

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра электромеханики и электромеханических систем

621.313(07)
Л649

В.А. Лифанов, Г.В. Помогаев, Н.П. Ермолин

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Учебное пособие

Челябинск
Издательство ЮУрГУ
2008

УДК 621.3133(075.8)
Л649

Одобрено
учебно-методической комиссией энергетического факультета

Рецензенты:
В.А. Буторин, М.А. Лютов

Лифанов, В.А.
Л649 Расчет электрических машин малой мощности: учебное пособие/ В.А. Лифанов, Г.В. Помогаев, Н.П. Ермолин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 127 с.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 140600 – «Электротехника, электромеханика и электротехнология». Наибольший интерес оно представляет для студентов специальностей 140601 – «Электромеханика», 1406016503 – «Менеджмент в электромеханике», 140609 – «Электрооборудование летательных аппаратов» и других, изучающих дисциплины «Электрические машины», «Инженерное проектирование электрических машин», «Электрические машины систем автоматики и бытовой техники» и выполняющих курсовые и дипломные проекты по этим дисциплинам. Рассмотрены общие вопросы проектирования электрических машин малой мощности, получивших широкое применение в системах автоматики и бытовой техники. Изложена с некоторыми уточнениями традиционная методика расчёта электрических микромашин с электромагнитным возбуждением.

Учебное пособие представляет также теоретический и практический интерес для специалистов, занимающихся разработкой электрических машин систем автоматики и бытовой техники.

УДК 621. 3133(075.8)

© Издательство ЮУрГУ, 2008

Глава 1

Общие вопросы проектирования электрических машин малой мощности

1.1. Роль электрических машин малой мощности в народном хозяйстве и предъявляемые к ним требования

Под электрическими машинами малой мощности (ЭМММ) следует понимать электрические микромашины мощностью примерно от нескольких долей ватта до 750 Вт. Их можно разделить на две основные группы: общего применения и автоматических устройств.

Микромашины общего применения подразделяют на промышленные и бытовые. В эту группу входят различного типа двигатели: асинхронные, синхронные, вентильные постоянного тока и коллекторные, предназначенные, в основном, для индивидуального привода различного рода механизмов. Их широко применяют в часовой, текстильной, швейной, промышленности, в самопишущих приборах, в автомобилях, тракторах, в бытовой технике. При этом две трети от всех микромашин общего применения составляют бытовые микромашины (холодильники, стиральные машины, полотеры, пылесосы, миксеры, магнитофоны и т.д.).

Микромашины автоматических устройств охватывают двигатели переменного и постоянного тока (управляемые и неуправляемые), различные генераторы и информационные микромашины (вращающиеся трансформаторы, сельсины, датчики и др.)

Требования, предъявляемые к ЭМММ, весьма разнообразны. Так, например, для привода электрических часов применяются двигатели с частотой вращения, составляющей доли оборота в минуту, а для шлифовального инструмента двигатели с частотой вращения 30...40 тыс. об/мин. Синхронные (гистерезисные) двигатели для гироскопов могут выполняться на частоты вращения 24...60 тыс. об/мин при частотах питающего напряжения 400...500 Гц.

Все электрические микромашины общего применения независимо от их назначения должны удовлетворять требованиям, оговоренным в ГОСТ 183-74. Эти требования включают в себя номинальные значения напряжений, потребляемых тока и мощности, КПД, номинальной полезной мощности (для двигателей), коэффициента мощности, допустимого превышения температуры, уровня шума и др.

Что касается электрических микромашин автоматических устройств, то они наряду с общими требованиями должны удовлетворять специфическим требованиям, соответствующим тем функциям, которые машины данного типа выполняют в автоматических системах. Так, например, исполнительные двигатели (ИД) должны иметь заданный вид механической и регулировочной характеристик, малые значения мощности управления и напряжения трогания, а также заданное быстродействие (малую электромеханическую постоянную времени). Информационные ЭМММ, преобразующие механические величины

(угловую скорость, угол поворота, угловое ускорение) в электрический сигнал, должны обладать малой погрешностью преобразования, которая для большинства машин находится в пределах 0,02...0,1%. Энергетические показатели имеют при этом второстепенное значение.

1.2. Конструктивные особенности. Стандартизация и унификация

Конструктивные особенности ЭМММ определяются их типом. В каждой машине имеются статор и ротор, разделенные относительно малым воздушным зазором. У большинства ЭМММ магнитопроводы имеют радиальную симметрию магнитных свойств. Исключением являются двигатели постоянного тока, а также синхронные реактивные двигатели и явнополюсные сельсины, у которых один из магнитопроводов, имеет явно выраженные полюса.

В магнитопроводах статора и ротора имеются пазы, в которые уложена по тому или иному закону обмотка. Подавляющее большинство обмоток может быть сведено к следующим четырем типам:

- а) катушечной обмотке, как правило, на явно выраженных полюсах;
- б) многофазной распределенной обмотке;
- в) короткозамкнутой обмотке («беличья клетка», полый немагнитный ротор, омеднённый ферромагнитный цилиндр);
- г) обмотке якоря коллекторных машин.

Ввиду малогабаритности ЭМММ число пазов на статоре и роторе обычно не превышает 24, что приводит к сильному проявлению высших гармоник МДС и поля. ЭМММ по сравнению с крупными и средними машинами имеют повышенные активные сопротивления обмоток, Поэтому с уменьшением габаритов происходит увеличение электрических потерь, что при увеличении намагничивающего тока сопровождается уменьшением КПД и $\cos \varphi$.

Немаловажное значение при проектировании, производстве и эксплуатации ЭМММ имеют вопросы унификации и стандартизации. Стандартизацией и унификацией решаются задачи уменьшения затрат на производство и эксплуатацию электрических машин.

С позиции производителя, желательно, при всём разнообразии типов исполнительных механизмов в максимальной мере сократить номенклатуру выпускаемых электрических машин и получить минимум затрат труда при их производстве и, в то же время, полностью удовлетворить потребности потребителя.

Стандартизацией предусматривается установление технических нормативов и норм на конкретные группы и виды электрических машин, осуществляемое на основе объединения их в комплексы однородной народнохозяйственной продукции, допускающей соответствующую унификацию.

Одним из таких комплексов однородной продукции являются ЭМММ, которые включают в себя:

- двигатели постоянного тока, коллекторные и универсальные;
- вентильные двигатели постоянного тока;
- асинхронные двигатели;
- шаговые двигатели;
- тахогенераторы постоянного и переменного тока;
- сельсины;
- вращающиеся трансформаторы;
- фазовращатели;
- электровентильаторы, электромагнитные муфты.

ЭМММ имеют свою систему нормативно-технических документов. К ним относятся:

- ГОСТ 16264.0–85 «Машины электрические малой мощности. Двигатели. Общие технические условия».
- ГОСТ 12126–86 «Машины электрические малой мощности. Установочные и присоединительные размеры».
- ГОСТ 20832–75 «Система стандартов по вибрации. Машины электрические вращающиеся массой до 0,5 кг. Допустимая вибрация».
- ГОСТ 23264–78 «Машины электрические малой мощности. Условные обозначения».
- ГОСТ 4.330–85 «СПКП. Машины электрические вращающиеся малой мощности. Номенклатура показателей».

Согласно ГОСТ 12126–86 «Установочные и присоединительные размеры» для ЭМММ предусмотрено три вида крепления: фланцевое, на лапах, на лапах с фланцем. При этом наиболее удобным является фланцевое крепление, которое имеет шесть исполнений (рис. 1.1):

1) обычное (негерметичное) и герметичное с гладкими проходными отверстиями под болты и винты (см. рис. 1.1, а);

2) универсальное с упорным буртиком, выточкой и двумя центрирующими заточками – большой и малой (см. рис. 1.1, б);

3) с упорным буртиком, выточкой и большой центрирующей заточкой (см. рис. 1.1, в);

4) с упорным буртиком, выточкой и малой центрирующей заточкой (см. рис. 1.1, г);

5) без выточки с большой центрирующей заточкой (см. рис. 1.1, д);

6) без выточки с малой центрирующей заточкой (см. рис. 1.1, е).

Для некоторых исполнений ЭМММ ГОСТ регламентирует также наружный диаметр корпуса и другие линейные размеры, которые выбираются в соответствии с рядом предпочтительных чисел R10. Попутно отметим, что ряды предпочтительных чисел определены ГОСТ 8032–84, в котором даются четыре основных десятичных ряда геометрической прогрессии, имеющих знаменатель φ .

