

12/11/5

Одобрено кафедрой
«Тяговый подвижной состав»

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Задание на курсовой проект с методическими указаниями
для студентов IV курса сокращенного срока обучения
и студентов V курса
специальности

190303 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭПС)

РОАТ

Москва – 2010

Составитель – д-р техн. наук, проф. Н.А. Ротанов

Рецензент – канд. техн. наук, проф. А.П. Бородин

1. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

1.1. Содержание проекта

Проект выполняется по индивидуальному заданию. В процессе работы студент должен провести поверочный расчет одного из серийных тяговых электрических двигателей (ТЭД) и проверить оптимальность выбора параметров активного слоя его якоря. Результаты расчетов на каждом шаге необходимо сравнивать со справочными данными.

При наличии расхождений в пределах $\pm 10\%$ между расчетными и справочными данными, которые можно объяснить разбросом характеристик исходных материалов, неучетом технологических допусков и т.п., не нужно вносить исправлений в расчет. Достаточно пояснить возможные причины полученного расхождения.

В заданном объеме проекта необходимо выполнить следующие расчеты:

- 1) активного слоя якоря;
- 2) магнитной цепи;
- 3) коммутации;
- 4) потенциальных условий на коллекторе;
- 5) электромеханических характеристик;
- 6) технико-экономических показателей ТЭД.

Для выполнения проекта необходимо изучить учебное пособие [1]. В задании на курсовой проект даны ссылки на страницы, где приводятся пояснения к расчету.

Для выполнения расчетов необходимо взять из прил. 1 к заданию технические данные рекомендованного ТЭД: мощность P_n , напряжение U_p , ток якоря $I_{ян}$, диаметр якоря $D_я$, число полюсов $2p$, число проводников $N_я$, длину пакета якоря $l_я$, число пазов Z , магнитный поток Φ_n , размеры проводника $b_{пр} \times h_{пр}$, ширину и глубину паза $b_п \times h_z$, коэффициент полюсного перекрытия α , воздушный зазор под главным полюсом $\delta_{гп}$, воздушные зазоры под дополнительным полюсом $\delta_д, \delta'_д$.

1.2. Методические рекомендации к оформлению проекта

1. Проект оформляют в виде расчетной записки и чертежей продольного и поперечного разрезов заданного двигателя. Разрешается использовать вклейки, помещенные в конце задания. На разрезах необходимо указать все размеры, которые определены в расчетной записке.

2. Все записи следует делать на одной стороне листа. С правой стороны листа оставить поля шириной 25 – 30 мм.

3. В расчетной записке нужно написать заголовок, отражающий содержание проекта, и поместить бланк индивидуального задания на проект, подписанный преподавателем. Без этого бланка проект не рецензируется.

4. Расчеты выполняют в последовательности, приведенной в методических указаниях. На каждом этапе расчета указывают его порядковый номер и наименование рассчитываемой величины. Затем записывают расчетную формулу или, если требуется, дают ее вывод. В формулах расшифровывают только те символы и числовые коэффициенты, которые не были объяснены на предыдущих этапах расчета или в исходных данных. После этого в формулу подставляют численные значения переменных и, опуская промежуточные вычисления, приводят результат расчета.

5. Все расчеты выполняют с точностью до трех-четырех значащих цифр. При выполнении расчетов на калькуляторах должны быть произведены соответствующие округления.

6. Все таблицы и все рисунки должны быть пронумерованы. Нумерация сквозная. Размещают рисунки и таблицы сразу после ссылки на них в тексте работы или на следующей странице, если они расположены на отдельных листах.

7. Графики выполняют на миллиметровой бумаге карандашом. Координатные оси проводятся по жирным линиям миллиметровой сетки. Масштабы выбирают только из нормального ряда: 1; 2; (2,5); 4; 5×10^n ед/см, где n – любое целое число или 0. Применительно к этому ряду удобно пользоваться масштабами: тока $m_I = 5,0; 10,0$ А/мм; напряжения $m_U = 5,0;$

10,0 В/мм; скорости $m_V=0,5$; 1,0 км/ч/мм; силы тяги $m_F=0,5$; 1,0 кН/мм.

8. Отмеченные рецензентом ошибки должны быть исправлены аккуратно. Для исправлений можно использовать обратную (чистую) сторону предыдущего листа. Нельзя заклеивать или вырывать листы с ошибочными расчетами.

9. Расчеты выполняются в системе СИ.

2. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

2.1. Выбор расчетных параметров

На практике задача проектирования решается, как правило, в виде проработки параллельных вариантов расчета с использованием различных подвариантов в границах каждого варианта. Кроме того, используется положительный опыт проектирования прежних лет в виде различных графиков и эмпирических формул, связывающих одни параметры двигателя с другими. Весь этот материал изложен в [1].

В самом общем случае при существующих мощностях ТЭД рассматривают варианты с числом полюсов $2p=4$ и $2p=6$, просчитывают несколько величин диаметров якоря, варьируют число пазов якоря и раскладку в них проводников. Полученные варианты сравнивают по технико-экономическим показателям [1, с. 3].

Тяговый электрический двигатель является электро-механическим преобразователем. В зависимости от режима работы он преобразует или электрическую энергию в механическую работу (двигательный режим) или механическую энергию в электрическую (генераторный режим).

В основе такого преобразования энергии лежат три фундаментальных закона физики, которые для обмотки якоря, т.е. для набора проводников N , соединенных по определенной схеме, характеризующейся числом параллельных

ветвей $2a$, и вращающихся в магнитном поле Φ с частотой n , имеют вид:

закон Фарадея

$$E = C_n \Phi n, \quad (1)$$

где $C_n = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60}$;

закон Ампера

$$M_{\text{эм}} = C_m \Phi I_{\text{я}}, \quad (2)$$

где $C_m = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi}$;

закон Ома для двигательного режима

$$U = E + I_{\text{я}} r_{\text{д}}. \quad (3)$$

Если обе части выражения (3) умножить на ток, то получим закон сохранения энергии для цепи, в которую включен ТЭД,

$$UI_{\text{я}} = EI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 r_{\text{д}}. \quad (4)$$

В левой части выражения (4) записана потребляемая из сети мощность.

Первое слагаемое правой части ($E I_{\text{я}}$) называют электромагнитной мощностью, т.е. это та мощность, основная часть которой превращается в механическую работу. Второе слагаемое правой части ($I_{\text{я}}^2 r_{\text{д}}$) представляет собой электрические потери, которые превращаются в тепло.

При проектировании ТЭД одной из определяющих исходных величин является полезная мощность ТЭД – номинальная мощность $P_{\text{н}}$. Эта мощность близка к электромагнитной мощности. (При более точном рассмотрении электромагнитная мощность больше полезной на величину магнитных и механических потерь). Рассмотрим, как связана электромагнитная мощность с основными параметрами ТЭД.

В теории электрических машин существует целый ряд фундаментальных величин, количественно характеризующих протекающие в них процессы.

Важнейшей считают линейную нагрузку. Она, в отличие от тока якоря, является той величиной, которая характеризует целый комплекс электромагнитных явлений ТЭД. С физической точки зрения линейная нагрузка A характеризует количество ампер-витков обмотки якоря (точнее, ампер-проводов), приходящееся на 1 см длины окружности сердечника якоря:

$$A = \frac{I_{\text{я}} N}{2a \pi D_{\text{я}}}, \quad (5)$$

где $D_{\text{я}}$ – диаметр якоря, см.

От величины линейной нагрузки зависят:

1. Сила взаимодействия обмотки якоря с магнитным полем главных полюсов, т.е., электромагнитный момент якоря. Поэтому для получения хороших весовых показателей ТЭД значение A нужно стремиться увеличить.

2. Удельная тепловая нагрузка цилиндрической поверхности якоря, которая характеризуется величиной электрических потерь, приходящихся на 1 см² его цилиндрической поверхности $P_{\text{э уд}}$.

Однако величина электрических потерь (закон Джоуля: $P_{\text{эл}} = I^2 R$) зависит еще и от сопротивления обмотки. Поэтому в теории электрических машин есть такое понятие – фактор нагрева ($A j_{\text{я}}$), т.е. произведение линейной нагрузки на плотность тока $j_{\text{я}}$ в обмотке якоря, А/мм².

$$P_{\text{э уд}} = A j_{\text{я}}. \quad (6)$$

Практикой тягового электромашиностроения установлены допустимые значения этой величины для часового режима работы [1, с. 13]. Обращаем внимание на то, что допустимое значение фактора нагрева зависит от рабочего напряжения

ТЭД. Объясняется это тем, что с изменением напряжения изменяются условия охлаждения. Так, например, с увеличением рабочего напряжения увеличивается толщина корпусной изоляции, тогда для сохранения неизменной рабочей температуры обмотки нужно уменьшить величину ее сопротивления (греющую мощность), т.е. уменьшить плотность тока, что и отражено уменьшением фактора нагрева $Aj_{я}$ [1, с. 13].

3. Величина реактивной ЭДС e_p , которая характеризует напряженность коммутации [2, с.42].

Теория коммутации позволяет предсказать нормальную работу щеток только в том случае, если средняя (за период коммутации) или максимальная величина реактивной ЭДС не превосходит определенного предела.

4. Величина поперечной составляющей поля якоря (реакции якоря), которая у машин без компенсационной обмотки ограничивает минимальный коэффициент ослабления возбуждения β_{\min} . От значения β_{\min} зависит степень использования мощности двигателя при высоких скоростях движения.

У машин с компенсационной обмоткой с увеличением A увеличиваются размеры компенсационной обмотки.

Из выражения (5) определяем ток якоря через линейную нагрузку A

$$I_{я} = A \frac{2a\pi D_{я}}{N} . \quad (7)$$

Рассмотрим сомножители, определяющие ЭДС (1) обмотки якоря.

Магнитный поток Φ можно выразить через индукцию в воздушном зазоре B_{δ}

$$\Phi = B_{\delta} \alpha_{\delta} \tau l_{я} , \quad (8)$$

где α_{δ} – расчетный коэффициент полюсного перекрытия;

$$\tau = \frac{\pi D_{я}}{2p} \text{ – полюсное деление, м;}$$

$$l_{я} \text{ – длина сердечника якоря, м.}$$

Расчет величины α_δ довольно сложен [1, с.16], поэтому ее числовое значение целесообразно брать из справочных данных.

