367.

69. Ganger B., Die elektrische Festigkeit verdichteter Gase, *Arch. Elektr.*, 1940, 34, 633.

70. Fauldrath L., Verwendung einer rotierenden Scheibe zum Ladungstransport in elektrostatischen Hochspannungsgeneratoren, *Z. Phys.*, 1940, 116, 701.

71. Wells W. H., Haxby R. O., Stephens W. E., Shoupp W. E., Design and Preliminary Performance Tests of the Westinghouse Electrostatic Generator, *Phys. Rev.*, 1940, 58, 162.

72. Гохберг Б. М., Высоковольтные электростатические генераторы постоянного высокого напряжения, ЖТФ, 1940, 10, 177.

73. Herb R. G., Turner C. M., Hudson C. M., Warren R. E., Electrostatic Generator with Concentric Electrodes, *Phys. Rev.*, 1940, 58, 579.

74. Dämförth W. E., Hudspeth E. L., Operational Details of the Bartol Electrostatic Generator, *Phys. Rev.*, 1941, 60, 170.

75. Yadoff A., Platoff I., Sur in procédé permettant de réduire les pertes par effluves dans les machines électrostatiques. *Compt. rend.*, 1941, 212, 671.

76. Virgitti J., Sur un générateur de haute potentiels à transport d'ions par courant gazeux, *Rev. Gen. l'électr.*, 1941, 50, 57.

77. Каплянский А. Е., Введение в общую теорию электрических машин, Госэнергоиздат, 1941.

78. Van Atta L. C., Northrup D. L., Van de Gra-

aff R. J., Van Atta C. M., Electrostatic Generator for Research at M.I.T., Rev. Sc. Instr., 1941, 12, 534.

79. Williams J. H., Rumbaugh L. H., Tate J. T., Design of the Minnesota Electrostatic Generator, Rev. Sc. Instr., 1942, 13, 202.

80. Neubert U., Elektrostatische Generatoren, R. Oldenbourg, 1942.

81. Watzlawek W.: 1) Elektrostatischer Generator mit konzentrischen Elektroden, ETZ, 1941, 62, 958; 2) Der elektrostatische Generator, Z. techn. Phys. 1942, 23, 59.

82. Hanson A. O., Voltage-Measuring and — Control Equipment for Electrostatic Generators, Rev. Sc. Instr., 1944, 15, 57.

83. Jolivet P.: 1) Le champs électriques dans les génératrices électrostatiques à inducteurs chargés par ionisation, Compt. rend., 1945, 221, 613; 2) Sur la recherche de la force électromotrice des machines électrostatiques, Compt. rend., 1945, 221, 347; 3) La réaction du tension dans les machines électrostatiques, Compt. rend. 1945, 221, 693; 4) Les machines électrostatiques à influence et la rénovation de leur technique, Rev. Gen. l'électr., 1947, 6, 243; 5) Forces électrostatiques critiques dans quelques milieux gazeux, Rev. Gen. l'électr. 1949, 58, 383.

84. Mac Kibben J., Frisch D., Husch J., Control Equipment for 2,5 MeV Van de Graaff Giving a Ion Beam Constant to $\pm 1,5$ keV, Phys. Rev., 1946, 70, 117.

85. Miller W. C., A New Type of Electrostatic Generator, Phys. Rev., 1946, 69, 666.

86. Neuman M., Kemppainen A. O., High — Voltage Installation of the Precipitation-Static Project, Proc. IRE, 1946, 34, 247.

87. Van de Graaff, R. J., Beuchner W. W., Woodward W. M., Mac Intoch L. R., Burill E. A., Sperduto A., Electrostatic Generator for Nuclear Research, Phys. Rev., 1946, 70, 797.

88. Trump J. G., Van de Graaff R. J., The Insulation of High Voltages in Vacuum, J. Appl. Phys., 1947, 18, 327.

89. Гохберг Б. М., Элегаз — электрическая газовая изоляция, «Электричество», 1947, № 3, 15.

90. Mann W. B., Grimett L. G., The Imperial College High-Voltage Generator, Proc. Phys. Soc., 1947, 59, 699.

91. Felici N. J.: 1) Machines électrostatiques puissantes, J. Phys. Rad., 1947, 8, 1; 1948, 9, 66; 1949, 10, 137; 2) Machines électrostatiques industrielles, Atomes, 1949, 36, 93.