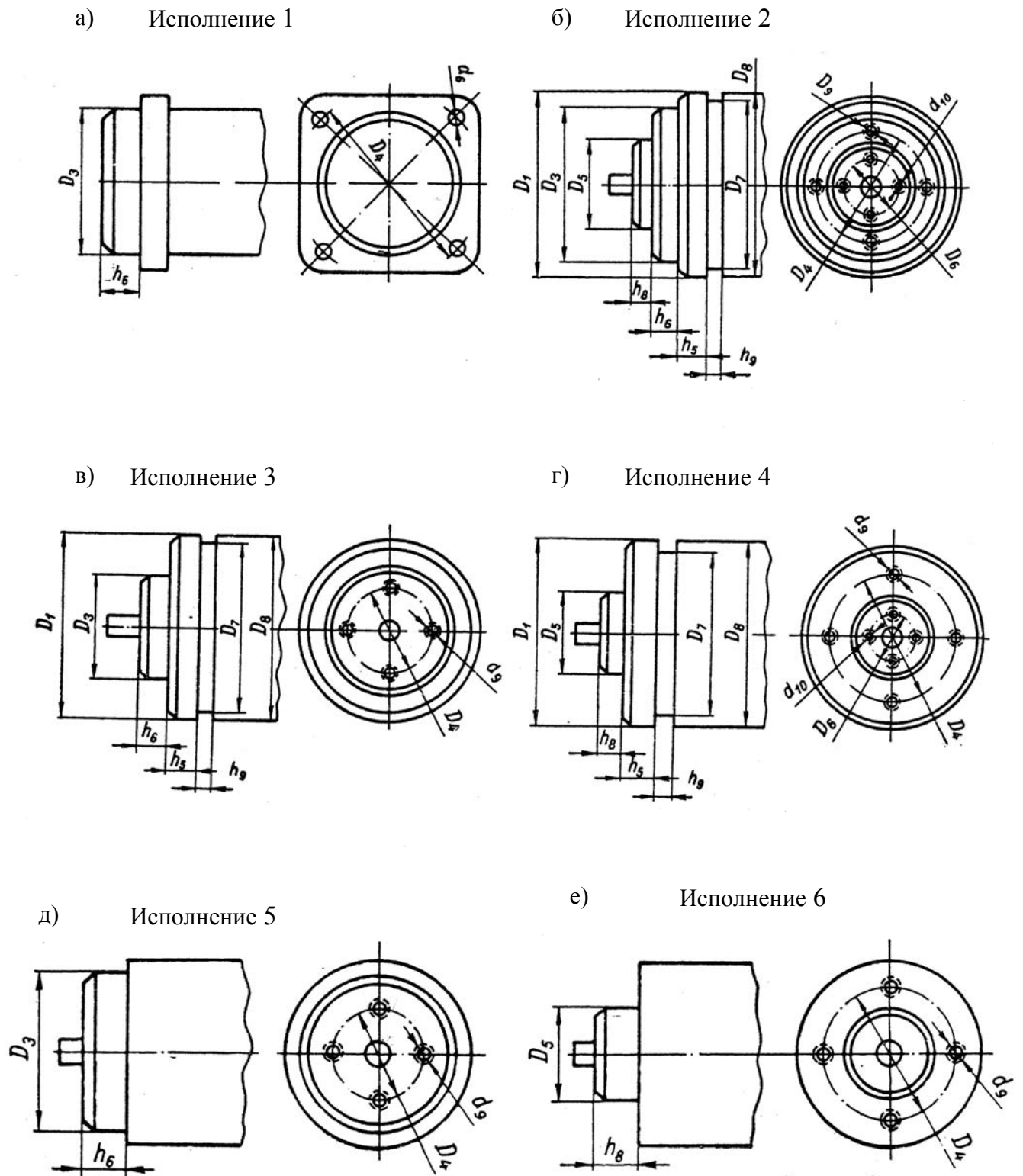


Рис. 1.1. Типы фланцевых креплений электрических микромашин

Обозначение ряда	R5	R10	R20	R40
Знаменатель ряда	$\varphi_5 = \sqrt[5]{10} = 1,6$	$\varphi_{10} = \sqrt[10]{10} = 1,25$	$\varphi_{20} = \sqrt[20]{10} = 1,12$	$\varphi_{40} = \sqrt[40]{10} = 1,06$

Число в обозначении ряда представляет собой степень корня из 10 и одновременно показывает количество членов в пределах ряда от 1 до 10, включая 10. Например, в ряде 10 знаменатель равен $\sqrt[10]{10}$, а количество членов 10. Каждый ряд построен на определенном знаменателе прогрессии $\varphi_5, \varphi_{10}, \varphi_{20}, \varphi_{40}$ в интервале от 1 до 10. Числа свыше 10 получаются умножением на 10, 100, 1000 и т.д., а числа меньше 1 – умножением на 0,1; 0,01; 0,001 и т.д.

При проектировании ЭМММ номинальные диаметры и длины, а также высоты вращения нередко выбираются равными предпочтительным числам указанных рядов.

1.3. Роль технологии

Технологичность – свойство, придаваемое конструкции машины и её деталям конструктором, позволяющее использовать в процессе производства наиболее экономичные технологические процессы.

Технологический, процесс – часть производственного процесса, непосредственно связанная с последовательным изменением состояния предмета производства (изменение формы, размеров, свойств материалов) в соответствии с требованиями технической и технологической документации для получения детали или машины, отвечающей заданным техническим требованиям.

При проектировании ЭМММ одной из важнейших проблем является оценка технологичности конструкции машины. При оценке технологичности конструкции, как правило, учитываются следующие показатели:

- а) коэффициент унификации, показывающий относительное значение количества унифицированных сборных единиц и деталей от общего количества;
- б) удельная материалоемкость – отношение массы двигателя к его полезной мощности;
- в) коэффициент использования металла – отношение материала составных частей двигателя к массе израсходованного материала;
- г) удельная трудоемкость – отношение общей трудоемкости изготовления в нормо-часах к номинальной полезной мощности;
- д) отношение трудоемкостей отдельных процессов к общей;
- е) удельная себестоимость – отношение технологической себестоимости (стоимости материалов, основной зарплаты производственных рабочих, расходов на содержание и эксплуатацию оборудования, инструментов и приспособлений) к номинальной полезной мощности.

Требования к технологичности должны быть увязаны с конструктивными особенностями двигателя, объемом выпуска, типом производства (единичным, включая опытное; серийным; массовым).

Способы изготовления деталей и узлов машин и их сборки определяют не только трудоемкость, но и технические и эксплуатационные свойства (показатели

качества) изделий. Для ЭМММ технология в значительной мере определяет разбросы параметров и их параметрическую надежность. Особенно чувствительны к технологии показатели качества информационных ЭМММ.

Некоторые виды материалов в результате механической обработки или обработки давлением могут резко терять полезные свойства. Поэтому проектировщику необходимо знать и учитывать изменение свойств материала в зависимости от способов и видов обработки, учитывать разброс форм и размеров поверхностей, получаемых или обрабатываемых в каком-либо технологическом процессе.

Оценка и выбор методов обработки должны производиться комплексно с учётом стабильности параметров технологических процессов и технологических разбросов результатов обработки. По существу, проблема точности обработки и сборки – в большей мере технологическая, чем конструкторская. При проектировании ЭМММ важно рассчитать экономически выгодный уровень технологического разброса и установить рациональные допуски. Наличие разброса снижает возможную точность расчёта характеристик и ухудшает качество машины.

При производстве ЭМММ наряду с технологическими процессами общего машиностроения широко используются специальные технологические процессы, связанные с применением специфических материалов электротехнического производства (электротехническая сталь, обмоточные провода, пропиточные лаки и компаунды, стеклоткани, миканиты, лавсановые пленки и ленты, слюдинитовая и слюдопластовая бумага, различные композиционные материалы и др.)

При изготовлении шихтованных магнитопроводов ЭМММ одним из главных требований, как правило, является изотропность магнитных свойств. Однако приходится учитывать анизотропию свойств листов электротехнической стали, обусловленную способом прокатки или условиями охлаждения. К анизотропии могут приводить также операции вырубki листов (из-за несимметрии штампов), сборки пакетов, скрепления пакетов и т.п. С целью уменьшения анизотропии пакета магнитопровода приходится предусматривать веерообразную сборку, что усложняет технологию изготовления.

Одной из важнейших технологических операций в производстве ЭМММ является изготовление обмоток. У проектировщика должна быть полная информация по оценке разных технологий изготовления обмоток, необходимая для обоснованного выбора наиболее рационального варианта. При изготовлении индукторов ЭМММ из магнитотвердых материалов или поставляемых как комплектующие изделия постоянных магнитов важнейшими технологическими факторами являются равномерность и уровень намагничивания магнитов, и возможность механической обработки. Недостаточная или неравномерная намагниченность приводит к выбраковке машины с такими магнитами.

Практически для всех типов ЭМММ весьма важными технологическими факторами являются неравномерность воздушного зазора и дисбаланс ротора. Неравномерность воздушного зазора появляется из-за неточности изготовления узлов статора и ротора, так и в результате люфтов в подшипниках, несоосностей

элементов конструкции после сборки, а также из-за некомпенсированных сил магнитного тяжения. Остаточное смещение центров масс (дисбаланс ротора) относительно оси вращения приводит к вибрациям, усиливает шум и эксцентриситет от магнитного тяжения.

В заключение следует обратить внимание на трудоемкость создания средств для оценки влияния всего многообразия технологических факторов на технические и эксплуатационные характеристики ЭМММ. В этом отношении представляет наибольший интерес разработка специальных математических моделей и программ, обеспечивающих автоматизацию проектных работ в целом.

Классификация ЭМММ и предъявляемые к ним требования, а также вопросы их теории и расчёта подробно рассмотрены в работах, указанных в библиографическом списке [1...14].

1.4. Оценка качества и надежности ЭМММ

1.4.1. Показатели качества

Несмотря на многообразие конструктивных исполнений и модификаций, можно выделить основные требования, предъявляемые к показателям качества машин малой мощности и условно разбить их на семь групп:

1) показатели назначения, включающие в себя классификационные показатели функциональной и технической эффективности. К первым можно отнести P_H , U_H , n_H , M_H , H , габариты и максимальные размеры машины, режим работы. Вторые включают в себя k_{\max} , $k_{\text{п}}$, k_{\min} , P_s , k_i , J ;

2) показатели надежности: установленная безотказная наработка T_y и срок службы $T_{\text{сл. у.}}$;

3) показатели экономного использования сырьевых, материальных, топливных, энергетических и трудовых ресурсов: η , G/P_H , $\cos \varphi$, G ;

4) эргономические показатели: средний уровень звука L , среднее квадратичное значение виброскорости V ;

5) показатели технологичности: удельная трудоемкость изготовления $T_{\text{и}}$ (нормочасы на единицу полезной мощности), удельная материалоемкость (кг/Вт) по отдельным видам материалов и суммарная, удельная технологическая себестоимость $C_{\text{т}}$ (руб/Вт) и коэффициент использования материалов $K_{\text{ис}}$;

6) патентно-правовые показатели: показатель патентной защиты $\Pi_{\text{п.з.}}$ и показатель патентной чистоты $\Pi_{\text{п.ч.}}$;

7) показатель безопасности.