Частота вращения связана с окружной скоростью v_y проводника соотношением

$$v_y = \frac{\pi D_y n}{60} . \quad (9)$$

Подставляя величины (1), (7), (8), (9) в выражение электромагнитной мощности (кВт), получим

$$P_{эм} = \alpha_\delta AB_\delta v_y \pi D_y l_y 10^{-3} . \quad (10)$$

Из выражения (10) можно сделать вывод, что для получения при заданной мощности минимальных размеров ТЭД (I_y и D_y) нужно стремиться максимально увеличить:

1. α_δ – **расчетный коэффициент полюсного перекрытия**. Это тоже очень важная (**фундаментальная**) величина. С физической точки зрения эта величина показывает, какая часть из всех проводников обмотки якоря взаимодействует с потоком главных полюсов. Только эта часть проводников создает электромагнитный момент ТЭД (см.формулу 2).

При выборе α_δ приходится учитывать целый ряд ограничений.

Предел увеличению коэффициента α_δ ставит необходимость разместить дополнительные полюсы и создать требуемую кривую распределения индукции в зоне коммутации.

При предварительных расчетах можно пользоваться упрощенной формулой, полученной из опыта проектирования ТЭД

$$\alpha_\delta = 1 - 2,5 \frac{2t_1}{\tau} , \quad (11)$$

где t_1 – зубцовое деление якоря, которое связано с числом пазов Z соотношением

$$t_1 = \frac{\pi D_y}{Z} . \quad (12)$$

2. A – линейную нагрузку и B_{δ} – индукцию в воздушном зазоре.

Как будет показано ниже, величины A и B_{δ} связаны между собой. Причем увеличение одной из них (скажем, A) вызывает необходимость снижать другую (B_{δ}). Поэтому при проектировании ТЭД имеет смысл рассматривать не отдельно A и B_{δ} , а их произведение (AB_{δ}). Нужно стремиться получить (AB_{δ}) максимальным.

3. Максимальную окружную скорость якоря $v_{я}$.

Однако при этом приходится учитывать следующие ограничения:

а) максимальная окружная скорость якоря ограничивается допустимой окружной скоростью коллектора, максимальная окружная скорость которого

$$v_{к\max} = \frac{\pi D_{к} n_{\max}}{60} \leq 52 \div 55 \text{ м/с.} \quad (13)$$

При больших скоростях нарушается токоъем с коллектора.

Соотношение диаметров коллектора и якоря для того, чтобы можно было подключить обмотку якоря к коллекторным пластинам, должно находиться в пределах [1, с.63]

$$\frac{D_{к}}{D_{я}} = 0,75 \div 0,9; \quad (14)$$

б) проверить возможность выполнения зубчатой передачи. При заданной скорости локомотива увеличение частоты вращения якоря приводит к необходимости увеличивать передаточное отношение. Ограничения выбора передаточного отношения рассмотрены в [1, с. 59].

В заключение отметим, что опыт проектирования ТЭД показывает, что для получения хороших массогабаритных показателей соотношение $I_{я}$ и $D_{я}$ нужно выбирать таким образом, чтобы якорь имел максимально возможную длину сердечника ($l_{я}$).

Таким образом, выбрав все величины, входящие в (10) при заданной мощности $P_{н}$ можно определить ориентировочно диаметр сердечника якоря $D_{я}$.

С точки зрения физики явлений, происходящих в ТЭД, диаметр якоря выбирают с расчетом, чтобы можно было разместить якорную обмотку такого сечения, при котором предельно допустимая температура не превышала установленных значений [2, с. 277]. Кроме того, магнитная индукция в зубцах якоря должна быть такой, чтобы не было их чрезмерного нагрева при вращении якоря [1, с.73]. В ряде случаев индукция в зубцах якоря уменьшается для получения характеристик ТЭД с меньшей жесткостью.

2.2. Расчет зубцового слоя якоря

При проектировании ТЭД одной из важнейших задач является выбор параметров зубцового слоя якоря: числа зубцов Z , числа проводников в пазу u_n , глубины паза h_n .

Выбор при принятом диаметре якоря числа зубцов Z и, следовательно, величины зубцового деления t_i (12) является одной из трудных задач, которую приходится решать при проектировании ТЭД. С этой задачей тесно связана и другая – выбор числа проводников обмотки якоря N , решение которой рассмотрено ниже. При выбранном числе N с уменьшением числа пазов Z будет увеличиваться число проводников в пазу. Следствием этого будет уменьшение количества корпусной изоляции, закладываемой в якорь, так как один слой корпусной изоляции будет охватывать большее количество проводников и суммарное число слоев изоляции на окружности якоря будет уменьшаться. Этот фактор улучшает использование активного слоя якоря. Большим достоинством малого числа зубцов является также удешевление штампов для изготовления листов сердечника якоря и упрощение сборки якоря.

Вместе с тем, увеличение зубцового деления t_i приводит к расширению зоны коммутации (2.114) [1, с. 98] (увеличение числа коллекторных пластин, приходящихся на паз u_k). За счет этого уменьшается коэффициент полюсного перекрытия α_δ . Кроме того, с увеличением числа проводников в пазу u_n для сохранения неизменной температуры обмотки нужно умень-

шать плотность тока в проводнике, т.е. увеличивать сечение меди. Этот второй фактор вызывает ухудшение использования меди обмотки, а следовательно, и активного слоя якоря.

Таким образом, выбор оптимального числа зубцов Z можно производить только на основании сравнения технико-экономических показателей вариантов с различным числом зубцов. В литературе результаты этого расчета приводятся в виде графика [1, с. 75, рис. 2.11]. Решать задачу выбора числа Z в курсовом проекте не требуется. Оно должно быть взято из технических данных ТЭД.

При выборе числа активных проводников обмотки якоря N , которое связано с числом проводников в пазу $u_{\text{п}}$ соотношением

$$N = u_{\text{п}} Z, \quad (15)$$

фактически решается задача определения наивыгоднейших соотношений между шириной зубца и шириной паза, т.е. определяется, какую часть зубцового деления целесообразно занять медью якорной обмотки и какую – сталью зубца. Из рассмотрения основных законов (1) и (2) следует, что для получения полезного эффекта ($M_{\text{эм}}$ и E) совершенно безразлично, как будет выбрано: большой магнитный поток Φ и малые коэффициенты $C_{\text{п}}$ и $C_{\text{м}}$ (за счет малого числа проводников N) или наоборот. Если мы зададимся большим магнитным потоком Φ , то придется увеличивать сечение всех участков магнитопровода, и в первую очередь наиболее напряженного в магнитном отношении участка – зубцового слоя (за счет увеличения ширины зубца).

Число активных проводников N можно будет уменьшить, что приведет к уменьшению ширины паза и экономии меди. Какой из рассмотренных факторов будет оказывать большее влияние на величину диаметра якоря (увеличение ширины зубца или уменьшение ширины паза), зависит от большого количества факторов.

Аналитическое решение задачи об оптимальном использовании зубцового деления t_i (получение максимального удель-

ного момента, т.е. момента, отнесенного к одному зубцовому делению) приведено в [1, с. 21]. Более наглядно рассматриваемую задачу решать графически. Для этого нужно задаться различным числом проводников в пазу ($u_{\text{п}}$) и рассчитать A при неизменном числе зубцов Z по формулам (5) и (15).

При расчете используют еще одну фундаментальную величину – *тепловую нагрузку якоря, характеризуемую фактором нагрева ($Aj_{\text{я}}$)* [1, с.13]. Выбрав фактор нагрева ($Aj_{\text{я}}$), можно определить плотность тока

$$j_{\text{я}} = \frac{(Aj_{\text{я}})}{A} \quad (16)$$

и при заданном номинальном токе якоря сечение проводника якорной обмотки.

$$q = \frac{I_{\text{я}}}{2aj_{\text{я}}}. \quad (17)$$

Геометрические размеры паза определяют при размещении проводников с их изоляцией [1, с. 79]. При этом приходится решать очень важную задачу – выбор глубины паза (высоты зубца) h_z . С точки зрения использования активного слоя якоря глубину паза нужно стремиться максимально увеличить, т.е. применять для проводников медную шину малой толщины и большой высоты. Паз при этом получится глубокий и малой ширины. Однако при таком пазе увеличивается реактивная ЭДС, которая характеризует напряженность коммутации. Практика проектирования ТЭД выработала рекомендации [1, с. 77, формула (2.47)]. При выполнении курсового проекта глубина паза во всех вариантах расчета должна оставаться неизменной – заданной.

Ширина зубца якоря у основания

$$b_z = \frac{\pi(D_{\text{я}} - 2h_z)}{Z} - b_n. \quad (18)$$

По условиям магнитного насыщения и механической прочности нужно, чтобы $b_z \geq b_n - 0,2$.

Ширина зубца якоря на высоте $1/3 h_z$ от его основания

$$b_{\frac{1}{z_3}} = \frac{\pi(D_{я} - 1,33h_z)}{Z} - b_n. \quad (19)$$

Далее выбирают индукцию в расчетном сечении зубца на $\frac{1}{3}$ высоты [1, с. 81, формула (2.51)]. От величины этой индукции зависят потери в стали зубца и добавочные потери в меди и, следовательно, нагревание ТЭД.

Выбрав индукцию $B_{\frac{1}{z_3}}$, через геометрический размер t_1 можно определить индукцию в воздушном зазоре (над коронкой зубца) B_δ ;

$$B_\delta = B_{\frac{1}{z_3}} k_c \frac{b_{\frac{1}{z_3}}}{t_1}, \quad (20)$$

где $k_c \approx 0,94$ – коэффициент заполнения сердечника якоря сталью.

Индукция B_δ является одним из множителей показателя (AB_δ) , характеризующего использование активного слоя якоря.

Определяют оптимальное число проводников в пазу, т.е. наивыгоднейшее соотношение между сталью и медью, строя зависимости $A(u_n)$, $B_\delta(u_n)$ и $[AB_\delta](u_n)$ и графически определяют максимум.

