На методические темы

О НЕКОТОРЫХ ОШИБКАХ В ТРАКТОВКЕ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А. Я. Бергер

Ошибки в трактовке теории электрических машин в трудах некоторых отечественных и зарубежных авторов имеются как в трактовке вопросов отдельных видов электрических машин—машин постоянного тока (МПТ), синхронных (СМ), асинхронных (АМ), так и в изложении ряда вопросов, общих для всех электрических машин.

При этом имеются в виду ошибки по существу, и только в одном-двух случаях встречаются методические ошибки, затрудняющие понимание сущности вопроса начинающими изучение электрических машин студентами.

Рассмотрим некоторые из этих ошибок.

Число фаз к. з. ротора АМ (или якоря МПТ)

[1,6]

Имеются две формулы—

Арнольд: $$m_2 = \frac{z_2}{p};$$

Рихтер: $$m_2 = z_2,$$

где m_2—число фаз к. з. ротора АМ;

z_2—число пазов ротора;

p—число пар полюсов.

Ошибочность формулы Арнольда видна сразу, так как в случае, если z_2 не делится на p, получается дробное число фаз, что невозможно. Ошибочность формулы Рихтера в общем случае сразу не видна.

Правильно число фаз можно определить построением звезды пазных э. д. с. по числу разнофазных векторов в ней [1, 6]. При этом если z_2 и p имеют общий множитель t, то число фаз равно

$$m_2 = \frac{z_2}{t}.$$

В частном случае, когда $t=p$, справедлива формула Арнольда. В частном случае, когда $t=1$, справедлива формула Рихтера.

Невзирая на неправильные (в общем случае) формулы Арнольда и Рихтера, они дают правильные формулы для расчета параметров к. з. ротора АМ, так как в ходе их рассуждений имеются две компенсирующие друг друга ошибки.

Условия симметрии обмотки якоря машины постоянного тока (МПТ)

[1,1]

Этот вопрос излагается обычно без доказательств, и приводимые разными авторами условия симметрии иногда отличаются друг от друга.

Для того, чтобы в обмотке якоря не было уравнительных токов, необходимо, чтобы э. д. с. отдельных ветвей обмотки были равны по величине и совпадали по фазе.

Для этого нужно: 1) Одинаковое число проводников в каждой параллельной ветви (формула 1); 2) одинаковое количество перерезаемых ими силовых линий (формула 3); 3) э. д. с. каждой параллельной ветви должна содержать одинаковое количество разнофазных векторов звезды пазных э. д. с.

Мы получаем строгие и обоснованные условия симметрии:

$$\frac{K}{a} = \alpha = \text{ц. ч.} \tag{1}$$

$$\frac{z}{t \cdot 2a} \cdot t = \frac{z}{2a} = \beta = \text{ц. ч.} \tag{2}$$

$$\frac{2p}{2a} = \frac{p}{a} = \gamma = \text{ц. ч.} \tag{3}$$

Первое условие всегда выполняют. Второе и третье на практике иногда трудно выполнить, поэтому мирятся с условиями:

$$\frac{z}{a} = \beta' = \text{ц. ч.} \tag{2'}$$

$$\frac{2p}{a} = \gamma' = \text{ц. ч.} \tag{3'}$$

Секвенц приводит строгие условия (2) и (3), а вместо (1) дает без надобности условие более трудно выполнимое, чем строгое (1), а именно:

$$\frac{K}{2a} = \text{ц. ч.}$$

И. М. Постников в книге по расчету электрических машин дает строгие условия (1) и (3) и практическое (2′)—без обоснования, как и другие авторы.

Внезапное короткое замыкание МПТ

[1,2]

Бирманс в своей книге „Сверхтоки" [VII, стр. 195] пишет: „Колоссален тормозящий момент, действующий на окружности якоря в момент короткого замыкания; он превосходит нормальный вращающий момент не менее чем в 72 раза".

Поражает в этом утверждении прежде всего точность кратности момента при ко-

ротком замыкании „не менее, чем в 72 раза", а, во-вторых, его величина.

Если бы это было так, то всякая МПТ разлетелась бы вдребезги при первом коротком замыкании, что, конечно, не происходит.