При проектировании и изготовлении электрических машин малой мощности необходимо добиваться высших показателей качества и их конкурентоспособности на мировом рынке.

Наиболее важным является комплексный показатель качества, характеризующий функциональную и техническую эффективность двигателя.

1.4.2. Оценка уровня качества

Для оценки уровня и категории качества вводятся комплексный показатель качества Π_{kj} и коэффициент уровня качества K_y . При определении этих коэффициентов выбирается эталон двигателя и его аналоги, имеющие с эталоном одинаковые классификационные показатели и в частности одинаковые P_n , U_n и n_n .

Комплексный показатель качества сравниваемых двигателей подсчитывается по формуле:

$$\Pi_{kj} = \sum_{i=1}^n k_{\omega i} x_i, \quad (1.1)$$

где x_i – нормализованный показатель качества; n – число показателей качества в данной группе; $k_{\omega i}$ – коэффициент весомости i -го показателя качества.

Если для повышения качества требуется рост показателя i -го качества, то

$$\bar{x}_i = \frac{x_i}{x_{i\delta}}. \quad (1.2)$$

Если требуется его снижение, то

$$\bar{x}_i = \frac{x_{i\delta}}{x_i}. \quad (1.3)$$

Здесь x_i и $x_{i\delta}$ – абсолютные значения i -го свойства и его базового значения.

Коэффициент весомости каждого из показателей качества определяется экспериментальным путем, причем $\sum k_{\omega i} = 1$.

Коэффициент уровня качества по группам:

$$k_{yi} = \frac{\Pi_{kj}}{\Pi_{kj\delta}}, \quad (1.4)$$

где Π_{kj} и $\Pi_{kj\delta}$ – соответственно комплексный показатель качества сравниваемого двигателя, и комплексный показатель качества эталона.

Категория качества присваивается в зависимости от коэффициента уровня качества:

при $k_{yi} \geq 0,95$ – высшая категория;

при $0,95 > k_{yi} \geq 0,90$ – первая категория;

при $k_{yi} < 0,90$ – вторая категория.

1.4.3. Основные понятия надежности

Важным показателем, определяющим выбор того или иного типа микромашины для автоматических систем, является надежность ее работы.

Все технические изделия в теории надежности весьма условно делятся на два типа: элементы и системы. Элементом называется часть системы, выполняющая весьма определенные функции. Система – это совокупность совместно работающих элементов, предназначенных для выполнения определенного задания.

Микроэлектродвигатель, установленный в автоматической системе, с одной стороны, можно считать элементом, а с другой, отдельно взятый микроэлектродвигатель может рассматриваться как система, состоящая в свою очередь из ряда элементов: подшипников, обмоток, контактного устройства и т.п.

Технические изделия принято делить на два класса:

- 1) восстанавливаемые (многократного действия);
- 2) невосстанавливаемые (однократного действия).

Первые в случае отказа их в работе могут быть отремонтированы, вторые – при отказе ремонту не подлежат.

Общими для всех типов ЭМММ являются повышенные требования к ресурсу и надежности работы. Повышение надежности дает больший народнохозяйственный эффект, чем улучшение других технических и экономических показателей.

Надёжность – это безотказность, т.е. свойство сохранять работоспособность (неизменные технические характеристики) в течение требуемого промежутка времени без вынужденных перерывов.

Работоспособность – состояние ЭМММ, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативной, технической или конструкторской документации.

Долговечность ЭМММ – свойство сохранять работоспособность с необходимыми перерывами (на техническое обслуживание и ремонт) до разрушения или другого предельного состояния.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособности.

Сохраняемость ЭМММ – свойство сохранять эксплуатационные показатели в течение установленного срока хранения и транспортировки, и после нее.

Гарантийная наработка ЭМММ – продолжительность работы в часах, до окончания которой завод-изготовитель гарантирует её исправность при условии соблюдения правил эксплуатации.

Гарантийный срок службы – календарная продолжительность работы, в течение которой завод-изготовитель гарантирует исправность машины и несёт материальную ответственность за её исправность.

Ресурс – один из показателей долговечности, определяющий наработку машины от начала её эксплуатации или возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Срок службы – календарная продолжительность от начала эксплуатации машины или её возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

1.4.4. Показатели надежности ЭМММ

Для оценки надежности ЭМММ, как и других объектов, в зависимости от их назначения, применяют различные количественные показатели. К числу широко применяемых показателей надежности невосстанавливаемых (неремонтируемых) объектов относятся вероятность безотказной работы $P(t)$ и отказа $Q(t)$, интенсивность отказа $\lambda(t)$, средняя наработка до отказа T_{cp} .

Вероятность безотказной работы – это вероятность того, что при определённых условиях эксплуатации в заданном промежутке времени отказ изделия не возникнет. Вероятность $P(t)$ – функция убывающая (рис. 1.2), причём $0 \leq P(t) \leq 1$, $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$.

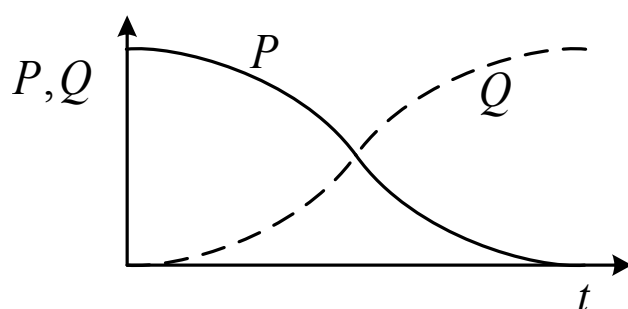


Рис. 1.2. Вероятность безотказной работы (P) и отказа (Q)

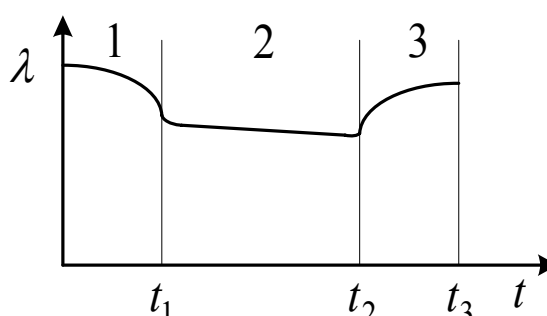


Рис. 1.3. Периоды приработки (1), нормальной эксплуатации (2), старения (3)

Статическая вероятность безотказной работы определяется отношением числа объектов (машин), безотказно проработавших до момента времени t , к числу объектов, работоспособных в начальный момент времени

$$P(t) = \frac{N - n(t)}{N_0}, \quad (1.5)$$

где N_0 – число объектов в момент начала наблюдений; $n(t)$ – число объектов, отказавших за время t .

Вероятность отказа – это вероятность, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени произойдет хотя бы один отказ. Отказ и безотказная работа – события противоположные и несовместимые (см. рис. 1.2):

$$Q(t) = 1 - P(t) = \frac{n(t)}{N_0}. \quad (1.6)$$

Интенсивностью отказов называется вероятность отказов невосстанавливаемого (неремонтируемого) изделия за единицу времени после данного момента времени при условии, что до этого момента отказа не было:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{N_{cp} \Delta t}, \quad (1.7)$$

где Δn – число отказов за время Δt ; $N_{\text{ср}}$ – среднее число изделий, исправно работающих в течение того же времени Δt . В дифференциальной форме

$$\lambda(t) = \frac{1}{N} \frac{dn}{dt}, \quad (1.8)$$

где N – число, исправно работающих изделий в момент t , причём согласно (1.6) и

$$(1.7) \quad N = N_0 P(t); \quad \frac{dn}{dt} = N_0 \frac{dQ(t)}{dt} = -N_0 \frac{dP(t)}{dt}. \quad \text{Тогда}$$

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}, \quad (1.9)$$

откуда после интегрирования

$$\int_0^t \lambda(t) dt = -\ln P(t) \quad (1.10)$$

и, следовательно, вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (1.11)$$

Всякое техническое изделие, в том числе и ЭМММ, в процессе своего функционирования проходит три характерных периода работы: приработки ($0 < t < t_1$), начиная с выхода нового изделия из цехов завода ($t = 0$); нормальной эксплуатации ($t_1 < t < t_2$) и старения или износа. Названные периоды указаны соответственно цифрами 1, 2, 3 (рис. 1.3).

Период приработки характеризуется высокой интенсивностью отказов, которая постоянно падает. Эти отказы обусловлены технологическими, производственными и конструктивными недостатками. Их стремятся исключить путем замены или доводки отдельных узлов изделия. Распределение отказов в этот период происходит по закону Вейбулла.

Как показывает статистика, период нормальной эксплуатации для электрической машины, в целом за большой промежуток времени, до периода износа интенсивность отказов можно считать постоянной, а вероятность безотказной работы экспоненциально убывающей функцией:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.12)$$

Частота отказов – это отношение изделий, отказавших в единицу времени, к числу изделий, первоначально установленных для испытания:

$$a(t) = \frac{\Delta n}{N_0 \Delta t} \quad (1.13)$$

или в дифференциальной форме

$$a(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.14)$$

В случае экспоненциального закона

$$a(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (1.15)$$

При постоянной интенсивности отказов средняя наработка на отказ

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.16)$$

Третий период работы ЭМММ характеризуется увеличением интенсивности отказов, что связано, в основном, со старением и износом отдельных элементов и узлов.

1.4.5. Причины и характер отказов ЭМММ

ЭМММ можно рассматривать как систему последовательно соединенных элементов, определяющих вероятность безотказной работы машины: обмотки, подшипникового узла, щеточно-коллекторного узла. Следовательно, вероятность безотказной работы ЭМММ можно записать в виде

$$P(t) = P_{\text{п}}(t)P_{\text{об}}(t)P_{\text{к}}(t). \quad (1.17)$$

В машинах очень малых габаритов наиболее слабым элементом с точки зрения вероятности безотказной работы является обмотка $P_{\text{об}}(t)$. Это относится главным образом к изоляции последней.