В ряде случаев приходится отступать от наивыгоднейших (с точки зрения габаритов ТЭД) соотношений между сталью и медью. Объясняется это наличием ряда ограничений:

1. Для устранения круговых огней на коллекторе среднее межламельное напряжение не должно превышать определенных пределов [1, с. 62]. В этом случае минимально возможное число коллекторных пластин определяется по формуле (2.9) [1, с. 62].

$$K_{\min} = \frac{2pU_n}{e_{cp}},$$

где e_{cp} – среднее межламельное напряжение;

$e_{cp} \leq 19 \div 20$ В – для компенсированных машин;

$e_{cp} \leq 16 \div 18$ В для некомпенсированных машин.

Минимально допустимая величина линейной нагрузки связана с K_{\min} соотношением

$$A_{\min} = \frac{I_{\text{я}}}{2a} \frac{2K_{\min}}{\pi D_{\text{я}}}. \quad (21)$$

2. С увеличением A увеличивается число проводников обмотки якоря и, следовательно, число коллекторных пластин. Может возникнуть трудность изготовления коллектора с нужным числом коллекторных пластин. Минимальное коллекторное деление по технологическим соображениям (по условиям соединения коллекторной пластины с проводником обмотки) должно быть не менее $4 \div 4,5$ мм

$$t_{\text{кmin}} = \frac{\pi D_{\text{к}}}{K_{\max}}. \quad (22)$$

С учетом (22) можно определить максимально допустимое по исполнению коллектора число коллекторных пластин K_{\max} и соответствующую ему максимально возможную линейную нагрузку A_{\max} (см. формулу 21).

$$K_{\max} = \frac{\pi D_{\text{к}}}{t_{\text{кmin}}}. \quad (23)$$

Таким образом, расчет ТЭД – задача, аналогичная решению одного уравнения со многими неизвестными. Это приводит к тому, что приходится задаваться целым рядом величин ($D_{\text{я}}, p, j_{\text{я}}; \dots$) и проверять правильность выбора в дальнейшем. Практика тягового электромашиностроения установила возможные рекомендуемые удельные нагрузки и создала ряд формул, ставящих одни параметры и величины в зависимость от других.

Однако еще раз следует отметить, что установленные практикой зависимости не всегда могут охватить все многообразие связей, применение новейших материалов, изменения в конструкции и технологии производства ТЭД.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Как было показано ранее, расчет ТЭД проводится с учетом опыта ранее спроектированных двигателей, изложено в справочной литературе [1] в виде графиков, таблиц, эмпирических формул и т.п. Все эти данные, согласно старому ГОСТ-2582-66, относятся к часовому режиму. Согласно ГОСТ-2582-81 за номинальный режим работы электровозных двигателей принят длительный режим работы.

Как поступить в таком случае? Возможны два выхода:

- справочные данные пересчитать на длительный режим;
- принять за расчетный режим часовой и пользоваться исходными справочными данными для этого режима.

Студенту предоставляется право выбора любого из этих вариантов. В методических указаниях у расчетных величин отсутствует индекс режима, однако нужно помнить, что числовые значения этих величин относятся к одному из расчетных режимов (длительному или часовому).

Шаг 1. Расчет геометрических размеров активного слоя якоря

Технико-экономические показатели ТЭД во многом зависят от того, как спроектирован активный слой якоря, т.е. от геометрических размеров зубцов и пазов с уложенной в них обмоткой. В шаге необходимо при заданном проводнике обмотки якоря определить геометрические размеры паза и зубца заданного двигателя и нарисовать эскиз паза со строгим соблюдением масштаба. Для этого нужно определить суммарную толщину изоляции [1, с. 79] и суммарные размеры меди обмотки по ширине и высоте паза.

После этого необходимо определить геометрию активного слоя при числе проводников обмотки якоря, отличающемся от заданного. Для этого нужно задаться числом проводников в пазу (оно должно быть четным), отличающимся от заданного в большую и меньшую сторону.

При этом соблюдаем следующие условия:

- учитывая то, что выбор числа пазов якоря является задачей очень сложной [1, с. 9], число пазов якоря оставляем неизменным;

- нагревание обмотки якоря, определяемое тепловым фактором $Aj_{я}$ [1, с. 13], нужно сохранять неизменным. Выполнить это требование можно только при одном условии: с изменением числа проводников и, следовательно, линейной нагрузки необходимо изменять плотность тока [1, с. 14];
- глубина паза, с которой связана величина реактивной ЭДС, характеризующая напряженность коммутации, во всех вариантах должна оставаться постоянной.

При изменении числа проводников в пазу нужно для каждого варианта, сохраняя способ укладки проводников в паз [1, с. 78], определить допустимую плотность тока в проводнике обмотки якоря. По плотности тока определяется поперечное сечение проводника. На основании полученного поперечного сечения, с учетом ГОСТ [1, с. 603], определяются геометрические размеры проводника.

Шаг 2. Определение показателя использования якоря при различном числе проводников в пазу

Показатель использования якоря (AB_{δ}) изменяется нелинейно с изменением числа проводников. Объясняется это тем, что с изменением числа проводников изменяются оба сомножителя A и B_{δ} , где линейная нагрузка A прямо пропорциональна числу проводников [1, с. 11].

Индукция в воздушном зазоре B_{δ} связана с числом проводников обратной зависимостью. На [1, рис. 1.2.] показано прохождение магнитного потока в пределах одного зубцового деления. Учитывая, что магнитная проводимость воздуха и меди на несколько порядков меньше, чем проводимость стали, весь магнитный поток проходит практически через зубец. Площадь поперечного сечения зубца при его клиновидной форме различна по высоте, поэтому магнитная индукция, от которой зависят падение магнитодвижущей силы (МДС) при прохождении магнитного потока и нагревание зубца, будет наибольшей у ножки зубца и наименьшей – у коронки. Обычно при расчетах реальный зубец заменяется эквивалентным зубцом прямоугольного сечения, ширина которого равна ши-

рине действительного зубца на высоте $1/3$ от основания (расчетное сечение реального зубца).

Практика проектирования ТЭД показывает, что для избежания больших потерь в стали и добавочных в меди обмотки, из-за вытеснения магнитного потока в паз, магнитная индукция для сталей Э21, Э22 не должна быть более $2,1 \div 2,3$ Тл. Тогда, зная (или задавшись) индукцию в расчетном сечении зубца и учитывая свойство неразрывности магнитных силовых линий, можно определить индукцию в воздушном зазоре по формуле (20). В результате можно определить показатель использования якоря (AV_δ) в функции числа проводников в пазу. Оптимум этой величины определяется графически. При этом необходимо учитывать допустимые границы изменения линейной нагрузки от A_{\min} до A_{\max} .

Шаг 3. Расчет магнитной цепи ТЭД

Цель расчета состоит в определении размеров магнитопровода и числа витков катушки главных полюсов. Расчет состоит из двух этапов.

На первом этапе разрабатывают эскиз магнитной цепи ТЭД. Исходной величиной для расчета является магнитный поток ТЭД- Φ , который определяют из выражений (1) и (3). Величину r_d (сопротивление обмоток двигателя) берут из справочных материалов.

При разработке эскиза за основу принимают вклейку с разрезом ТЭД, прилагаемую к заданию на проект, или один из эскизов [1, с. 132], соответствующий типу заданного ТЭД. Эти эскизы соответствуют ТЭД с разным числом полюсов (рис. 2.46 – $2p=4$, остальные – $2p=6$) и наличием или отсутствием компенсационной обмотки. Зная величину диаметра якоря заданного ТЭД, можно установить масштаб эскиза и в нем нарисовать все участки магнитной цепи. Цепь разбирают на ряд характерных участков: сердечник (ярмо) якоря, зубцовый слой якоря, воздушный зазор, зубцовый слой компенсационной обмотки, сердечник главного полюса, выход

из полюса, ярмо (спинка) остова. Поперечные размеры всех участков (кроме зубцов якоря и воздушного зазора, которые были рассмотрены ранее) определяют исходя из допустимых величин индукций в них. Выбор допустимой индукции производят исходя из учета целого ряда факторов: магнитных потерь, которые определяют нагревание, падения МДС, от которых зависит число витков катушки главного полюса и регулировочные свойства ТЭД, степени насыщения магнитопровода, что важно для участков магнитопровода, по которым одновременно проходят потоки главных и дополнительных полюсов. Рекомендуемые индукции можно взять из [1, § 12.2, с. 131] или из справочных данных. Для каждого участка нужно приводить обоснование выбора величины индукции, т.е. указывать конкретный критерий, по которому она была выбрана.

Эскиз магнитной цепи выполняют на миллиметровой бумаге в масштабе 1:2 для одной половины полюсного деления τ . Необходимо показать среднюю силовую линию каждого участка и с помощью масштаба графически определять ее длину, которую указать на эскизе.

Второй этап расчета опирается на фундаментальный закон физики – закон полного тока, который в данном случае позволяет определить магнитодвижущую силу катушки главного полюса. Согласно этому закону сумма падений магнитного напряжения по замкнутой цепи равна полному току (ампервиткам), охватывающему данную магнитную цепь [1, с. 140].

Обычно расчет выполняют для одного полюса, учитывая тем самым падение магнитного напряжения только в одной, симметричной половине замкнутой магнитной цепи и определяя магнитодвижущую силу катушки только одного полюса.

При холостом ходе, т.е. при отсутствии размагничивания полей якоря, сумма падений магнитного напряжения, отнесенная к одному полюсу, равна [1, с. 142]:

$$\Sigma F_{xx} = HL_j + H_m L_m + H'_j L'_j + H_{z_{\text{ко}}} h_{z_{\text{ко}}} + H_z h_z + H_{\text{я}} L_a + F_{\delta} + 80 B_m, \quad (24)$$

где $H_j, H_m, H'_j, H_{z_{\text{ко}}}, H_{z_s}, H_{\text{я}}$ – удельные падения магнитного напряжения (или, что то же самое, напряженности) соответственно в остова, сердечнике полюса, стыке полюса с ярмом, зубцовом слое компенсационной обмотки, зубцах и сердечнике якоря, А/см;

F_{δ} – падение магнитного напряжения в воздушном зазоре, А;

B_m – магнитная индукция в месте стыка сердечника полюса и остова, Тл.