Автор данной статьи рассмотрел вопрос для общего случая (при трех обмотках возбуждения) и шести частных случаев, когда нет первой, второй или третьей *OB*, когда нет первой и второй, первой и третьей, второй и третьей.

Полученные формулы и проведенные опыты дали возможность Н. В. Куликову предложить простые формулы для расчета токов к. з. МПТ и момента

$$\frac{I_k}{I_н} = 0{,}5 k_i \left(1 - \frac{k_i}{100}\right);$$

$$\frac{M_k}{M_н} = 0{,}25 k_i \left(1 - \frac{k_i}{100}\right),$$

где

$$I_{ki} = \frac{E}{R_a}, \qquad k_i = \frac{I_{ki}}{I_н}$$

E—э. д. сила в момент короткого замыкания;

R_a—сопротивление всей якорной цепи.

Оказалось, что если, например, $k_i = 30$, то действительная кратность тока к. з. и момента равны:

$$\frac{I_{ki}}{I_н} = 0{,}5 \cdot 30 \left(1 - \frac{30}{100}\right) \cong 10;$$

$$\frac{M_k}{M_н} = 5.$$

Сравнение характеристик двигателей постоянного тока (ДПТ)

[1,3]

Авторы учебников по электрическим машинам обычно излагают все виды ДПТ, но не дают сопоставления характеристик их. Тут ошибка не по существу, а методическая, так как не дается обоснование выбора типа двигателя.

Вращающий момент ДПТ равен

$$M = k\Phi I.$$

Если в двигателе параллельного возбуждения пренебречь размагничивающим влиянием реакции якоря, то при $i_в$=пост., U=пост., магнитный поток Φ=пост. и ток якоря $I \equiv M$.

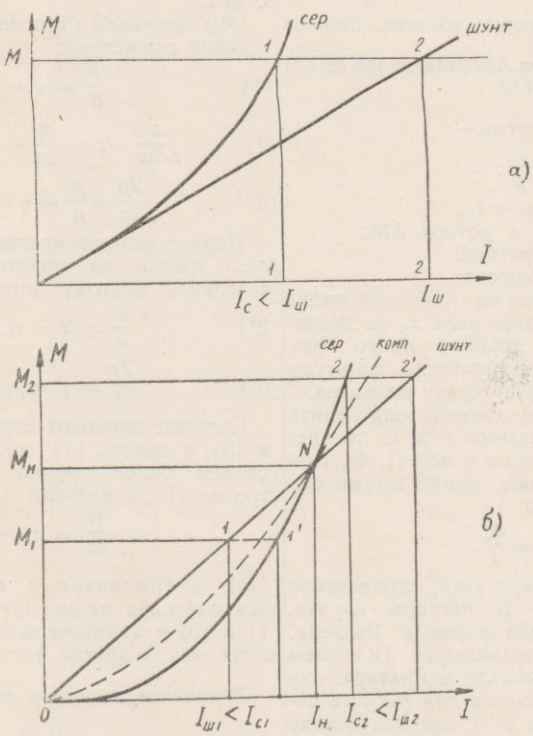

Рис. 1.

Для двигателя последовательного возбуждения, если пренебречь насыщением, магнитный поток $\Phi \equiv I$; $M \equiv I^2$ и $I \equiv \sqrt{M}$. Последнее равенство иногда дает повод некоторым авторам утверждать, что двигатель последовательного возбуждения пр

ибом значении вращающего момента потребляет меньший ток, чем ток, потребляемый двигателем параллельного возбуждения с теми же номинальными данными (см. рис. 1*а*). В действительности при недогрузке ($M_1 < M_н$ — рис. 1*б*) сериесный двигатель потребляет больший ток, чем шунтовой $I_{c1} > I_{ш1}$, а при перегрузках ($M_2 > M_н$) наоборот, сериесный двигатель потребляет меньший ток $I_{c2} < I_{ш2}$ и в этом состоит одно из его преимуществ по сравнению с двигателем параллельного возбуждения. В особенности эти свойства сериесного двигателя ценны для привода механизмов с частными пусками и с большим пусковым моментом (крановые установки, электрическая тяга и др.). Для привода станков, работающих большую часть времени с недогрузкой, целесообразнее применять двигатель параллельного возбуждения.