Постепенное разрушение изоляции в эксплуатационных условиях обычно завершается пробоем (тепловым, электрическим, ионизационным), что обычно приводит к межвитковому замыканию и замыканию на корпус. Скорость старения изоляции тесно связана с классом изоляции.

На срок службы обмоток большое влияние оказывают механические и термомеханические факторы. Термомеханические нагрузки возникают в результате периодического нагрева и охлаждения обмоток. Механические нагрузки являются следствием электродинамических сил, возникающих между отдельными частями обмотки, неуравновешенности вращающихся частей, центробежных усилий, ударов и толчков со стороны проводного механизма. Возникающие усилия носят циклический характер и являются причиной вибраций.

Вероятность безотказной работы подшипниковых узлов $P_{\text{п}}(t)$ существенно зависит от износа подшипников, вызванного усталостью рабочих поверхностей, абразивного износа, износа в результате коррозии и аварийной поломки. Ненормальная работа подшипникового узла обнаруживается по чрезмерному превышению температуры, повышенному сопротивлению при вращении и увеличению момента трогания.

Отказы щеточно-коллекторного узла $P_{\text{к}}(t)$ в основном связаны с тремя группами причин: электромагнитными, механическими и физико-химической природой скользящего контакта. Первая группа включает в себя

электромагнитные нагрузки, напряжение между соседними коллекторными пластинами, реактивные ЭДС при коммутации, токовые перегрузки. Вторая группа – ослабление прессовки коллектора, его эксцентриситет и эллипсность, повреждение щеткодержателей, выступание отдельных пластин и т.п. Третья группа включает в себя износ щеток и коллектора, нажатие на щетку, материал коллектора, температуру, влажность, кислотность и запыленность окружающей среды.

Таким образом, с точки зрения надежности ЭМММ, при их проектировании следует обратить внимание на:

- а) правильный выбор коэффициента заполнения паза k_z ;
- б) применение высококачественных смазок;
- в) обеспечение достаточно жестких конструкций;
- г) правильный выбор величины воздушного зазора, так как при малых воздушных зазорах даже при небольшой выработке подшипников появляется неравномерность воздушного зазора, что приводит к увеличению нагрузки на подшипники, усилению вибраций;
- д) выбор качественных материалов и комплектующих изделий;
- е) назначение обоснованных допусков и запасов для ограничения технологического разброса.
- ж) правильный выбор обоснованных запасов по температуре нагревания обмоток, учитывающих возможность перегрузки и неточность тепловых расчётов;
- з) обеспечение надлежащей геометрии коллектора и правильный выбор марки щеток.

Немаловажное значение при проектировании ЭМММ имеет обеспечение её надлежащего виброакустического состояния. Силы, возбуждающие вибрацию и шум ЭМММ, по своей природе могут быть механического, магнитного, аэродинамического происхождения.

Источниками механических вибраций и шума являются неуравновешенный ротор, подшипники качения, коллекторный узел в коллекторных ЭМММ. Дисбаланс ротора вызывает колебания с частотами, кратными частоте вращения и амплитудами возмущающих сил, пропорциональными квадрату частоты вращения и дисбалансу ротора. Колебания, возбуждаемые подшипниковыми узлами, вызываются циклическими изменениями жесткости шарикоподшипников при вращении и геометрическим несовершенством элементов шарикоподшипников и посадочных мест, допущенным при сборке.

Магнитные вибрация и шум возникают вследствие периодического изменения электромагнитных усилий в воздушном зазоре между статором и ротором, обусловленных зубчатостью строения пазово-зубцовой зоны, эксцентриситетом, допущенным при сборке машины, отклонениями формы поверхности статора и ротора. Параметры возмущающих сил зависят от параметров магнитной системы, частоты вращения, числа пазов статора и ротора, технологических дефектов изготовления и сборки магнитной системы.

Колебания элементов щёточно-коллекторного узла возникают вследствие ударных взаимодействий щётки с пластинами коллектора, а также неточности изготовления элементов узла.

Колебания от различных факторов взаимодействуют между собой, в результате чего возникают вибрации в широком спектре частот с различными амплитудами.

1.4.6. Сертификация

Под сертификацией понимают процедуру подтверждения соответствия продукции установленным требованиям и проводимую организацией, не зависимой от изготовителя и потребителя.

Система сертификации – совокупность участников, осуществляющих сертификацию по установленным ими правилам. Центральным органом, возглавляющим систему сертификации, является Госстандарт России.

В результате сертификации заявителю выдается Сертификат, т.е. документ, удостоверяющий соответствие продукции установленным требованиям.

Сертификация имеет целью:

- 1) содействие потребителям в компетентном выборе продукции;
- 2) содействие экспорту и повышению конкурентоспособности продукции;
- 3) защиту потребителя от недобросовестности изготовителя (продавца);
- 4) контроль безопасности продукции для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества;
- 5) подтверждение показателей качества продукции, заявленных изготовителем.

В результате сертификации электрических машин определяется соответствие того или иного вида этой продукции электротехнической промышленности установленным сертификатом.

1.5. Общие сведения по расчету ЭМММ

1.5.1. Задачи и этапы проектирования ЭМММ

При проектировании ЭМММ решаются следующие задачи:

1) при заданных выходных характеристиках и свойствах ЭМММ требуется выбрать ее конструкцию и материалы, рассчитать основные размеры и обмоточные данные.

2) при заданной геометрии машины, обмоточных данных и свойствах использованных материалов требуется определить выходные характеристики.

Первая задача более общая и сводится к проектному расчету ЭМММ и нахождению наилучшего варианта по выбранному критерию оптимальности.

Вторая задача сводится к проверочному расчету машины. Она является необходимым компонентом первой задачи, так как после окончательного определения геометрии машины и нахождения ее обмоточных данных проводится полный проверочный расчет.

Проектный расчет включает в себя несколько этапов: обзорно-аналитический, расчетного синтеза и оптимизации, конструкторской проработки, технологической проработки, экспериментальной проверки, технико-экономического анализа и оформления необходимых документов.

На первом этапе составляется техническое задание, анализируются научно-техническая литература и патентный фонд и определяются принципиальные направления, на которых возможно получение требуемого результата. Прежде всего, выбирается принцип работы ЭМММ и осуществляется структурный синтез по каждому направлению.

На втором этапе выполняется проработка электромагнитной системы, позволяющая выбрать геометрические размеры, материалы, обмоточные данные, при которых обеспечиваются электромеханические показатели и ограничения по тепловому режиму. Другими словами, осуществляется оптимизация элементов структуры ЭМММ по параметрам.

Третий этап включает в себя компоновку, прочностные расчеты, расчеты размерных цепей, выбор конструкционных материалов и комплектующих изделий, изготовление чертежей или эскизов и т.д. При этом выявляются конструктивные ограничения, которые требуют внесения изменений в расчет электромагнитной системы.

На четвертом этапе конструкция ЭМММ анализируется технологами с позиций возможностей производства. При этом устанавливаются технологические ограничения, требующие соответствующих изменений конструктивных решений.

Следующий этап – изготовление образцов для экспериментальной проверки работоспособности и параметров проектируемой ЭМММ. По результатам экспериментов и испытаний вносятся коррективы в математическое обеспечение, конструкторскую и технологическую документацию. Проектный расчет заканчивается технико-экономической оценкой и документированием окончательных решений.

1.5.2. Содержание технического задания

Одним из основных этапов проектирования ЭМММ является составление технического задания (ТЗ), которое должно содержать все необходимые требования, предъявляемые к проектируемой машине. С одной стороны, в ТЗ конкретизируются требования к техническим параметрам проектируемой ЭМММ, а с другой – отражаются затратные данные. В ТЗ входят следующие разделы: назначение ЭМММ; основание к выполнению разработки; сроки начала и окончания проектирования; технические требования к машине; этапы и содержание работ; технологические требования к машине; сметная стоимость работ; порядок предъявления и сдачи законченного проекта. Утвержденное ТЗ является важнейшим источником информации, на основании которой специалисты ведут поиск способов и средств, обеспечивающих требуемый результат проектирования в виде соответствующего критерия оптимальности.

Укажем основные технические требования, предъявляемые к проектируемой машине.

1. Основные параметры и размеры

а) Номинальное напряжение питания U_H . Предельные отклонения напряжения питания от номинального значения, например, +3 В и –1 В.

б) Полезная мощность на валу P_H (или потребляемая мощность). Допустимое отклонение полезной мощности $\Delta P_H = \pm 0,2$ Вт.

в) Номинальная частота вращения и допустимые отклонения, например, $n_H = 15000$ об/мин, $\Delta n = \pm 450$ об/мин.

г) Схема подключения.

д) Габаритные и установочные размеры.

2. Требования к конструкции

а) Внешний вид электродвигателя должен соответствовать эталонному образцу, утвержденному в установленном порядке.

б) Исполнение двигателя по степени защиты по ГОСТ 17494–87. Например, степень защиты **IP20** предусматривает защиту от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной не более 80 мм и от проникновения твердых тел размером свыше 12 мм. Об этом свидетельствует первая цифра в обозначении, т.е. цифра «2», которая характеризует степень защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями и от попадания твердых тел внутрь корпуса. Вторая цифра в обозначении степень защиты от проникновения внутрь оболочки воды. В указанном обозначении этой цифрой является «0», которая указывает на отсутствие защиты от проникновения воды. Первые цифры условного обозначения находятся в пределах 0...6, вторые цифры в пределах 0...8. В обозначении **IP23** вторая цифра, т.е. цифра «3» характеризует защиту машины от дождя, падающего на оболочку под углом 60 градусов от вертикали; в обозначении **IP44** первая цифра «4» определяет защиту от проникновения внутрь оболочки проволоки и от проникновения твердых тел размером более 1 мм, а вторая цифра «4» характеризует защиту от воды, разбрызгиваемой на оболочку в любом направлении; в обозначении **IP42** вторая цифра «2» характеризует защиту от капель воды при наклоне оболочки до 15 градусов.