Величину F_{δ} определяют из выражения

$$F_{\delta} = 0,8 B_{\delta} \delta_p 10^4, \quad (25)$$

где δ_p – расчетный зазор, см.

Обращаем внимание на то, что формула (25) выведена для равномерного воздушного зазора, заключенного между гладкими поверхностями. При равномерном зазоре δ , заключенном между зубчатыми поверхностями, учет некоторого увеличения длины части силовых линий у края зубца [1, с.14, рис. 1.2] производят коэффициентом k_{δ} , при этом вводят понятие «расчетный (фиктивный) зазор» δ_p

$$\delta_p = \delta k_{\delta}, \quad (26)$$

где k_{δ} – коэффициент воздушного зазора, учитывающий повышение падения магнитного напряжения из-за зубчатой формы активного слоя ТЭД, равный [1, с.155]

$$k_{\delta} = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{z1} + 10\delta} \cdot \frac{t_{\text{ко}} + 10\delta}{b_{z_{\text{ко}}} + 10\delta}, \quad (27)$$

где $t_{\text{ко}}$ – зубцовое деление компенсационной обмотки, см;

$b_{z1}, b_{z_{\text{ко}}}$ – ширина зубцов якоря и компенсационной обмотки по окружности якоря, см.

Определение падения магнитного напряжения в неравномерном воздушном зазоре представляет собой очень сложную задачу. При выполнении проекта неравномерный воздушный зазор необходимо привести к эквивалентному (по падению магнитного напряжения) равномерному воздушному зазору, используется коэффициент k_3 [1, с. 39].

Величина $80 B_m$ в выражении (24) приближенно учитывает падение магнитного напряжения между сердечником полюса и остовом из-за их неидеально плотного прилегания.

Удельное падение магнитного напряжения (напряженность) H на каждом участке зависит от величины индукции и материала магнитопровода. Задавшись величиной магнитного потока с учетом потока рассеяния, если он есть на данном участке, и зная площадь поперечного сечения участка, определяют индукцию на участке. Напряженность определяют по кривым (таблицам) намагничивания сталей, полученным опытным путем [1, с. 598].

Расчеты по формуле (24) рекомендуется свести в таблицу вида табл. 2.8 [1, с. 142].

Для расчета катушки возбуждения к $\sum F_{xx}$ нужно добавить размагничивающую составляющую поперечной реакции якоря (при отсутствии компенсационной обмотки) и некоторую дополнительную МДС для учета технологических отступлений при производстве двигателя и отклонений от расчетных магнитных свойств стали.

Тогда полная МДС будет равна

$$F_B = \sum F_{xx} + k_{ря} F_{ря} + k_0 \sum F_{xx}, \quad (28)$$

где $k_0 = 0,02$ – коэффициент учета дополнительной МДС.

Учет размагничивающего действия поля якоря у ТЭД без компенсационной обмотки можно производить, пользуясь коэффициентом размагничивающего действия поля якоря $k_{ря}$ [1, с. 148, рис. 2.55]. При наличии компенсационной величины [1, с. 149]

$$k_{\text{ря}} F_{\text{ря}} \approx (0,03 \div 0,05) A \frac{\tau}{2}. \quad (29)$$

Полная МДС якоря равна [1, с. 117]

$$F_{\text{ря}} = \frac{I_{\text{я}} N}{a 8 p}. \quad (30)$$

При учете размагничивающего влияния поля якоря коэффициентом $k_{\text{ря}}$ расчет приходится выполнять методом последовательных приближений.

Магнитную цепь машины оценивают «коэффициентом насыщения» $K_{\text{н}}$, который является очень важной величиной, так как характеризует использование мощности ТЭД при высоких скоростях движения [1, с. 27],

$$K_{\text{н}} = \frac{F_{\text{в}}}{F_{\delta}}. \quad (31)$$

Для получения больших тяговых усилий в области высоких скоростей $K_{\text{н}}$, желательно иметь 1,5–1,8.

По закону полного тока сумма падений МДС должна быть равна МДС обмотки возбуждения одного полюса, т.е.

$$F_{\text{в}} = I_{\text{в}} W_{\text{в}}, \quad (32)$$

откуда число витков катушки главного полюса

$$W_{\text{в}} = \frac{F_{\text{в}}}{I_{\text{н}} \beta_{\text{п}}}, \quad (33)$$

где $\beta_{\text{п}}$ – коэффициент постоянного ослабления возбуждения для двигателей пульсирующего тока. В двигателях постоянного тока $\beta_{\text{п}} = 1$.

Шаг 4. Расчет характеристики намагничивания

Учитывая то, что на магнитный поток двигателя влияет поле якоря [2, с. 14], магнитные свойства ТЭД описывают тремя характеристиками:

- 1) характеристикой намагничивания (при $I_{\text{я}} = 0$);
- 2) магнитной характеристикой (при $I_{\text{в}} = I_{\text{я}}$),
- 3) нагрузочными характеристиками (при $I_{\text{я}} = \text{const}$).

Характеристика намагничивания, т.е. зависимость магнитного потока от тока намагничивания, является основной, определяющей все остальные характеристики ТЭД. На шаге 3 была определена одна точка характеристики намагничивания, соответствующая номинальному режиму.

При расчете характеристики намагничивания нужно помнить о различии между МДС (током) намагничивания и МДС (током) возбуждения. МДС обмотки возбуждения затрачивается, во-первых, на проведение магнитного потока по магнитной цепи и, во вторых, на компенсацию поля якоря

$$I_{\text{в}} W_{\text{в}} = I_{\mu} W_{\text{в}} + k_{\text{ря}} F_{\text{ря}}. \quad (34)$$

Ток возбуждения $I_{\text{в}}$ в этом случае связан с током намагничивания соотношением

$$I_{\text{в}} = I_{\mu} + \frac{k_{\text{ря}} F_{\text{ря}}}{W_{\text{в}}}. \quad (35)$$

Расчет заключается в определении потерь МДС для различных значений магнитного потока на полюс 0,25; 0,75; 1,15 от $\Phi_{\text{н}}$ при токе якоря, равном 0.

Расчет удобно вести в виде таблицы, которую нужно самостоятельно составить на основании табл. 2.8 [1, с. 142]. Причем последние две строки этой таблицы на данном шаге не заполняются. В третьей строке от конца таблицы указывают ток намагничивания, определяемый из выражения

$$I_{\mu} = \frac{F_{\mu}}{W_{\text{в}}}. \quad (36)$$

Шаг 5. Расчет магнитной характеристики машины

Магнитная характеристика используется в дальнейшем для построения скоростных характеристик. Для ТЭД с компенса-

ционной обмоткой эта характеристика совпадает с характеристикой намагничивания, т.е. $I_B = I_\mu$. Для ТЭД без компенсационной обмотки размагничивающее влияние поля якоря учитывается коэффициентом $k_{ря}$. Значение $k_{ря}$ нужно определять с учетом уровня насыщения зубцового слоя [1, с. 148]. Расчет выполняют методом последовательных приближений. На основании этих расчетов с использованием формулы (30) заполняют две последние строки таблицы шага 4. Так как магнитная характеристика используется в дальнейшем для построения скоростных характеристик, то удобнее пользоваться зависимостью в виде функции $C_n \Phi(I_B)$.

Конструктивная постоянная машины.

$$C_n = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60}. \quad (37)$$

Шаг 6. Расчет коммутации

Целью данного расчета является определение ширины зоны коммутации и величины реактивной ЭДС. По ширине зоны коммутации в дальнейшем определяют ширину наконечника дополнительного полюса.

Величину реактивной ЭДС используют:

- 1) для оценки напряженности коммутации при сравнении вариантов расчетов ТЭД;
- 2) как исходную величину при определении числа витков дополнительного полюса.

Расчет коммутации рассмотрен подробно в [1, главе 10, с. 98-116]. Физическую картину возникновения реактивной ЭДС иллюстрирует [1, рис. 2.25, с. 101]. При этом нужно хорошо представлять разницу тех условий, при которых наводится ЭДС вращения в рабочих секциях обмотки якоря (в секциях, находящихся в зоне магнитного потока главного полюса) и реактивная ЭДС, наводимая в коммутируемых секциях. Коммутируемые секции расположены на геометрической нейтрали под дополнительными полюсами.

Из всех рассматриваемых методов применительно к курсовому проекту подходит метод А.Б.Иоффе [1, с. 114]. При

расчете реактивной ЭДС по формуле (2.164) предварительно нужно определить сумму магнитных проводимостей λ (точнее, — удельных проводимостей, т.е. проводимость единицы длины коммутируемой секции). Для расчета величины λ нужно выполнить со строгим соблюдением масштаба эскиз, аналогичный [1, рис. 2.34, с. 115]. На эскизе необходимо показать три силовые линии, соответствующие магнитным потокам коммутируемой секции в трех характерных участках паза. Четвертым участком являются лобовые части обмотки.

При определении проводимости части паза, занятой медью, нужно учитывать вытеснение тока в проводнике при коммутации. Это явление учитывается коэффициентом k_j , который определяют графически [1, с. 111, рис. 2.32]. На графике по оси абсцисс отложена величина приведенной высоты проводника ξ , определяемая по формуле [1, с.110, 2.142]. Пример расчета рассматриваемых зависимостей приведен в [1, с. 249]. При этом нужно учитывать, что размеры паза в штампе больше размеров в свету на 0,2 мм.

Шаг 7. Расчет дополнительных полюсов

Дополнительные полюсы должны создавать в зоне коммутации магнитное поле с индукцией в зазоре B_k , достаточной для наведения коммутирующей ЭДС e_k , равной и противоположно направленной реактивной ЭДС [1, с. 121]:

$$e_k = e_p = 2B_k l_y w_c v_{яч}. \quad (38)$$

Здесь l_y в м; $v_{яч}$ — м/с. Отсюда (так как $e_p = e_k$)

$$B_k = \frac{e_p}{2l_y w_c v_{яч}}. \quad (39)$$

Ширину наконечника дополнительного полюса b_d берут несколько меньше $b_{эк}$ [1, с.99, (2.116)]

$$b_d = b_{эк} - (3 \div 3,5) \delta_d \quad (40)$$

из-за так называемого краевого эффекта [1, с. 12, рис. 2,37,6].