При выборе типа двигателя постоянного тока учитывается ряд факторов—потребляемый ток при заданной нагрузке, скоростная характеристика и, вообще, пригодность его для рассматриваемого вида привода.

О характеристическом треугольнике МПТ и новом методе наладки коммутации на базе этого треугольника

[I,4]

Вскоре после Отечественной войны А.С. Дмитрадзе (а вслед за ним проф. В. А. Толвинский) правильно доказали, что нельзя пользоваться реактивным (характеристическим) треугольником МПТ, получаемым из опытов холостого хода и короткого замыкания, для построения рабочих характеристик—нагрузочной, регулировочной и внешней. Выходило так, что этот треугольник никому не нужен, так как он никак не может быть использован.

Пишущий эти строки показал [I, 4*а*], что горизонтальный катет этого треугольника дает коммутационную реакцию якоря, а затем [I, 4*б*, *в*] предложил новый метод наладки коммутации МПТ на базе этого треугольника. Если скомпенсировать точно этот горизонтальный катет и свести его к точке (к нулю), то мы получим прямолинейную коммутацию, а для получения желательной несколько ускоренной коммутации надо скомпенсировать несколько большую величину (на 10—15%).

Расположение горизонтального катета треугольника из опытов холостого хода и короткого замыкания справа или слева от оси ординат дает указание на то, какую коммутацию мы имеем в исследуемой машине—ускоренную или замедленную.

Способы же наладки—изменение числа витков добавочных полюсов, шунтировка добавочных полюсов или изменение величины воздушного зазора под добавочными полюсами такие же, как в методе безыскровой зоны В. Т. Касьянова по способу подпитки.

Впоследствии Е. М. Синельников и А. Г. Назикян [XI] развили метод дальше, предложив комбинированный метод—снятие реактивного треугольника МПТ при подпитке, что дало им возможность предложить выбор оптимальных параметров добавочных полюсов МПТ.

Об оптимальном воздушном зазоре МПТ

[I.5]

Автор этих строк давно отстаивает тезис, что в электрической машине имеются не два основных размера (диаметр и длина), а три—и этим третьим основным размером является воздушный зазор. Так как изменение (например, увеличение) воздушного зазора улучшает одни и ухудшает другие показатели МПТ, то, следовательно, имеется оптимум величины воздушного зазора, что и дано в [I, 5]. Между тем, авторы книг по электрическим машинам уделяют вопросу выбора величины воздушного зазора обычно лишь несколько строк.

Определение синхронной машины (СМ)

Определение СМ, даваемое авторами, на базе формулы

$$f = \frac{pn}{60}$$

не может служить определением потому, что эта же зависимость справедлива и для МПТ.

Определение СМ должно содержать указание на то, что с чем синхронно, а именно—первая гармоническая поля якоря (статора) и физический ротор.

Конечно, и поле ротора синхронно с полем статора, т. е. относительная скорость полей статора и ротора равна нулю, но это общий закон для всех электрических машин и не может служить определением для СМ.

Синхронная машина называется синхронной потому, и только потому, что первая гармоническая поля статора и физический ротор движутся синхронно.

Поведение СД при впадении в синхронизм при асинхронном пуске

Венгерский ученый К. Р. Ковач [II] в своем ценном двухтомнике по переходным режимам машин переменного тока рассматривает и данный вопрос.

Пренебрегая реактивным моментом и моментом от токов в *OB*, он пишет

$$\frac{J}{p}\frac{d^2\theta}{dt^2} = M_a - M_c - M_н,$$

где

M_a—асинхронный момент $= M_{ma}\frac{s}{s_m} = M_{ma} \cdot y$;

M_c—синхронизирующий момент $= M_{mc} \cdot \sin\theta$;

M_{ma}—максимальный асинхронный момент;

M_{mc}—максимальный синхронный момент;

$M_н$—момент нагрузки.

$$y = \frac{s}{s_m}.$$

Подставляя эти значения и деля на M_{ma}, автор получает

$$\frac{J}{pM_{ma}}\frac{d^2\theta}{dt^2} = y - k\sin\theta - m,$$

где

$$m = \frac{M_н}{M_{ma}}, \quad k = \frac{M_{mc}}{M_{ma}}.$$

И вот тут автор делает ошибку, принимая $k=1$, т. е. он принимает, что $M_{mc}=M_{ma}$, что, понятно, неверно.