в) Система охлаждения (ГОСТ 20459–87). Полное обозначение способа охлаждения должно содержать буквы **IS** и группу знаков из одной буквы и двух цифр. Буква обозначает вид хладагента, используемого для охлаждения машины: воздух – **A**, водород – **H**, азот – **N**, двуокись углерода – **C**, масло – **V**, керосин – **K**. При использовании для охлаждения только воздуха буква **A** в обозначении опускается. Первой цифрой условно обозначается устройство цепи для циркуляции хладагента. Вторая цифра условного обозначения характеризует способ перемещения хладагента. Так, например, в условном обозначении способа охлаждения **IS01**. первая цифра «0» указывает на то, что хладагент (в данном

случае воздух) свободно подводится из окружающей среды и свободно возвращается в эту среду. Вторая цифра «1» характеризует способ перемещения хладагента за счёт вентилирующего действия ротора или с помощью специального устройства (вентилятора), расположенного на валу – самовентилиция. Асинхронный двигатель закрытого исполнения имеет систему охлаждения, состоящую из двух цепей: внутренней и внешней. Система охлаждения в данном случае имеет условное обозначение **IC0141**. **IC00** – свободная конвекция.

г) Класс нагревостойкости изоляции. Верхний предел допустимого нагрева изоляционных материалов, применяемых в электромашиностроении в зависимости от класса их нагревостойкости составляет 90...180°C: (**Y** – 90°), (**A** – 105°), (**E** – 120°), (**B** – 130°), (**F** – 155°), (**H** – 180°), (**C** – более 180°). В настоящее время в электрических машинах, в основном, применяются изоляционные материалы классов **E**, **B**, и **F** (ГОСТ 8865–93). Что касается материалов класса **H**, то они используются значительно реже. В последнее время разработаны изоляционные материалы с допустимой рабочей температурой 200...240°C. (Для специальных электрических машин).

д) Конструктивное исполнение по способу монтажа согласно ГОСТ 2479–79 условное обозначение исполнения по способу монтажа состоит из двух букв латинского алфавита и четырех цифр: **IMxxxx**. Первая цифра означает конструктивное исполнение, например: 1 – на лапах с подшипниковыми щитами; 2 – на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном из подшипниковых щитов; 3 – без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите и т.д. до цифры 9, характеризующей специальное исполнение, например, встраиваемое. Вторая и третья цифры характеризуют способы монтажа (пространственное положение машины) и направление конца вала. Четвертая цифра обозначает исполнение конца вала машины: 0 – без конца вала, 1 – с одним цилиндрическим концом вала, 2 – с двумя цилиндрическими концами вала, 3 – с одним коническим концом вала, 4 – с двумя коническими концами вала и т.д. Как уже отмечалось выше, в ЭМММ применяются в основном исполнения: **IM1001**; **IM2001**; **IM3001**. Нередко встречается исполнение **IM9001**.

3. Характеристики

а) Номинальный режим работы по ГОСТ 183–74: продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный и перемежающийся. Для ЭМММ наиболее характерными режимами являются **S1**, **S2**, **S3**.

Продолжительным режимом (**S1**) называют режим, при котором время работы машины при практически неизменной нагрузке и температуре окружающей среды достаточно для нагрева всех её частей до практически установившейся температуры. Режим характеризуется неизменными потерями.

Кратковременный режим (**S2**) – это режим, при котором периоды неизменной нагрузки чередуются с периодами отключения машины, причем за время нагрузки температура частей машины не успевает достигнуть установившихся значений, а

за время пауз машина практически охлаждается до холодного состояния. Согласно стандарту длительность периодов работы в этом режиме – 10, 30, 60, 90 мин.

Повторно-кратковременный режим (**S3**). В этом режиме продолжительность включения под неизменную нагрузку и продолжительность отключения (пауз) регламентированы. Продолжительность включения (ПВ) устанавливается в процентах одного цикла, включающего в себя время работы и время паузы. Продолжительность включения для всех повторно-кратковременных режимов может составлять 15, 25, 40 и 60%. В повторно-кратковременном режиме *S3* продолжительность цикла установлена 10 мин:

$$\text{ПВ} = \frac{N}{N + R} \cdot 100, \quad (1.18)$$

где N, R – время работы и паузы.

К повторно-кратковременному режиму относят также режим *S4*, характеризующийся частыми пусками, при которых длительность одного цикла определяется числом включений в час: 30, 60, 120 или 240 при определенном коэффициенте инерции FI , равном 1,2; 2,0; 2,5; 6,3 или 10, причем

$$FI = \frac{J_{\text{рот}} J_{\text{прив.мех.}}}{J_{\text{рот}}}. \quad (1.19)$$

В условном обозначении режима указывается продолжительность включения в процентах и коэффициент инерции, например, **S4** – 25, 120 включений в час, FI – 2,0. Это означает, что двигатель при коэффициенте инерции FI – 2,0 рассчитан на работу при 120 включениях в час, длительность каждого цикла $60/120 = 0,5$ мин, из которых время пуска (D) и время работы (N) составляет 25%, т.е. 7,5 с, а время паузы (R) – 22,5 с.

Времена, пуска работы и паузы связаны следующим соотношением:

$$\text{ПВ} = \frac{D + N}{D + N + R} \cdot 100. \quad (1.20)$$

Повторно-кратковременный режим с частыми пусками, реверсами (**S5**) отличается от режима *S4* тем, что в конце каждого цикла происходит торможение. Эксплуатация двигателей рассчитана при коэффициентах инерции $FI = 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0$. При этом

$$\text{ПВ} = \frac{D + N + F}{D + N + F + R} \cdot 100, \quad (1.21)$$

где F – время электрического торможения.

б) Для ЭМММ постоянного тока в техническом задании указывается степень искрения щёток следующими баллами:

1 – искрение отсутствует;

$1\frac{1}{4}$ – слабое искрение под небольшой частью края щётки;

$1\frac{1}{2}$ – слабое искрение под большей частью щётки;

2 – искрение под всем краем щётки.

При работе с номинальными параметрами допускается искрение $1\frac{1}{4}$. При перегрузках искрение должно быть не более 2.

в) Двигатель должен выдерживать без повреждений заданное число включений (например, 10) при заблокированном якоре при определенном напряжении (продолжительность включений и пауз между ними задана, например, 3 и 4 с);

г) Двигатель должен выдерживать заданную перегрузку по току;

д) Кратность начального пускового момента и тока короткого замыкания не должны быть, соответственно, менее и более заданных значений;

е) КПД в номинальном режиме не должен быть менее заданного (например, 60%);

ж) Средний уровень шума двигателя должен соответствовать ГОСТ 16372–93;

з) Уровень радиопомех не должен превышать значений, указанных в ГОСТ–23511.

4. Требования по устойчивости к внешним климатическим и механическим воздействующим факторам

а) Климатическое исполнение и категория размещения при эксплуатации установлены ГОСТ 15150–69. При условном буквенно-цифровом обозначении на предпоследнем месте проставляется цифра, обозначающая категорию размещения. Например, *XXXXV2* – машина для умеренного климата и для эксплуатации в открытом воздухе или в помещении, где колебания температуры не отличаются от колебаний на открытом воздухе. Тот же ГОСТ регламентирует условия хранения и транспортировки.

б) ЭМММ постоянного тока, работающая в режиме двигателя, должна оставаться работоспособной в нижеследующих условиях:

– после воздействия вибрационных нагрузок с заданной частотой и заданном вибрационном ускорении (например, с частотой 50...250 Гц и виброускорением до 4g);

– после воздействия возможных ударных нагрузок с определенными значениями ускорения (например, до 100g) и длительности импульса (например, 1...20 мс);

– при заданном повышенном значении температуры окружающей среды (например, 70°C);

– при заданном пониженном значении температуры окружающей среды (например, –20°C);

– при заданном уровне относительной влажности воздуха (например, 95%);

– после циклического изменения температуры (например, от –20°C до +30°C);

– при заданном значении превышения температуры обмотки якоря (например, 80°C) над заданной температурой окружающей среды при работе в режиме, указанном в задании.

5. Требования к надежности и безопасности

а) В требовании безопасности должны быть указаны средняя наработка до отказа, вероятность безотказной работы, срок службы;

б) Электрическое сопротивление между валом и обмоткой якоря должно быть в нормальных климатических условиях при практически холодном состоянии не менее 20 МОм;

в) Изоляция между валом и обмоткой якоря должна выдерживать в нормальных климатических условиях при практически холодном состоянии без пробоя и поверхностного перекрытия действие испытательного напряжения 250 В (среднеквадратичное значение) синусоидальной формы частотой 50 Гц в течение 1 с.