Воздушный зазор под дополнительным полюсом со стороны якоря δ_d для компенсированных машин принимается $9 \div 10$ мм, так как при меньших зазорах будет сильно сказываться насыщение стальных участков цепи дополнительного полюса. Кроме того, для уменьшения потоков рассеяния применяется второй воздушный зазор δ'_d между сердечником дополнительного полюса и остовом ($4 \div 6$ мм).

Ширину сердечника дополнительного полюса b_{md} определяют по допустимой в нем индукции B_d . Для обеспечения удовлетворительной коммутации при перегрузках магнитная цепь дополнительных полюсов не должна быть насыщенной. В частности, индукцию в сердечнике дополнительных полюсов при часовом режиме не следует допускать более $B_d < 0,6 \div 0,7 T_d$.

Расчетная индукция в сердечнике полюсов B_d в большой степени зависит от потоков рассеяния и может быть определена по формуле

$$B_d \approx B_k \sigma_d \frac{b_d + 3\delta'_d}{b_{md}} \cdot \frac{l_y}{l_d}, \quad (41)$$

где σ_d — коэффициент рассеяния дополнительных полюсов.

Для точного определения значения σ_d необходимо определить проводимость на пути потока рассеяния [1, с.121].

При выполнении курсового проекта можно задаться $\sigma_d = 2 \div 3$. Задавшись величиной B_d по формуле (41) можно определить ширину сердечника. Следует иметь в виду, что сердечник дополнительного полюса у тяговых двигателей, предназначенных для электровозов переменного тока, выполняется шихтованным.

Магнитодвижущая сила, необходимая для создания индукции B_k при наличии компенсационной обмотки и второго воздушного зазора, равна

$$F_{\text{д}} = F_{\text{ря}} - F_{\text{ко}} + F_{\text{од}} + F'_{\text{од}}. \quad (42)$$

где $F_{\text{ря}} = A \frac{\tau}{2}$ – МДС реакции якоря под серединой дополнительного полюса, А;

$F_{\text{од}}$ – падение магнитодвижущей силы в воздушном зазоре со стороны якоря, А;

$F'_{\text{од}}$ – то же, со стороны остова, А;

$F_{\text{ко}}$ – МДС компенсационной обмотки, равная

$$F_{\text{ко}} = N_{\text{ко}} I_{\text{я}}. \quad (43)$$

Здесь $N_{\text{ко}}$ – число проводников одной катушки компенсационной обмотки.

При определении значения $N_{\text{ко}}$ нужно помнить, что на полюсе располагаются витки двух компенсационных обмоток.

Два последних слагаемых определяют из выражения

$$F_{\text{кд}} = 0,8 B_{\text{к}} \delta_{\text{д}} k_{\delta_{\text{д}}} k' 10^4, \quad (44)$$

$$F'_{\delta_{\text{д}}} = 0,8 B_{\text{д}} \delta'_{\text{д}} \frac{b m_{\text{д}}}{b_{\text{мд}} + 3\delta'_{\text{д}}} 10^4, \quad (45)$$

где $\delta_{\text{д}}$ и $\delta'_{\text{д}}$ – в см;

$k' = 1,03 \div 1,05$ – коэффициент, учитывающий производственные отклонения в величине зазора;

$k_{\delta_{\text{д}}} = \frac{t_1 + 10\delta_{\text{д}}}{b_{\text{з1}} + 10\delta_{\text{д}}}$ – коэффициент воздушного зазора.

Воспользовавшись законом полного тока ($I_{\text{я}} W_{\text{д}} = F_{\text{д}}$) можно определить число витков дополнительного полюса

$$W_{\text{д}} = \frac{F_{\text{д}}}{I_{\text{д}}}. \quad (46)$$

Шаг 8. Оценка потенциальных условий на коллекторе ТЭД

На данном шаге оценивают устойчивость ТЭД против образования кругового огня на коллекторе.

Практика эксплуатации ТЭД показывает, что вероятность кругового огня на коллекторе будет достаточно низкая, если его параметры выбираются такими, чтобы не была превзойдена допустимая величина максимального напряжения между смежными коллекторными пластинами [1, с. 33].

$$\Delta U_{\text{к max}} \leq 35 \div +37 \text{ В.}$$

Каким образом можно определить $\Delta U_{\text{к max}}$? Если пренебречь падением напряжения в секции якорной обмотки, то напряжение между двумя любыми коллекторными пластинами будет равно той ЭДС, которая наводится в проводниках при их вращении в магнитном поле. Эту ЭДС в любой точке полюсного деления можно определить, пользуясь законом Фарадея:

$$e_x \approx \Delta u_{\text{кx}} = 2 \frac{P}{a} w_c B_x v_{\text{я}} l_{\text{я}}, \quad (47)$$

где w_c — число витков в секции;

B_x — текущее значение индукции в воздушном зазоре машины в месте, отстоящем от осевой линии полюса на расстоянии x , Тл;

$l_{\text{я}}$ — активная длина проводника обмотки якоря, м;

$v_{\text{я}}$ — окружная скорость якоря, м/с.

При проектировании пользуются понятием среднего межламельного напряжения, которое определяют

$$\Delta U_{\text{к ср}} = \frac{2pU_{\text{к}}}{K}, \quad (48)$$

где $U_{\text{к}}$ — напряжение, подводимое к коллектору, В;

K — число коллекторных пластин.

Среднее напряжение между коллекторными пластинами является фиктивной величиной, так как в этом случае принимают согласно формуле (47), что индукция главного полюса распределяется равномерно по всему полюсному делению, включая зону коммутации. При таких условиях работа ТЭД принципиально невозможна.

Для эксплуатационника важно знать действительное распределение напряжения между коллекторными пластинами, его максимальную величину, которая будет определять вероятность появления кругового огня на коллекторе. Кроме того, важно понимать зависимость рассматриваемых величин от режима работы ТЭД (полное или ослабленное возбуждение) и от величины напряжения, подводимого к коллектору.

Рассматривая формулу (47) понятно, что получить ответ на все поставленные вопросы можно только, определив величину индукции B_x в любой точке воздушного зазора. Для этого воспользуемся соотношением [1, с. 40,(1.79)]

$$B_x = \mu_0 H_x, \quad (49)$$

где $\mu_0 = 0,4 \pi \cdot 10^{-6}$ – магнитная проницаемость воздуха;
 H_x – напряженность поля в воздушном зазоре на расстоянии x от оси полюса, А/м.

Обычно при определении межламельного напряжения пренебрегают падением магнитного напряжения в стальных участках магнитопровода, считая, что вся МДС обмотки возбуждения прикладывается к воздушному зазору. Тогда расчетная формула с учетом искажающего влияния поля якоря (для ТЭД без компенсационной обмотки) приобретает вид [1, с. 41]

$$B_{xH} = \mu_0 \frac{F_B \pm xA}{k_{\delta x} \delta_x}, \quad (50)$$

где F_B – МДС обмотки возбуждения;
 $k_{\delta x}$ – коэффициент воздушного зазора, учитывающий зубчатость якоря.

При неравномерном воздушном зазоре $k_{\delta x}$ переменен и зависит от величины воздушного зазора в рассматриваемой точке x :

$$k_{\delta x} = \frac{t_1 + 10\delta_x}{b_{z1} + 10\delta_x}, \quad (51)$$

где $b_{z1} = \frac{\pi D_{я}}{Z} - b_{п}$ – ширина зубца якоря у его вершины;

$$t_1 = \frac{\pi D_{я}}{Z} - \text{зубцовое деление якоря.}$$

С точки зрения улучшения потенциальных условий желательно иметь более равномерное распределение напряжения по коллектору ТЭД. Обеспечить это требование можно двумя принципиально отличными способами.

При первом способе применяют компенсационную обмотку и тем самым устраняют причину (реакцию якоря – xA), вызывающую неравномерность распределения индукции в воздушном зазоре. Формула (50) приобретает вид:

$$B_{xH} = \mu_0 \frac{F_B \pm xA + xA_{ко}}{k_{\delta} \delta}. \quad (52)$$

Воздушный зазор δ под главным полюсом при этом способе равномерный.

При втором способе улучшения потенциальных условий на коллекторе влияние поперечной реакции якоря на поле главных полюсов уменьшается за счет неравномерного воздушного зазора. Причем с удалением от центра полюса влияние поля якоря изменяется линейно (xA). Воздушный зазор по технологическим соображениям увеличивают по квадратичной зависимости. Для эксцентричного зазора зависимость его величины от местоположения относительно осевой линии полюса описывают выражением [2, с. 37]

$$\delta_x = \delta_0 \left[1 + \left(\frac{\delta_{кр}}{\delta_0} - 1 \right) \left(\frac{2x}{b_p} \right)^2 \right], \quad (53)$$

где δ_x – зазор на расстоянии x от оси полюса;

$\delta_{кр}$ – зазор под краем полюса;

δ_0 – зазор под серединой полюса;

b_p – действительная (геометрическая) полюсная дуга.

При определении b_p нужно понимать различие между расчетной b_δ и действительной (реальной) b_p полюсными дугами [1, с. 16]. Подставляя (53) и (51) в формулу (50), получим расчетную формулу для определения индукции B_x в любой точке x под главным полюсом для ТЭД без компенсационной обмотки:

$$B_{xH} = \mu_0 \frac{F_B \pm xA}{D}, \quad (54)$$

$$\text{где } D = \frac{t_1 + 10\delta_0 \left[1 + \left(\frac{\delta_{\text{кр}}}{\delta_0} - 1 \right) \left(\frac{2x}{b_p} \right)^2 \right]}{b_{z1} + 10\delta_0 \left[1 + \left(\frac{\delta_{\text{кр}}}{\delta_0} - 1 \right) \left(\frac{2x}{b_p} \right)^2 \right]} \times \delta_0 \left[1 + \left(\frac{\delta_{\text{кр}}}{\delta_0} - 1 \right) \left(\frac{2x}{b} \right)^2 \right]$$

$$\text{при } -\frac{b_p}{2} \leq x \leq +\frac{b_p}{2}.$$

Определив индукцию B_x по формуле (54), рассчитываем напряжение (ЭДС) между соседними коллекторными пластинами в любой точке x под главным полюсом.