Использование СГ при $\cos\varphi_н=1$ для работы при $\cos\varphi=0{,}8$

[III]

И. А. Сыромятников предлагает как резерв реактивной мощности использовать СГ, рассчитанные на $\cos\varphi_н=1$, и заставить их работать при $\cos\varphi=0{,}8$. Ход его рассуждений представлен на рис. 2.

СГ работает при $\cos\varphi_н=1$ при отдаваемой мощности $OA=1$. Заставим СГ работать при $\cos\varphi=0{,}8$. Полная мощность его $OB=1{,}25$, т. е. увеличится на 0,25, зато реактивная мощность вместо нуля станет $AB=0{,}75$, т. е. получим $\frac{0{,}75}{0{,}25}=3$ *киловара* на каждый добавочный *киловольт-ампер*.

Арифметика совершенно правильная, если бы . . . если бы это было возможно и не создавало бы опасности аварии машины.

В самом деле, ток статора увеличится в 1,25 раза, потери в $(1{,}25)^2=1{,}5$ раза и нагрев статора увеличится.

Размагничивающее действие реакции якоря резко увеличится, придется и ток возбуждения ротора значительно увеличить с аналогичным результатом в отношении

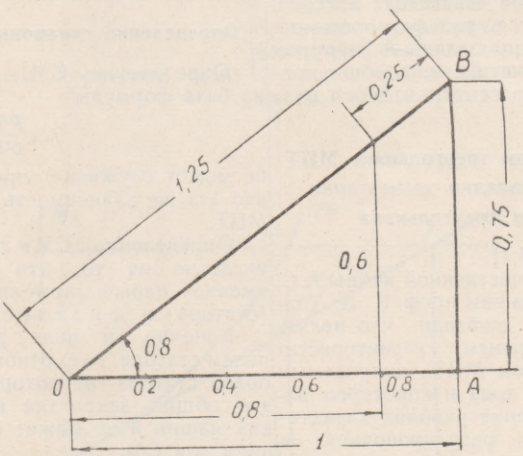

Рис. 2.

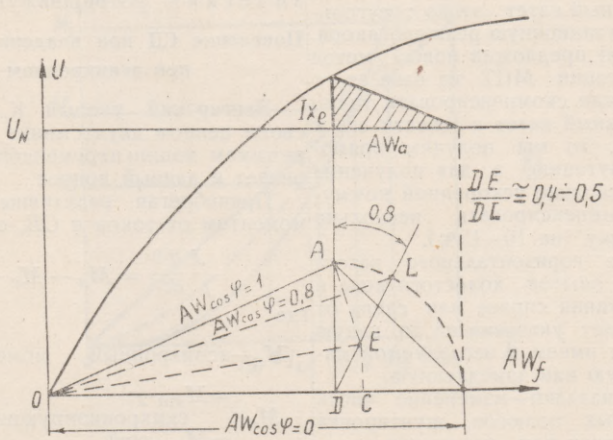

Рис. 3.

потерь и нагревания, как в статоре. Короче—машина выйдет из строя из-за увеличенного нагрева.

В действительности машину с номинальным $\cos\varphi$, равным единице, при работе с $\cos\varphi=0{,}8$ не только нельзя перегружать, но можно нагрузить только на 40—50% ее номинальной мощности, что ясно

любой векторной диаграммы СМ и интерпретировано на рис. 3 построением шведской диаграммы для СМ для $\cos\varphi_н=1$ и $\cos\varphi=0{,}8$. Допустимая нагрузка при $\cos\varphi=0{,}8$ равна отношению $\frac{DE}{DL}=0{,}4\div0{,}5$, и, следовательно, при нагрузке (по предыдущему рисунку), равной 1,25, машина очень скоро выйдет из строя.

Об экономической роли изоляции в электрических машинах и выборе оптимального напряжения для них

[I,7]

Во всех трудах отечественных и зарубежных авторов говорится только о стоимости металлов и необходимости экономии их, что, конечно, правильно—экономить надо все ресурсы, но ни слова не говорится об экономической роли изоляции.