92. Trump J. G., Electrostatic Sources of Electric Power, El. Eng., 1947, 66, 525.

93. Becker E. W., Ein 300 kV — Bandgenerator mit übernormaler Ladungsdichte, Z. Naturforsch., 1947, 2a, 395.

94. Harrison G. R., M.I.T. Builds 12 MeV Electrostatic Generator, Nucleonics, 1948, 3, 63.

95. Danforth W. E., Hudspeth E. L., Mandeville C. E., Swann C. P., Compact Electrostatic Generator for the Production of Positive Ions, Phys. Rev., 1948, 73, 1413.

96. Van de Graaff R. J., Trump J. G., Beuchner W. W., Electrostatic Generators for Acceleration of Charged Particles, Report on Progress in Phys., 1948, 11 1.

97. Malpica J. M.: 1) Electrostatic D-C Transformer, *El. Eng.*, 1948, 67, 1074; 2) Electrostatic Direct-Current Transformer of 300 kV, *Rev. Sc. Instr.*, 1951, 22, 364.
98. Felici N. J., Marchal J., Nouvelles recherches sur la rigidité diélectrique de gaz comprimés, *Rev. Gen. l'électr.*, 1948, 57, 155.
99. Полотовский Л. С., Работа генератора тока в переходных режимах. Тр. Лен. Военно-Возд. Инж. Акад., 1948, 20, 65.
100. Fortescue R. L., Hall P. D. The High-Voltage Electrostatic Generator at the Atomic Energy Research Establishment, *Proc. Inst. El. Eng.*, 1949, 96, 77.
101. Lown V. W., The Van de Graaff Generator, *Electronic Eng.*, 1949, 21, 45.
102. Blifford J. H., Arnold R. G., Friedman H., Corona-Tube Regulators for High-Voltage, *Electronics*, 1949, 22, 110.
103. Bame S. J., Bagget L. M., Voltage Stabilisation for Corona-Tube Regulators for High-Voltage, *Electronics*, 1949, 20, 839.
104. Именитов И. М., Приборы для измерения напряженности электрического поля и их применение, *ЖТФ*, 1949, 19, 1020.
105. Левин Г. Э., Исследование и разработка электростатических генераторов, Диссертация, Москва, 1950.
106. Fuss F., Versuche zu einem neuartigen elektrostatischen Generator für 1 bis 10 kV, *ETZ*, 1950, 11, 279.
107. Jennings B., Electronics and the Electrostatic Generator, *Proc. Inst. Radio Eng.*, 1950, 38, 1126.
108. Bagget T. R., Bagget L. M., Electrostatic Generator, *Rev. Sc. Instr.*, 1950, 21, 578.
109. Taieb T., La régulation de tension des générateurs électrostatiques Van de Graaff, *L'onde Élé.*, 1950, 30, 462.
110. Felici N. J., Les surfaces à champ électrique constant, *Rev. Gen. l'électr.*, 1950, 59, 479.
111. Lucia F., The Diametral Conductor in Cylindrical Electrostatic Machines, *Elettrotecn.*, 1950, 37, 343.
112. Kossel W., Herschenbach W., Stromstarker Scheibengenerator mit übernormaler Ladungsdichte, *Z. Naturforsch.*, 1951, 6a, 166.
113. Trump J. G., The Electrostatic Accelerator as a Source of Ionizing Energy, *El. Eng.*, 1951, 70, 781.
114. Kaufman E. N., An Unusual H-V Generator, *Rad. Televis. News*, 1952, 9, 59.
115. Flammerfeld A., Weber G., Einfacher Van de Graaffs Generator mit doppelten Ladung, *Z. Naturforsch.*, 1952, 7a, 161.
116. Simane C., Mochny elektrostatičké stroju, *Elektr. Obzor.*, 1952, 41, 467.
117. Boag J. M., The Design of the Electric Field in a Van de Graaff Generator, *Proc. Inst. El. Eng.*, 1953, 100, 63.
118. Felici N. J.: 1) Propriétés diélectriques de l'hydrogène pour et application aux générateurs électrostatiques à transporteurs isolants, *Compt. rend.*, 1953, 237, 979; 2) Le couplage en série des générateurs électrostatiques, *Schweiz. techn. Z.*, 1953, N 11, 145; 3) Developments in Regard to Electrostatic Generators for Direct Current, *Direct Curr.*, 1953, 1, 122; 4) Caractéristique et régulation des générateurs électrostatique, *Bull. Soc. Franc. Électr.*, 1953, 3, 771; 5) Electrostatique

et Électronique. La régulation électronique des générateurs électrostatiques, *L'onde Él.*, 1957, 37, 358.