На данном шаге нужно определить $\Delta U_{\text{к ср}}$ заданного ТЭД и построить потенциальные диаграммы вида [2, рис. 2.11] при заданном в индивидуальном задании $U_{\text{др}}$ при полном и ослабленном возбуждении (при $\beta_{\text{min p}}$). Для ТЭД с компенсационной обмоткой нужно построить две диаграммы – при отключенной компенсационной обмотке и при ее включении. При включенной компенсационной обмотке индукцию в воздушном зазоре можно принимать постоянной по полюсной дуге или вести расчет по методике [2, с. 52].

Расчетная формула (54) выведена для случая, когда начало координатных осей расположено под серединой главного полюса. Для удобства последующего построения графика начало координатных осей целесообразно перенести под левый край полюса. Расчетные формулы приобретают вид:

а) для ТЭД с компенсационной обмоткой и равномерным воздушным зазором

$$B_{\text{хн}} = \mu_0 \frac{F_{\text{в}} - \left(\frac{b_{\text{h}}}{2} - x\right)A + \left(\frac{b_{\text{p}}}{2} - x\right)A_{\text{ко}}}{k_{\delta}\delta} ; \quad (55)$$

б) для ТЭД без компенсационной обмотки

$$B_{\text{хн}} = \mu_0 \frac{F_{\text{в}} - \left(\frac{b_{\text{h}}}{2} - x\right)A}{R} , \quad (56)$$

где

$$R = \frac{t_1 + 10\delta_0 \left[1 + \left(\frac{\delta_{\text{кр}}}{\delta_0} - 1 \right) \left(\frac{b_{\text{p}} - 2x}{b_{\text{p}}} \right)^2 \right]}{b_{z1} + 10\delta_0 \left[1 + \left(\frac{\delta_{\text{кр}}}{\delta_0} - 1 \right) \left(\frac{b_{\text{кр}} - 2x}{b_{\text{p}}} \right)^2 \right]} \times \\ \times \delta_0 \left[1 + \left(\frac{\delta_{\text{кр}}}{\delta_0} - 1 \right) \left(\frac{b_{\text{p}} - 2x}{b_{\text{p}}} \right)^2 \right] .$$

Шаг 9. Расчет и построение характеристик $n(I_{\text{я}})$ и $\nu(I_{\text{я}})$

Необходимо рассчитать скоростные характеристики ТЭД при полном и ослабленном возбуждении (при $\beta_{\text{min p}}$) и заданном $U_{\text{др}}$.

Частоту вращения рассчитывают при неизменном напряжении $U_{\text{др}}$ по формуле [1, с. 163]:

$$n = \frac{E}{C_n \Phi} = \frac{U_{\text{др}} - I_{\text{д}} r_{\text{д}}}{C_n \Phi} , \quad (57)$$

где $r_{\text{д}} = r_{\text{я}} + r_{\text{в}} + r_{\text{д}} + r_{\text{ко}}$.

При расчете характеристик полного возбуждения задаются различными величинами тока якоря, для которых определяют значения тока возбуждения

$$I_B = I \beta_{\Pi} , \quad (58)$$

где $\beta_{\Pi} = 0,96$ – коэффициент постоянного регулирования возбуждения (только у двигателей пульсирующего тока).

Значения магнитного потока определяются по рассчитанной на шаге 5 магнитной характеристике. Значения сопротивлений всех обмоток двигателей по ГОСТу должны быть приведены к расчетной температуре 115°С.

Скорость на ободе колеса пересчитывают по формуле

$$v = 0,188 \frac{D_6 n}{\mu} , \quad (59)$$

где μ – передаточное число зубчатой передачи;

D_6 – диаметр бандажей колесных пар, м.

Расчет целесообразно свести в табл. 1.

Таблица 1

$I_{я\text{пп}}, \text{ А}$	$I_B, \text{ А}$	$I_{я\text{пп}} r_{д}, \text{ В}$	$E, \text{ В}$	$C_N \Phi, \text{ В/об/мин}$	$n_{\text{пв}}, \text{ об/мин}$	$v_{\text{пв}}, \text{ км/ч}$

Расчет характеристик ослабленного возбуждения ведут при условии, что магнитный поток машины при переходе на ослабленное возбуждение остается неизменным. Это возможно только в том случае, если ток якоря на ослабленном возбуждении возрастает и будет равен

$$I_{\text{ов}} = \frac{I_{\text{пв}}}{\beta} .$$

Возрастание тока якоря сопровождается повышением падения напряжения в силовой цепи, в результате чего скорость в режиме ослабленного возбуждения при том же потоке бу-

дет несколько меньше. Ее значение, соответствующее току $I_{\text{ОВ}}$ можно определить из выражения

$$n_{\text{ОВ}} = \frac{U_{\text{др}} - \frac{I_{\text{ПП}}}{\beta} r_{\text{ОВ}}}{U_{\text{др}} - I_{\text{ПП}} r_{\text{ПВ}}} n_{\text{ПВ}}. \quad (60)$$

$$\downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow$$

$$\text{при } \frac{I_{\text{ОВ}}}{\beta} \qquad \qquad \text{при } I_{\text{ПВ}}$$

При определении сопротивления обмотки возбуждения учитываем, что оно равно $r_{\text{ОВ}} \beta_p$.

Рассчитывая характеристики ослабленного возбуждения, необходимо учитывать, что максимальный ток двигателя по ГОСТ 2582-81 равен $I_{\text{маx}} = 2I_{\text{я}}$. Максимальная частота вращения задана. Производить расчеты для токов и частот вращения, превышающих $I_{\text{маx}}$ и $n_{\text{маx}}$, не нужно.

Данные расчетов заносят в табл. 2.

Таблица 2

$I_{\text{В}} r_{\text{В}}, \text{ А}$	$I_{\text{яОВ}}, \text{ А}$	$I_{\text{я ПВ}} r_{\text{ПВ}}, \text{ В}$	$I_{\text{яОВ}} r_{\text{ОВ}}, \text{ В}$	$n, \text{ об/мин}$		$v, \text{ км/ч}$	
				ПВ	ОВ	ПВ	ОВ

Расчеты на шаге 9 заканчиваются сравнением одной из полученных характеристик $n(I_{\text{я}})$ и $v(I_{\text{я}})$ с заводской. Такое сравнение позволяет проверить правильность ранее проведенных расчетов. При этом нужно помнить, что частота вращения якоря (скорость электровоза) зависит от напряжения. Расчетное напряжение, заданное в проекте, и номинальное напряжение ТЭД различны. Поэтому перед построением взятые из справочного материала значения

должны быть пересчитаны на расчетное напряжение. Расчетная формула:

$$\nu_p = \nu_H \frac{U_{др} - I_{я} r_d}{U_H - I_{я} r_d}. \quad (61)$$

Шаг 10. Расчетные характеристики КПД двигателя [1, с. 155]

КПД определяется по формуле

$$\nu_p = \nu_H \frac{U_{др} - I_{я} r_d}{U_H - I_{я} r_d}, \quad (62)$$

где $\Sigma \Delta P$ – сумма потерь, Вт.

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{мо} + \Delta P_{со} + \Delta P_{доб} + \Delta P_{пщ} + \Delta UI_{я} + \Delta P_{подш}. \quad (63)$$

Здесь $\Delta P_{мо}$ – основные потери в меди;

$\Delta P_{со}$ – основные потери в стали при холостом ходе;

$\Delta P_{доб}$ – добавочные потери при нагрузке;

$\Delta P_{пщ}$ – потери на трение щеток о коллектор;

$\Delta UI_{я}$ – потери в переходном слое под щетками;

$\Delta P_{подш}$ – потери на трение в подшипниках.

Определение потерь производят при расчетном напряжении на двигателе $U_{др}$ по формулам [1, с. 155].

Шаг 11. Расчет и построение характеристик вращающего момента на валу двигателя

Вращающий момент на валу двигателя меньше электромагнитного момента на величину потерь момента

$$M = M_{э} - \Delta M. \quad (64)$$

Ввиду трудоемкости определения ΔM выражением (64) обычно не пользуются, а определяют M , пользуясь законом сохранения энергии.

$$P_{\text{эд}} \eta_{\text{д}} = P_{\text{мех}} \quad \text{или} \quad U_{\text{др}} I_{\text{я}} \eta_{\text{д}} 10^{-3} = \frac{Mn}{9,55}, \quad (65)$$

где $P_{\text{эд}}$ – электрическая мощность, потребляемая двигателем, кВт;

$P_{\text{мех}}$ – механическая мощность на валу двигателя, кВт;

M – момент на валу, кН·м.

Из (65) можно получить момент на валу

$$M = 9,55 \frac{U_{\text{др}} I_{\text{я}}}{n} \eta_{\text{д}} 10^{-3}. \quad (66)$$

Характеристика $M_{\text{ов}}(I)$ для ослабленного возбуждения (при условии $\eta_{\text{ов}} = \eta_{\text{пв}}$) определяют из выражения

$$M_{\text{ов}} = \frac{M_{\text{пв}}}{\beta_{\text{минр}}}. \quad (67)$$

Здесь $M_{\text{пв}}$ берут из характеристики полного возбуждения при определенном значении тока $I_{\text{пв}}$, а $M_{\text{ов}}$ определяют для тока

$$I_{\text{ов}} = \frac{I_{\text{пв}}}{\beta_{\text{мин}}}. \quad (68)$$

Результаты расчетов рекомендуется свести в таблицу. При расчете и построении характеристик $M_{\text{ов}}(I)$ необходимо учитывать, что $I_{\text{max}} = 2 I_{\text{н}}$.

Шаг 12. Определение технико-экономических показателей ТЭД

Расчет ТЭД производят для номинального режима, т.е. одной точки ее электромеханической характеристики $n(I)$.

Однако с точки зрения эксплуатации важно знать, как используется мощность ТЭД во всем рабочем диапазоне скоростей.

Регулировочные способности двигателя (пределы возможного регулирования силы тяги и скорости за счет ослабления возбуждения) зависят от минимального значения $\beta_{\text{мин}}$ и от

степени насыщения магнитной системы машины, которую оценивают коэффициентом магнитного насыщения K_H .

Регулировочную способность ТЭД оценивают величиной [1, с. 29]

$$K_p = \frac{1}{\beta_{\min} K_H}, \quad (69)$$

которую называют «коэффициентом регулируемости двигателя».