1.6. Методы проектирования ЭМММ

1.6.1. Энергетический метод проектирования

При проектировании ЭМММ используются два метода: энергетический и параметрический. Энергетический метод является традиционным (классическим). Согласно этому методу выбор основных размеров электрической машины осуществляется, исходя из «машинной постоянной», которая связывает главные геометрические размеры, мощность машины, основные электромагнитные нагрузки и требуемые энергетические показатели КПД и $\cos\varphi$. В общем случае «машинная постоянная» будет

$$C = \frac{D^2 l_\delta \Omega}{P_a} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{o6} A B_\delta} \quad (1.22)$$

или

$$C = \frac{D^2 l_\delta n}{P_a} = \frac{6}{\alpha_\delta k_B k_{o6} A B_\delta}. \quad (1.23)$$

Здесь P_a – расчетная мощность (ВА)

$$P_a = mIE = \frac{k_E}{\eta \cos\varphi} P_2, \quad (1.24)$$

где D – внутренний диаметр ротора статора в асинхронных и синхронных машинах; наружный диаметр якоря в машинах постоянного тока (м);

l_δ – расчетная длина воздушного зазора (м);

Ω – угловая частота вращения (рад/сек);

n – частота вращения (об/мин);

α_δ – коэффициент расчетной полюсной дуги;

k_B – коэффициент формы поля (для машины постоянного тока $k_B = 1$);

k_{o6} – обмоточный коэффициент (для машины постоянного тока $k_{o6} = 1$);

A – линейная нагрузка (А/м);

B_δ – индукция в воздушном зазоре (Тл);

P_2 – отдаваемая номинальная мощность (мощность на валу двигателя или отдаваемая в сеть мощность генератора (Вт);

I, E – соответственно номинальный ток и ЭДС обмотки статора асинхронных и синхронных машин, номинальный ток и ЭДС обмотки якоря для машин постоянного тока;

η и $\cos\varphi$ – коэффициент полезного действия (КПД) и коэффициент мощности машины (для машины постоянного тока $\cos\varphi = 1$);

k_E – отношение ЭДС обмотки к номинальному напряжению;

m – число фаз обмотки (для машины постоянного тока $m = 1$).

Энергетический метод проектирования предусматривает предварительный выбор электромагнитных нагрузок (индукции в воздушном зазоре, линейной нагрузки, плотности тока в обмотках и др.), а также основных энергетических показателей (КПД и $\cos\varphi$) в зависимости от мощности машины и частоты вращения. Этот выбор осуществляется на основе многолетнего опыта проектирования и эксплуатации и большого количества электрических машин.

1.6.2. Параметрический метод проектирования ЭМММ

Для проектирования большинства ЭМММ систем автоматики энергетический метод проектирования нерационален. Требование хороших энергетических показателей для этих машин носит подчиненный характер целому ряду специальных требований, зависящих от условий работы в конкретных установках. В связи с этим проектирование подобных ЭМММ наиболее рационально вести, исходя из других соотношений, которые в отличие от «машинной постоянной» связывают основные геометрические размеры с основными техническими показателями (высоким быстродействием, малой нелинейностью выходных характеристик и др.) через соответствующие параметры. В соответствии с этим подобный метод называется параметрическим. Этот метод применительно к асинхронным исполнительным двигателям (АИД) был разработан Ю.С. Чечетом. Впоследствии он был распространен и на другие типы машин.

Параметрический метод оказывается особенно эффективным при оптимизационном проектировании ЭМММ в системах автоматизированного расчета (САПР). При этом наиболее важной частью математического обеспечения автоматизированного проектирования любого объекта, в том числе и ЭМММ, является математическая модель объекта.

Под математической моделью ЭМММ условимся понимать совокупность формул и уравнений, описывающих все элементы и процессы, протекающие при ее работе. Использование математической модели и параметрического метода является основой системного подхода к проектированию ЭМММ, позволяющего органически соединить анализ и синтез, и, таким образом, обеспечить заданные выходные характеристики проектируемой машины. Синтез представляет собой описание объекта или его варианта, а анализ оценку свойств и исследование объекта по его описанию. Синтез может быть структурным и параметрическим.

Структурный синтез определяет выбор необходимых модификаций и конструктивных исполнений машины, а также основных технологических решений и др. Параметрический синтез – это определение числовых значений внутренних параметров электрической машины: размеров магнитной системы, обмоточных данных и др. При автоматизированном проектировании синтезируется множество вариантов проектируемой машины, из которых выделяется некоторое подмножество, необходимое для выбора и принятия решений. Задача выбора и принятия решения является задачей оптимизации.

Нас в дальнейшем будет интересовать параметрический метод синтеза, предполагающий целенаправленный выбор и сравнение только тех вариантов, которые обеспечивают заданные характеристики и свойства, полученные на основе анализа. Таким образом, синтез и анализ жестко связаны, причем основой их взаимосвязи являются относительные величины. Применительно к АИД речь может идти об относительных параметрах схем замещения, диапазон изменения которых примерно одинаков для определенного класса машин. Так, например, для АИД в результате анализа определены зависимости эксплуатационных характеристик (быстродействия, напряжения трогания, отсутствия самохода и др.) от параметров схемы замещения, которые связаны с основными размерами машины, а также с величинами индукции в воздушном зазоре B_δ и плотности тока. При этом в качестве базовых величин при определении относительных параметров АИД принимаются сопротивление ротора r_r или сопротивление взаимоиндукции x_m .

При проведении оптимизации и поверочных расчетов асинхронных двигателей малой мощности широко применяются модели с сосредоточенными параметрами, в которых магнитные и индуктивные параметры определяются классическими методами: на основе расчета магнитной цепи, коэффициентов удельной магнитной проводимости рассеяния. Эти модели близки к моделям, применяемым при ручных расчетах, но с некоторой адаптацией к особенностям ЭВМ.

1.6.3. Особенности математического моделирования ЭМММ

Выше было дано определение математической модели ЭМММ. Для пояснения этого понятия обратимся к выражению, определяющему активное сопротивление секции обмотки якоря ЭМММ [11]

$$R = \rho \frac{l}{q}, \text{ Ом}, \quad (1.25)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника, Ом·м;

l – средняя длина проводников секции, м;

при этом

$$l = \sum_{i=1}^{w_s} 2(l_a + l_{лб}). \quad (1.26)$$

Здесь w_s – число витков секции;

l_a – длина активной части проводника, м;

$l_{\text{лб}}$ – длина лобовой части проводника, м.

Расчетное (эффективное) сечение проводника можно определить, если известны площадь паза Q , коэффициент заполнения пазов медью $k_{\text{з.п.}}$, а также число проводников в пазу $N_{\text{п}}$.

$$q_a = \frac{Qk_{\text{з.п.}}}{N_{\text{п}}}, \text{ м}^2. \quad (1.27)$$

Значение q_a уточняется по стандарту.

После подстановки значений l и q_a в формулу R получим математическую модель для определения R через геометрические размеры проектируемой машины. Одной из важнейших характеристик математической модели является адекватность, оцениваемая по степени совпадения расчетных и экспериментальных результатов.

Наличие адекватных моделей позволяет заменить дорогостоящее и трудоемкое натурное моделирование. В частности с помощью моделей успешно решаются задачи оптимизации ЭМММ, являющиеся задачами поиска экстремумов при нелинейных системах уравнений и нелинейных ограничениях.

Для традиционных процессов проектирования ЭМММ характерно использование частных математических моделей и программ, охватывающих отдельные типы машин, в том числе, асинхронных двигателей, двигателей постоянного тока, шаговых двигателей, синхронных и субсинхронных двигателей малой мощности, вращающихся трансформаторов, сельсинов, тахогенераторов, редуктосинов и др.

Напомним, что получение при анализе взаимосвязи между параметрами и характеристиками ЭМММ позволяют определить их геометрические размеры, удовлетворяющие заданным условиям. Таким образом, в спроектированной машине происходит как бы синтез всех показателей, которые установлены анализом. При этом основой жесткой взаимосвязи между параметрами и характеристиками являются относительные величины. Так, например, для асинхронных двигателей речь может идти об относительных параметрах схем замещения.

В результате применения параметрического метода проектирования возможно получение множества вариантов проектной задачи, из которых должно быть выделено одно, необходимое для выбора и принятия окончательного решения задачи по оптимизации проектируемой машины.

1.7. Пазово-зубцовая зона микромашин переменного тока

1.7.1. Выбор числа пазов статора и ротора неявнополюсных машин

Число пазов определяется выражением

$$Z_{s(r)} = 2pmq,$$

где p – число пар полюсов;

m – число фаз;

q – число пазов на полюс и фазу, принимаемое для статора обычно целым.

Для асинхронных двигателей (АД) с двухфазной обмоткой статора:

при $2p=2$: $Z_s = 8, 12, 16, 24, 32$; при $2p=4$: $Z_s = 8, 16, 24, 32$.

Для двигателей с трехфазной обмоткой статора

при $2p=2$: $Z_s = 12, 18, 24, 30, 36$; при $2p=4$: $Z_s = 12, 24, 36$.

В однофазных АД с пусковым элементом $Z_s = 18, 24, 36$, причем

при $2p=2$: $Q_A = 6; 8; 12$; $Q_B = 3; 4; 6$; при $2p=4$: $Q_A = 3; 4; 6$; $Q_B = 1, 5; 2; 3$.

Здесь Q_A и Q_B – число пазов на полюс главной и вспомогательной обмотки.

Для бытовых АД при мощности до 60 Вт наиболее рациональным является $Z_s = 16$, а при больших мощностях $Z_s = 24$, реже $Z_s = 32$.

У большинства асинхронных конденсаторных двигателей (АКД) $Z_s = 24$.

В однофазных АД с пусковыми элементами на главную обмотку, как правило, отводится $2/3$ общего числа пазов, а на вспомогательную – $1/3$. Это позволяет устранить третью гармонику в кривой МДС главной фазы.

К выбранному числу пазов статора Z_s подбирают число пазов ротора Z_r . В АД соотношение Z_s / Z_r влияет на уровень звука и вибрации, на провалы в кривой вращающего момента под действием паразитных синхронных и асинхронных моментов, обусловленных высшими гармониками поля. Наиболее рациональные соотношения Z_s / Z_r для АД приведены в работе [13].

Уменьшению влияния высших пространственных гармоник способствует надлежащее распределение и укорочение шага обмоток. Что касается уменьшения влияния высших зубцовых гармоник и снижения, связанных с ними паразитных моментов, шумов и вибраций, то наряду с надлежащим выбором соотношения Z_s / Z_r используют скос пазов. Обычно скос пазов выполняют на роторе, причем величину его принимают равной одному зубцовому делению статора (рис.1.4).