119. Jolivet P., Sur une nouvelle machine électrostatique à influence, *Rev. Gen. l'électr.*, 1953, 62, 25.

120. Felici N. J., Gartner E., Contribution à l'étude des génératrices électrostatiques à transporteurs isolants, *Rev. Gen. l'électr.*, 1953, 62, 71.

121. Gartner E., Contribution à l'étude des génératrices électrostatique à transporteurs isolants, *Rev. Gen. l'électr.*, 1953, 62, 136.

122. Shire E. S., Survey of Electrostatic Generators, *Brit. J. Appl. Phys.*, 1953, N 2, 56.

123. Simon A. W., On the theory of the Van de Graaff Electrostatic Generator, *Amer. J. Phys.*, 1954, 22, 318.

124. Foord T. R., A Portable Van de Graaff Generator, *J. Sc. Instr.*, 1954, 31, 440.

125. Bouillaud M. A., Ionisation d'une lame d'air comprimé saumise à une champ électrique alternatif entre plateaux reconverts d'isolants, *Rev. Gen. l'électr.*, 1954, 63, 222.

126. Neubert U., Fortschritte im Bau elektrostatischer Maschinen, *ETZ (Ausg. B)*, 1954, 6, 199.

127. Neubert U., *Elektrostatik in der Technik*, R. Oldenbourg, 1954.

128. Воробьев А. А., *Сверхвысокие электрические напряжения*, Госэнергоиздат, 1955.

129. Herschenbach W., Hochspannungserzeugung durch Ladungstransport auf rotierenden Isolatorflächen, *Z. ang. Phys.*, 1955, 11, 33.

130. Zan Z.: 1) Konstrukci typy modernich elektrostatickych stroju, *Elektr. Obzor.*, 1956, 45, 36; 2) Rotacni elektrostatické generátory s izolacnim prenásecem a sikmym polem. *Elektr. Obzor.*, 1959, 48, 580.

131. Сканава Г. И., Матвеева В. А., Новые диэлектрики с весьма высокой диэлектрической проницаемостью, не обладающие сегнетоэлектрическими свойствами, *ЖЭТФ*, 1956, 30, 1047.

132. Herschenbach W., Siegel H., Untersuchung von Selbsterregung des Van de Graaffs Generators, *Z. angew. Phys.*, 1956, 8, 355.

133. Felici N. J., *Electrostatiche Hochspannungsgeneratoren*, G. Braun, 1957.

134. Полотовский Л. С., Емкостный двигатель постоянного тока малой мощности. *Тр. Лен. Военно-Возд. Инж. Акад.*, 1958, 243, 3.

135. Neubert U., Die physikalischen Prinzipien, die zu neuen elektrostatischen Maschinen hoher Leistung führen, *Z. angew. Phys.*, 1958, 10, 100.

136. Labin E., *Electrostatic Generation, Electrochemical Components and System Design*, 1958, 2, 24.

137. Gale A. J., *Electrostatic Generators*, Advance Propulsion System Symposium (Los Angeles, Calif.), Dec. 1957, p. 165.

138. Breaux O. P., *Electrostatic Power Generation for Space Propulsion*, *El. Eng.*, 1959, 78, 1102.

Полотовский Лев Соломонович
ЕМКОСТНЫЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Редактор *А. Е. Каплянский*
Технический редактор *О. С. Житникова*

Сдано в произв. 11/V 1960 г. Подписано
к печати 15/IX 1960 г. М-22491. Печ. л. 7,99.

Уч. изд. л. 7,6. Бум. л. 2,43.

Формат 84×108¹/₃₂.

Тираж 8000. Цена 3 р. 80 к. Заказ 920.

Типография № 4 УПП Ленсовнархоза.
Ленинград, Социалистическая, 14.

Цена 3 р. 80 к.

1/1 1961 г. — 38 к.

б/у

11

28978

ГПНТБ России



154691