Минимальная степень ослабления возбуждения ограничивается двумя факторами.

Во-первых, с уменьшением β_{\min} увеличивается влияние поля якоря на поле главных полюсов, что приводит к резкому искажению распределения индукции под главным полюсом у ТЭД без компенсационной обмотки.

Искажающее влияние поля якоря оценивают коэффициентом устойчивости K_y [1, с. 30, 44].

Во-вторых, с переходом на ослабленное возбуждение увеличивается значение реактивной ЭДС - формула (2.164) [1, с. 116] – за счет увеличения тока якоря.

Если принять максимально допустимое значение реактивной ЭДС $e_{p \max} \leq 8 \div 9$, то зная ЭДС e_p при часовой частоте вращения и полном возбуждении, можно определить скорость при ослабленном возбуждении $n_{\beta_{\min}}$, когда e_p достигает значения $e_{p \max}$:

$$e_{p \max} = e_{pH} \frac{n_{\beta_{\min}}}{n_{\text{НПВ}}} \quad \text{при} \quad I_{\text{об}} = I_H = \text{const},$$

откуда

$$n_{\beta_{\min}} = \frac{e_{p \max}}{e_{pH}} n_{\text{НПВ}}. \quad (70)$$

Из уравнений электрического состояния для режимов полного и ослабленного возбуждения

$$U_{\text{др}} = C_{\text{п}} n_{\text{пв}} \Phi_{\text{я пв}} + I_{\text{я дв}} r_{\text{дв}} = C_{\text{п}} n_{\beta_{\min}} \Phi_{\text{нов}} + I_{\text{н об}} r_{\text{об}}, \quad (71)$$

пренебрегая разницей в сопротивлениях при полном и ослабленном возбуждении ($r_{\text{пв}} = r_{\text{об}}$), можно определить поток ослабленного возбуждения при неизменном токе якоря

$$\Phi_{\text{нов}} = \Phi_{\text{нпв}} \frac{n_{\text{нпв}}}{n_{\beta_{\text{min}}}}. \quad (72)$$

Ток $I_{\text{нов}}$, необходимый для создания потока $\Phi_{\text{нов}}$, определяют по магнитной характеристике машины.

Когда минимально допустимое значение коэффициента β_{min} определяют из соотношения

$$\beta_{\text{min}} = \frac{I_{\text{нов}}}{I_{\text{нпв}}} \beta_{\text{н}}, \quad (73)$$

где $\beta_{\text{н}}$ — коэффициент постоянного ослабления возбуждения (только у двигателей пульсирующего тока).

Определив β_{min} исходя из коммутационной напряженности работы коллектора необходимо учесть, что в практике проектирования принимают $\beta_{\text{min}} \geq 0,3$ для обеспечения надежной работы тягового двигателя при неустановившихся режимах.

Минимальное значение $K_{\text{н}}$ можно получить за счет увеличения воздушного зазора под главным полюсом и при уменьшении индукции $B_{z_{\frac{1}{3}}}$ зубцового слоя якоря. Однако при увеличении воздушного зазора увеличивается число витков катушки главного полюса, а снижение $B_{z_{\frac{1}{3}}}$ вызывает необходимость увеличения диаметра якоря.

При выполнении данного шага нужно ответить на вопросы:

1. Допустима ли заданная величина ослабления возбуждения?
2. Определить коэффициент использования мощности при заданном коэффициенте ослабления возбуждения.
3. Сравнить полученные данные с аналогичными данными современных двигателей и сделать выводы.

Шаг 13. Графическое оформление расчета

В заключении работы над проектом нужно разработать чертежи продольного и поперечного разрезов заданного ТЭД.

Разрешается использовать вклейки, помещенные в приложениях к заданию на проект.

В прил. 2, 3 даны разрезы ТЭД с компенсационной обмоткой, в прил. 4, 5 – без компенсационной обмотки.

На чертежах необходимо указать все размеры, которые были определены расчетом и приняты в качестве исходных данных.

Показать размеры сердечника якоря, зубцового слоя якоря, сердечников главных и дополнительных полюсов, зазоры главных и дополнительных полюсов.

V. РАСЧЕТНАЯ ЗАПИСКА

Шаг 1. Расчет геометрических размеров активного слоя якоря

1. Размеры проводника $b_{\text{пр}0} \times h_{\text{пр}0} = \dots$
2. Площадь поперечного сечения проводника $q_0 = \dots \text{ мм}^2$.
3. Число проводников в пазу $u_{\text{п}0} = \dots$
4. Таблица с подробным указанием толщин и числа слоев всех видов изоляции паза.

5. Определение геометрических размеров паза и составление эскиза паза в масштабе 2:1.

6. Плотность тока $j_{\text{я}0} = \frac{I_{\text{я}}}{2aq} = \dots \text{ А/мм}^2$.

7. Линейная нагрузка – формула (4) $A_0 = \dots \text{ А/см}$.

8. Фактор нагрева ($A j_{\text{я}0}$), который остается постоянным во всех последующих расчетах.

9. Новые значения чисел проводников в пазу (больше и меньше заданного $u_{\text{п}0}$).

10. Линейная нагрузка

$$A_1 = \dots, A_2 = \dots, A_3 = \dots$$

11. Плотность тока

$$j_{\text{я}1} = \dots; j_{\text{я}2} = \dots; j_{\text{я}3} = \dots$$

12. Размер проводника (при неизменном размере по высоте паза) [1, с.603].

$$b_{\text{пр}1} = \dots; b_{\text{пр}2} = \dots; b_{\text{пр}3} = \dots$$

$$h_{\text{пр}1} = \dots; h_{\text{пр}2} = \dots; h_{\text{пр}3} = \dots$$

Изменяется или $b_{\text{пр}}$ или $h_{\text{пр}}$ в зависимости от расположения проводников в пазу [1, с. 78].

13. Ширина паза

$$b_{\text{п}1} = \dots; b_{\text{п}2} = \dots; b_{\text{п}3} = \dots$$

14. Ширина зубца якоря у основания – по формуле (18), проверка ограничения по условиям магнитного насыщения и механической прочности.

Ширина зубца якоря: на высоте $1/3$ – формула (19)

$$t'_{z\frac{1}{3}} = \dots; t''_{z\frac{1}{3}} = \dots; t'''_{z\frac{1}{3}} = \dots$$

Шаг 2. Определение показателя использования якоря при различном числе проводников в пазу

1. Индукция в расчетном сечении зубца, сохраняемая постоянной во всех последующих расчетах,

$$B_{z\frac{1}{3}} = \dots \text{ Тл.}$$

2. Индукция в зазоре заданного двигателя — по формуле (20)

$$B_{\delta 0} = \dots \text{ Тл.}$$

3. Показатель использования якоря ($A_0 B_{\delta 0}$) =

4. Индукция в зазоре

$$B_{\delta 1} = \dots; B_{\delta 2} = \dots; B_{\delta 3} = \dots$$

при $B_{z\frac{1}{3}} = \text{const.}$

5. Использование якоря

$$(A_1 B_{\delta 1}) = \dots, (A_2 B_{\delta 2}) = \dots, (A_3 B_{\delta 3}) = \dots,$$

соответствующие $u_{\text{п}1}, u_{\text{п}2}, u_{\text{п}3}$.

6. Графические зависимости A, B_{δ} и $(A B_{\delta})$ в зависимости от $u_{\text{п}}$.

7. Вывод об использовании якоря у заданного ТЭД.

8. Определить A_{min} и A_{max} , показать их на графике и объяснить границы допустимых значений A .

Шаг 3. Расчет магнитной цепи ТЭД

1. На основании прилагаемой к заданию вклейки с разрезами двигателя составляется со строгим соблюдением масштаба 1:2 эскиз магнитной цепи вида [1, с. 138], (рис. 2.53). На эскизе показываются численные значения длин характерных участков магнитной цепи в сантиметрах.

2. Расчет эквивалентного воздушного зазора выполняется только для ТЭД без компенсационной обмотки.

3. Расчет коэффициента воздушного зазора.

4. Расчет падения магнитного напряжения в воздушном зазоре – формула (25).

5. Составление таблицы вида [1, с. 142] табл. 2.8. При составлении таблицы нужно помнить, что ГОСТом введен термин «магнитодвижущая сила» (МДС) вместо н.с.

6. Полная МДС холостого хода $\sum F_{xx} = \dots A$.

7. Коэффициент учета реакции якоря $k_{ря}$.

8. Полная МДС реакции якоря на полюс $F_{ря} = \dots A$.

9. Полная МДС $F_{в} = \dots A$.

10. Коэффициент насыщения при номинальном режиме $K_n = \dots$.

11. Число витков катушки главного полюса $W_{в}$.

12. Сравнить полученный результат с заводским и при расхождении результатов перечислить возможные причины, влияющие на результат.

Шаг 4. Расчет характеристики намагничивания

Составляется таблица, в которой указываются индукции для **всех** характерных участков и соответствующие им напряженности при различных значениях потока. По данным таблицы строится зависимость $\Phi(I_{\mu})$.

Шаг 5. Расчет магнитной характеристики машины

1. Расчетная таблица для определения коэффициента $k_{ря}$, соответствующего различным магнитным потокам.

2. Расчет двух последних строк таблицы шага 4.

3. Построение зависимости $C_n \Phi(I_{в})$.

Шаг 6. Расчет коммутации

1. На эскизе показать 3 силовые линии потока Φ_c , проходящие через характерные участки зубцового слоя, для которых определялись коэффициенты магнитной проводимости.

Необходимо показать расчетные размеры паза.

2. Расчет коэффициента ξ .

3. Графическое определение коэффициента k_j .

4. Расчет удельных проводимостей

$$\lambda_{п1} = \dots\dots\dots \text{Гн/м};$$

$$\lambda_{п2} = \dots\dots\dots \text{Гн/м};$$

$$\lambda_k = \dots\dots\dots \text{Гн/м};$$

$$\lambda_l = \dots\dots\dots \text{Гн/м};$$

$$\lambda = \dots\dots\dots \text{Гн/м}.$$

5. Среднее значение реактивной ЭДС

$$e_{p \text{ ср}} \dots\dots\dots \text{В}.$$

6. Сделать вывод о коммутационной напряженности заданного ТЭД.