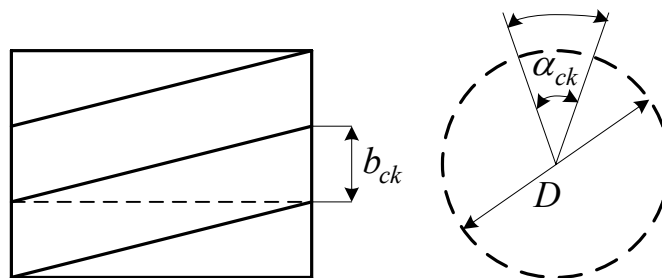


Рис. 1.4. Определение центрального угла скоса

Для подавления колебаний пускового момента иногда его выполняют на одно зубцовое деление ротора.

$$\alpha_{\text{СК}} = \frac{b_{\text{СК}}\pi}{\tau} = \frac{b_{\text{СК}}\pi}{\frac{\pi D}{2p}} = \frac{2pb_{\text{СК}}}{D} = \frac{2p\pi b_{\text{СК}}}{\pi D Z_r} = \frac{2p\pi b_{\text{СК}}}{Z_r t_r} = \frac{2p\pi}{Z_r} \beta_{\text{СК}}, \quad (1.28)$$

где $\beta_{\text{СК}} = \frac{b_{\text{СК}}}{t_r}$.

Тогда коэффициент скоса для первой гармоники

$$k_{\text{СК}} = \frac{\sin \frac{\alpha_{\text{СК}}}{2}}{\frac{\alpha_{\text{СК}}}{2}} = \frac{\sin(p\pi / Z_r) \beta_{\text{СК}}}{(p\pi / Z_r) \beta_{\text{СК}}}. \quad (1.29)$$

1.7.2. Формы и размеры пазов статора и ротора

Пакеты статора и ротора неявнополюсных электрических микромашин набирают из листов электротехнической стали толщиной 0,35 мм и 0,5 мм. Для этой цели применяют горячекатаную сталь марок 1212, 1213, 1311, 1312, 1313, а при повышенной частоте – 1511, 1512, 1513. Нередко используют также холоднокатаную сталь 2211, 2412 и т.п.

При проектировании электрических микромашин систем автоматики существенное значение имеет определение геометрии пазово-зубцовой зоны, в том числе формы пазов статора и ротора. В этих машинах широкое применение находят пазы овальной, полуовальной, трапецеидальной и круглой формы – полузакрытые и закрытые. Они обеспечивают одинаковую ширину зубцов по высоте.

В качестве исходной величины для определения размеров паза служит его площадь

$$Q_{\text{п}} = \frac{W_{\text{ф}} q_{\text{аи}} 10^{-6}}{p q k_{\text{ип}}}, \text{ м}^2, \quad (1.30)$$

где $W_{\text{ф}}$ – число витков фазной обмотки;

$q_{\text{аи}}$ – сечение изолированного проводника

$$q_{\text{аи}} = \frac{\pi d_{\text{аи}}^2}{4}, \text{ мм}^2,$$

причем $d_{\text{аи}}$ – диаметр изолированного проводника, мм; $k_{\text{ип}} \approx 0,28 \dots 0,43$.

На рис. 1.5 изображены некоторые геометрические формы пазов статора и ротора и указаны их размеры.

Пазы статора

Овальный паз (см. рис. 1.5, а)

$$d_1 = \frac{\pi(D_{\text{а}} + 2h_{\text{ш}}) - Zb_z}{Z - \pi}, \text{ м}, \quad (1.31)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4\pi Q_{\Pi} + d_1^2 (Z - 5)}{Z + 5}}, \text{ м}, \quad (1.32)$$

$$h_{\Pi} = \frac{Z(d_2 - d_1)}{2\pi} + \frac{d_2 + d_1}{2} + h_{\text{ш}}, \text{ м}, \quad (1.33)$$

Полуовальный паз (см. рис.1.5, б)

$$d_1 = \frac{\pi(D_a + 2h_{\text{ш}}) - Zb_z}{Z - 5}, \text{ м}, \quad (1.34)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{4\pi Q_{\Pi} + d_1^2 (Z - 5)}{Z}}, \text{ м}, \quad (1.35)$$

$$h_{\Pi} = \frac{Z(b_z - d_1)}{2\pi} + \frac{d_1}{2} + h_{\text{ш}}, \text{ м}, \quad (1.36)$$

Трапецеидальный паз (см. рис. 1.5, в)

$$b_1 = \frac{\pi(D_a + 2h_{\text{ш}} + h_3)}{Z} - b_z, \text{ м}, \quad (1.37)$$

$$b_2 \approx \frac{\sqrt{4\pi Q_{\Pi}}}{Z} + b_1^2, \text{ м}, \quad (1.38)$$

$$h_{\Pi} = \frac{2Q_{\Pi}}{b_1 + b_2} + h_{\text{ш}} + h_3, \text{ м}. \quad (1.39)$$

Паза ротора

Овальный паз (см. рис.1.5, г)

$$d_1 = \frac{\pi(D_a - 2h_{\text{ш}}) - Zb_z}{Z + \pi}, \text{ м}, \quad (1.40)$$

$$d_2 = \frac{d_1^2 (Z + 5) - 4\pi Q_{\Pi}}{Z - 5}, \text{ м}, \quad (1.41)$$

$$h_{\Pi} = \frac{Z(d_1 - d_2)}{2\pi} + \frac{d_1 + d_2}{2} + h_{\text{ш}}, \text{ м}. \quad (1.42)$$

Паз с трапецеидальной частью у открытия (см. рис.1.5, д)

$$b_1 = \frac{\pi(D_a - 2h_{\text{ш}} - 2h_3)}{Z} - b_z, \text{ м}, \quad (1.43)$$

$$d_2 \approx \frac{Zb_1^2 - 12,6Q_{\Pi}}{Z - 5}, \text{ м}, \quad (1.44)$$

$$h_{\Pi} = \frac{Z(b_1 - d_2)}{2\pi} + \frac{d_2}{2} + h_{\text{ш}} + h_3, \text{ м}. \quad (1.45)$$

Ширина зубца при равномерном сечении:

$$b_z = \frac{B_{\delta} t_1}{B_z k_c} \geq 0,001, \text{ м}, \quad (1.46)$$

где t_1 – зубцовое деление по окружности статора

$$t_1 = \frac{\pi D_a}{Z}, \text{ м.} \quad (1.47)$$

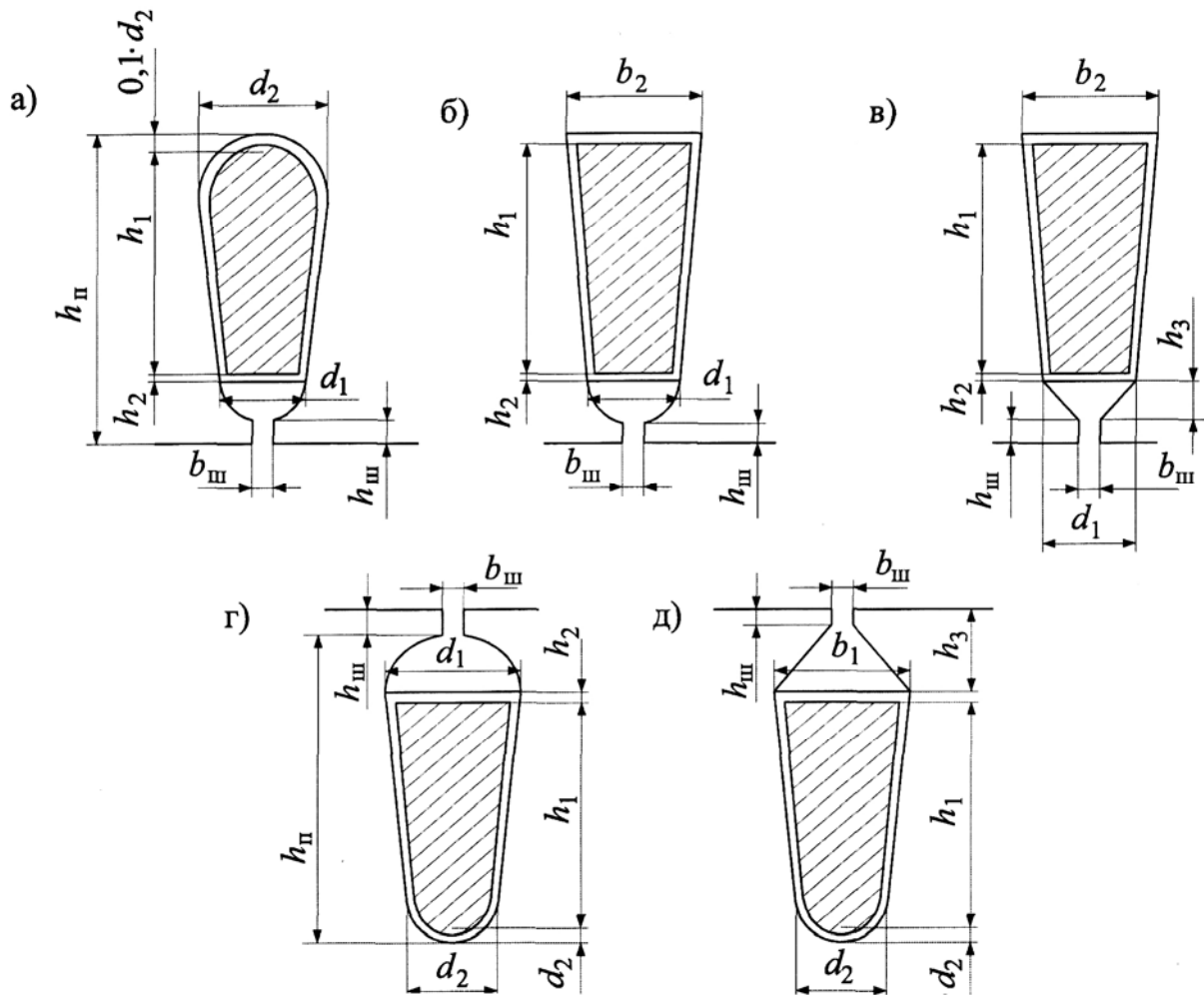


Рис. 1.5. Формы пазов статора (а, б, в) и ротора (г, д)

$B_z = 0,9 \dots 1,3$, Тл – индукция в зубце.