Между тем в крупных (и не только в крупных) электрических машинах одна только статорная изоляция дороже всех активных материалов, взятых вместе, не говоря уже о дефицитности этой изоляции в мире на сегодняшний день (что может быть открыто завтра, никому не дано знать).

Каждый киловольт снижения напряжения ТГ, ГГ и т. п. дает 2% экономии себестоимости машины, уменьшение ее размеров и веса, кранового оборудования и размеров здания (или объекта, где расположена машина).

Правда, при этом увеличиваются сила тока и размеры масляников (если их ставить на стороне низкого напряжения, что не обязательно) и размеры шинопровода.

Это обстоятельство может съесть 25% экономии, но 75% экономии останется и притом—при повышении надежности, о чем подробно сказано в [1, 7].

Разумное снижение напряжения электрических машин (выбор оптимального значения) является задачей не только электропромышленности, но и заказчиков и проектирующих организаций, и не случайно, например, ТГ на 100 *мгвт* выполняется сейчас не на 15,75 *кв*, как прежде, а на 10,5 *кв*.

Хотелось бы, чтобы в будущем, говоря об электрических машинах, авторы в первую очередь говорили бы об изоляции и ее стоимости, а затем —о металлах.

Между прочим, некоторые электрики (сетевики обычно), зная, что в сетях при повышении напряжения уменьшаются сечение линии и расход меди в ней, полагают, что это верно и для электрических машин, что, конечно, грубая ошибка. Расход меди в электрической машине не зависит от напряжения (уменьшается сечение отдельного проводника, но увеличивается соответственно необходимое число проводников) и даже несколько (на 5—10%) увеличивается при повышении напряжения из-за необходимости большего отдаления головок обмотки от сердечника.

Один из законов Видмара

[V]

Видмар дал ряд правильных законов проектирования электрических машин, но дал и неправильные. Например,

$$P_{си\ гол}=P_{си\cdot паз\cdot части},$$

т. е. „Потери в меди головок обмотки должны быть равны потерям в меди пазовой части обмотки". К чему приводит такой „закон"? Если почему-либо пришлось увеличить активную длину машины, то есть и пазовой части обмотки, то потери в ней вырастут, и для соблюдения вышеупомянутого „закона" Видмара надо намеренно увеличить потери и в лобовой части, что, конечно, неверно.

«Закон» И. М. Постникова

[IV]

И. М. Постников установил экономический „закон", что „стоимость обмотки должна быть равна стоимости эксплуатационных потерь в ней за нормативный срок, равный 8 годам".

К чему приводит такой „закон"? Если при проектировании данной машины на другое, повышенное напряжение, обмотка становится, понятно, дороже (из-за изоляции), то для соблюдения „закона" И. М. Постникова надо намеренно увеличить эксплуатационные расходы, т. е. увеличить потери и снизить к. п. д.

О предельной мощности электрических машин

[VI]

О предельных возможностях электрических машин можно говорить не теоретически, а исходя из конкретных условий техники и экономики с оговоркой—„на сегодняшний день, при данном уровне науки". Так, например, на сегодня предельная мощность одновального турбогенератора составляет 500 *мгвт*, но как только металлургия даст роторные поковки на 3000 *об/мин* (3600 угонных) диаметром, примерно, в 1,3 *метра* (сейчас предел—1,15*м*), а химия даст изоляцию более прочную, чем слюда, при меньшей толщине, так станет возможным одновальный турбогенератор в 800—1000 *мгвт* (двухвальный, понятно, и сейчас возможен на такую мощность). Так следует понимать и мою статью „Экономический предел повышения использования электрических машин"*. Даже этот предел различен для разных районов Союза из-за того, что весьма различна в них стоимость киловатт-часа электрической энергии.

Много можно говорить о предельных мощностях машин постоянного тока, но только с оговоркой—при учете современного уровня знания о процессе коммутации. Как только будут найдены возможности допуска в МПТ больших чем сейчас величин реактивной э. д. с. и напряжения между

* „Электромеханика", 1960, № 12.

коллекторными пластинами, так сразу повысится предельная мощность МПТ.