7. Ширина зоны коммутации

$$b_{зк} = \dots\dots\dots \text{мм}.$$

Шаг 7. Расчет дополнительных полюсов

1. Индукция в воздушном зазоре под дополнительным полюсом

$$B_k = \dots\dots\dots \text{Тл}.$$

2. Взять из справочного материала

$$\delta_d = \dots \text{ см}, \delta'_d = \dots \text{ см}.$$

3. Коэффициент воздушного зазора $k_{\delta d} = \dots$

4. Ширина наконечника $b_d = \dots \text{ см}.$

5. Ширина сердечника $b_{мд} = \dots\dots\dots \text{ см}.$

6. Намагничивающая сила катушки $F_d = \dots\dots\dots A.$

7. Число витков катушки дополнительного полюса

$$W_d = \dots\dots\dots$$

8. Сравнить полученный результат с заводскими данными.

Шаг 8. Оценка потенциальных условий на коллекторе ТЭД

1. Среднее межламельное напряжение $\Delta u_{к\text{ ср}} = \dots\dots\dots \text{В}$.

2. Коллекторные деления $t_k = \dots\dots\dots \text{мм}$.

Вывод о выполнимости коллектора.

3. Максимальное значение коэффициента искажения:

а) режим полного возбуждения $\xi_{\text{max пв}} = \dots\dots\dots$;

б) режим при $\beta_{\text{min п}}$, $\xi_{\text{max ов}} = \dots\dots\dots$

4. Действительное межламельное напряжение $\Delta u_{к\text{ хх}} = \dots\dots \text{В}$;
при заданном $U_{\text{др}} = \dots\dots \text{В}$.

5. Максимальные межламельные напряжения при отключенной компенсационной обмотке:

при полном возбуждении $\Delta u_{к\text{ max}} = \dots \text{В}$;

при $\beta_{\text{min п}}$, $\Delta u_{к\text{ max}} = \dots \text{В}$;

при заданном $U_{\text{др}} = \dots \text{В}$.

6. Пункт 5 при включенной компенсационной обмотке.

7. Таблица произвольной формы для расчета потенциальной диаграммы при отключенной компенсационной обмотке и график.

8. Пункт 7 при включенной компенсационной обмотке.

9 Вывод о потенциальной напряженности заданного ТЭД.

Шаг 9. Расчет и построение характеристик $n(I_{\text{я}})$ и $v(I_{\text{я}})$

1. Заполнение таблиц 1 и 2.

2. Построение расчетных характеристик для режимов полного и ослабленного возбуждения.

3. Таблица пересчета заводских данных на расчетное напряжение.

4. Объяснить причины расхождения расчетных и заводских характеристик.

Шаг 10. Расчетные характеристики КПД двигателя [1, с. 155]

1. Заполненная таблица вида [1, с. 165, табл. 2.12].

2. Характеристики КПД на валу двигателя для режима полного возбуждения двигателя. Построение производится на том же графике, что и $n(I_{\text{я}})$.

3. Построить заводскую характеристику КПД.

4. Показать двумя вертикальными линиями область токов якоря, в которой наиболее желательна работа ТЭД. Объяснить форму кривой.

Шаг 11. Расчет и построение характеристик вращающего момента на валу двигателя

1. Заполнение таблицы значения $M(I_{\text{я}})$.

2. Характеристики момента двигателя для режимов полного и ослабленного возбуждения.

3. Построение заводской характеристики.

4. Объяснить причины расхождения расчетной и заводской характеристик.

Шаг 12. Определение технико-экономических показателей ТЭД

1. Коэффициент устойчивости (для ТЭД без компенсационной обмотки) $K_y = \dots$.

2. Реактивная ЭДС при номинальном режиме и полном (нормальном возбуждении) $e_p = \dots$ В.

3. Частота вращения

$$n_{\beta \min} = \dots \text{ об/мин при } e_{p \max} = \dots \text{ В.}$$

4. Поток ослабленного возбуждения

$$\Phi_{\text{нов}} = \dots \text{ Вб.}$$

5. Ток ослабленного возбуждения

$$I_{\text{ов}} = \dots \text{ А.}$$

6. Коэффициент ослабления возбуждения $\beta_{\min} = \dots$

7. Коэффициент насыщения для часового режима $K_H = \dots$

8. Коэффициент регулируемости $K_p = \dots$.

9. Ответ на вопрос о допустимости заданного коэффициента ослабления возбуждения.

10. Коэффициент использования мощности при заданном коэффициенте ослабления возбуждения.

11. Вывод об использовании мощности заданного ТЭД.

Шаг 13. Графическое оформление расчета

В прил. 2, 3 даны разрезы ТЭД с компенсационной обмоткой. В прил. 4, 5 – без компенсационной обмотки.

На чертежах необходимо указать все размеры, которые были определены расчетом и приняты в качестве исходных данных.

Показать размеры сердечников якоря, зубцового слоя якоря, сердечников главных и дополнительных полюсов, зазоры главных и дополнительных полюсов.

Рекомендуемая литература

1. Находкин М. Д., Василенко Г. В., Бочаров В. И., Козорезов М. А. Проектирование тяговых электрических машин. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1976.

2. Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А. Тяговые электрические машины. – М.: Транспорт, 1991.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Данные электровозных тяговых двигателей

Технические данные	Тип двигателя					
	НБ-406	ТЛ-2К	НБ-514	НБ-520В	НБ-412К	НБ-418К
Род тока	Постоянный	Постоянный	Пульсирующий	Пульсирующий	Пульсирующий	Пульсирующий
1	2	3	4	5	6	7
Число полюсов $2p$	4	6	6	6	6	6
Напряжение U_n , В	1500/3000	1500/3000	950	1000	1600	950
Номинальная мощность P_n , кВт	470	560	780	760	550	740
Номинальный ток I_n , А	340	400	830	750	410	820
Номинальная частота вращения N_n , об/мин	765	815	915	1030	895	915
Часовая мощность P_q , кВт	525	650	835	800	690	790
Часовой ток I_q , А	380	466	880	815	515	880
Часовая частота вращения N_q , об/мин	735	770	890	1050	850	890
Окружная скорость якоря $V_{яч}$, м/с	25,4	29,8	31,6	29,3	32,9	30,8
Диаметр якоря $D_я$, мм	660	740	680	680	740	660
Длина пакета якоря $l_я$, мм	400	430	400	400	440	385
Число пазов якоря z	58	75	87	87	75	87
Размеры паза $b_d \times h_z$, мм	13,76×51,0	12,7×47,5	10×42,2	10×42,2	12×43,5	10,42,2
Размеры проводов $b_{пр} \times h_{пр}$, мм	2(1,08×8,6)	2(0,9×8)	3,53×6,9	3,53×6,9	2(1×7,4)	3,53×6,9
Число проводников $N_я$	812	1050	696	696	1050	696

Продолжение прил. 1

Технические данные	Тип двигателя					
	НБ-406	ТЛ-2К	НБ-514	НБ-520В	НБ-412К	НБ-418К
Род тока	Постоянный	Постоянный	Пульсирующий	Пульсирующий	Пульсирующий	Пульсирующий
1	2	3	4	5	6	7
Диаметр коллектора D_k , мм	565	660	578	578	660	520
Число коллекторных пластин	406	525	348	348	525	348
Коллекторное деление, мм	4,38	3,95	5,21	5,21	3,94	4,7
Среднее межламельное напряжение, В	14,7	17,1	16,4	16,4	18,3	16,4
Число витков главного полюса	48	19	12	12	20	11
Тип зазора	Эксцентричный	Равномерный	Равномерный	Равномерный	Равномерный	Равномерный
Зазор $\delta_{кр}/\delta_{ц}$, мм/мм	15,4/7,7	4,5/4,5	4,8/4,8	4,8/4,8	4,5/4,5	4,7/4,7
Коэффициент полюсного перекрытия α	0,665	0,7	0,67	0,67	0,62	0,67
Число витков доп. полюса	34	10	9	9	10	8
Воздушные зазоры доп. полюса δ'_d и δ''_d , мм	8+6	8+7	10+7	10+7	7+8	10+7
Магнитный поток $\Phi \cdot 10^{-2}$, Вб	14,1	10,6	8,91	8,91	10,3	8,84
Магнитная индукция, Тл:						
а) в воздушном зазоре	1,02	0,92	1,03		0,975	1,00
б) в зубцах якоря	2,2	1,94	2,12	-	2,0	2,13
в) в сердечнике якоря	1,48	1,59	1,325	-	1,34	1,35
г) в сердечнике полюса	1,66	1,48/0,9	1,7/1,18	1,7/1,18	1,9/1,16	1,65/1,43
д) в ярме остова	1,55	1,55	1,4	1,4	1,54	1,37

Окончание прил. 1

Технические данные	Тип двигателя					
	НБ-406	ТЛ-2К	НБ-514	НБ-520В	НБ-412К	НБ-418К
Род тока	Постоянный	Постоянный	Пульсирующий	Пульсирующий	Пульсирующий	Пульсирующий
1	2	3	4	5	6	7
Число витков компенсационной обмотки $N_{ко}$	-	10	6	6	10	6
Число пазов $Z_{ко}$	-	10	6	6	10	6
Линейная нагрузка A_4 , А/см	372	351	478	421	389	492
Фактор нагрева $A_{жк}$	1510	1900	2939	2939	2320	3020
Реактивная ЭДС, В						
а) по Цорну	-	-	-	9,15	-	-
б) по Иоффе	-	-	9,15	-	3,94	3,1
Плотность тока в обмотке якоря, А/мм ²	4,62	5,41	6,10	6,1	5,98	6,15

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Задание на курсовой проект с методическими указаниями

Редактор Г. В. Тимченко
Корректурa Д. Н. Тихонычев
Компьютерная верстка Е. В. Ляшкевич

Переиздание

Тип. зак.	Изд. зак. 141	Тираж 500 экз.
Подписано в печать 07.06.10	Гарнитура NewtonC	Ризография
Усл. печ. л. 3,0 + 2 вкл. (0,5 печ. л)		Формат 60×90 1/16

Редакционный отдел
Информационно-методического управления РОАТ,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати
Информационно-методического управления РОАТ,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2