Автор [VI] пишет о предельных возможностях электрической машины, исходя только из характера закона распределения взаимоиндуктивности в электрической машине — прямоугольного, треугольного, синусоидального, хотя в реальном ТГ изменение взаимоиндуктивности происходит по трапецеидальному закону, поэтому установленная автором связь

$$P_{макс} = kfw_0,$$

где f—частота, w_0—энергия (а почему не мощность?) магнитного поля возбуждения при холостом ходе, дает колебания коэффициента k от $k=2$ до $k=8$, и, следовательно, этот коэффициент должен быть установлен для конкретной машины по ее кривой поля.

Так как автор не делает никаких оговорок, то неискушенный читатель (студент, например) поймет выводы автора, как некий закон.

Между тем предельные мощности электрических машин лимитируются рядом факторов—допустимыми механическими, тепловыми и электромагнитными нагрузками, системой охлаждения, габаритами железных дорог, предельными возможностями смежных областей (металлургии, изоляционного дела) и т. д.

Проверим формулу автора на крупных турбогенераторах

P (квт)	w_0 (квт)	$k=\frac{1}{50}\cdot\frac{P}{w_0}$
200000	115	35
300000	205	29
500000	280	35

Мы получим $k=29$—35, а у автора $k=2$—8.

Выведенные автором соотношения, бесспорно, интересны, но нужны оговорки, указанные выше, или дополнительные пояснения.

ВЫВОДЫ

Мы остановились только на некоторых ошибках отечественных и зарубежных авторов. Одни из них грешат против физической сущности, но безвредны для народного хозяйства; другие вызывают излишние затраты; третьи—могут привести к авариям.

ЛИТЕРАТУРА

I. Бергер А. Я.
1. Условия симметрии обмотки якоря МПТ, ВЭП, 1954, № 2.
2. Внезапное короткое замыкание МПТ.
   а) Труды ЛЗИИ, 1955, № 1;
   б) „Электросила“, 1954, № 12.
3. Сравнение двигателей постоянного тока. Новое в МПТ. ЦИНТИ ЭП, 1959, стр. 18—20.
4. Наладка коммутации МПТ по методу реактивного треугольника.
   а) „Электричество“, 1954, № 2,
   б) Труды СЗПИ, 1957, № 2;
   в) „Электромеханика“, 1959, № 11.
5. Оптимальный воздушный зазор МПТ и роль воздушного зазора в электрической машине вообще
   а) „Электромеханика“, 1958, № 10, № 12.
   б) Электротехнический обзор (ЧССР), 1959, № 10.
6. О числе фаз к. з. ротора АД.
   а) Известия ВЭТА, 1940, т. XXII.
   б) „Электричество“, 1950, № 12.
   в) ВЭП, 1963, № 2.
7. О роли изоляции в электрических машинах и выборе оптимального напряжения.
   а) Сборник по изоляции ЦИНТИ ЭП, т. 4, стр. 233.
   б) Журнал НТО, 1961 , № 11, стр. 22.
   в) „Энергетика“, 1959, № 8 и 1960, № 3.
   г) Журнал „ЭП“, 1960, № 22.
   д) Сборник АН СССР. Высоковольтные ТГ, 1940.

II. Kovács K. P Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen, Будапешт, 1959.
III. Сыромятников И. А. „Электричество“, 1959, № 10.
IV. Постников И. М. „Электричество“, 1961, № 9.
V. Видмар М. Экономические законы проектирования электрических машин, ГТИ, 1924.
VI. Полотовский Л. С. О предельной мощности электрических машин. „Электромеханика“, 1960, № 12.
VII. Бирманс. Сверхтоки, Госэнергоиздат, 1932, стр. 196.
VIII. Суворов В. А. Сравнение методов настройки дополнительных полюсов.
IX. Карасев М. Ф. Коммутация коллекторных машин, ГЭИ, 1961.
X. Вегнер О. Г. Теория и практика коммутации машин постоянного тока, ГЭИ, 1962.
XI. Синельников Е. М., Назикян А. Г. Выбор формы поля дополнительного полюса, „Электромеханика“, 1959, № 11.

Рукопись поступила
3. VII. 1962 г.