Высота шлица (щели)

$$h_{\text{ш}} = (0,0003 \dots 0,0015), \text{ м.}$$

Ширина шлица

$$b_{\text{ш}} = (d_{\text{аи}} + 2 b_{\text{из}} + 0,0002), \text{ м.}$$

Толщина клина

$$h_{\text{кл}} = (0,0003 \dots 0,001), \text{ м.}$$

Здесь $b_{\text{из}}$ – пазовая изоляция выполняемая, как правило, из лавсановой пленки толщиной 0,00019 м; пазовый клин выполняется обычно из лавсана толщиной 0,00035 м. Попутно введем понятие технологического коэффициента заполнения паза

$$f_0 = \frac{N_{\text{п}} d_{\text{аи}}^2}{Q_{\text{пп}}} \approx 0,70 \dots 0,74 \quad (1.48)$$

где $N_{\text{п}}$ – число проводников в пазу;

$Q_{\text{п}}$ – площадь пазы, занимаемая изолированными проводниками, мм².

На рис. 1.6 изображены пазы статора и ротора круглой формы. В случае асинхронных микродвигателей с короткозамкнутым ротором $d_r \geq 0,002$ м выбирают из соображений наилучшего заполнения пазы алюминием при заливке. Что касается высоты шлица $h_{\text{шр}}$, ширины шлица $b_{\text{шр}}$, то в упомянутом случае их выбирают соответственно $h_{\text{шр}} \approx 0,0004 \dots 0,0008$ м и $b_{\text{шр}} \approx 0,0008 \dots 0,001$ м. У закрытых пазов $h_{\text{шр}} \approx 0,0003 \dots 0,0004$ м.

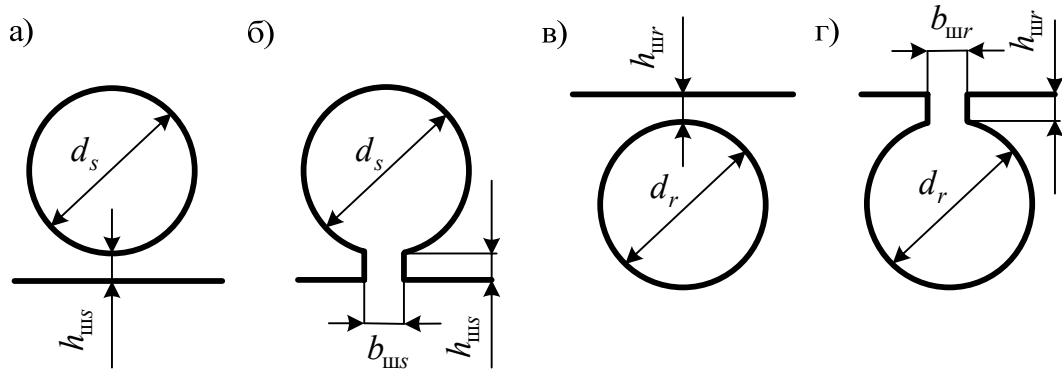


Рис. 1.6. Круглые пазы статора (а,б) и ротора (в,г):
(а,в) – закрытые; (б,г) – полузакрытые

1.7.3. Оптимальные размеры активного слоя статора и ротора

Намагничивающий ток в неявнополюсных машинах, например, в асинхронных микродвигателях общего применения составляет 60...80%, а иногда и более, номинального тока. Рациональный выбор размеров ширины зубца и высоты спинки статора и ротора позволяет снизить величину намагничивающего тока (коэффициента насыщения k_{μ}) и магнитные потери. Для решения задачи оптимизации размеров пазов статора и ротора удобно ввести следующие конструктивные коэффициенты [13]:

отношения внутреннего диаметра статора к внешнему

$$k_D = \frac{D}{D_{\text{н}}}; \quad (1.49)$$

относительной площади пазов статора

$$k_{zs} = \frac{\frac{Q_{\text{пс}} Z_s}{\pi D_{\text{н}}^2} - \frac{Q_{\text{пс}} Z_s}{\pi D^2}}{\frac{Q_{\text{пс}} Z_s}{\pi D^2} \left(\frac{1}{k_D^2} - 1 \right)}; \quad (1.50)$$

относительной площади пазов ротора

$$k_{zr} = Q_{\Pi r} Z_r / \left(\frac{\pi D_r^2}{4} \right), \quad (1.51)$$

где Z_s и Z_r – число пазов статора и ротора; $Q_{\Pi s}$ и $Q_{\Pi r}$ – площадь паза статора и площадь паза ротора.

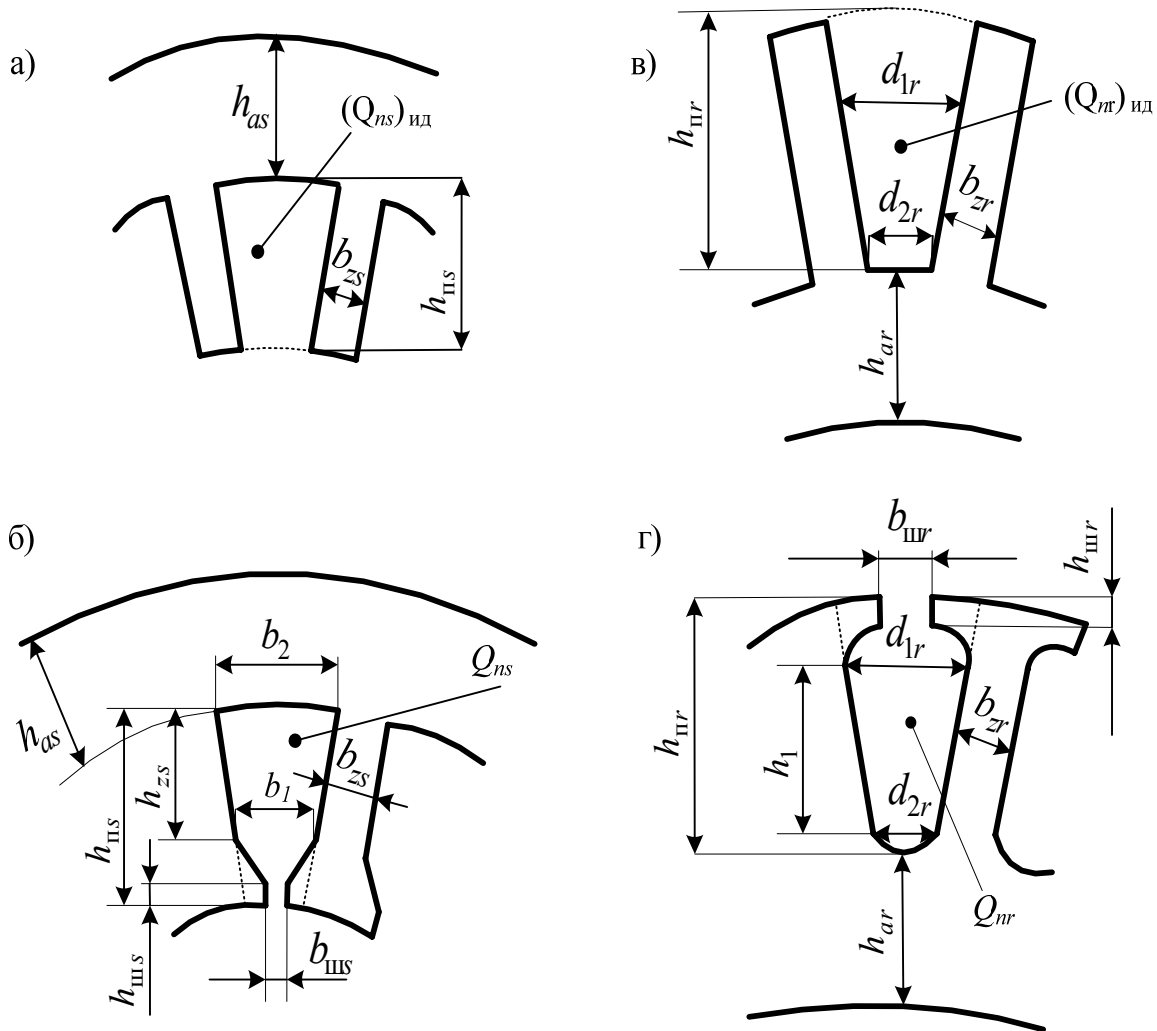


Рис. 1.7. Идеализированные (а,в) и реальные (б,г) пазы статора и ротора

Задача решается для идеализированных пазов, площадь которых связана с площадью реальных пазов с помощью коэффициентов (см. рис. 1.7):

$$k_{3s} = \frac{Q_{ns}}{(Q_{ns})_{ид}}; \quad k_{3r} = Q_{nr} / (Q_{nr})_{ид}.$$

Для трапециевидальных пазов $k_{3s} = 0,94 \dots 0,92$; для овальных и круглых пазов $k_{3s} = 0,90 \dots 0,87$;

Суммарную площадь реальных пазов статора с параллельными стенками зубцов можно записать в виде

$$Q_{ns}Z_s = k_{zs} \left\{ \frac{\pi}{4} [(D_H - 2h_{as})^2 - D^2] - Z_s b_{zs} 0,5(D_H - 2h_{as} - D) \right\}, \text{ м}^2. \quad (1.52)$$

Магнитный поток полюса

$$\Phi_\delta = \frac{2}{\pi} B_\delta \frac{\pi D}{2p} l_\delta = 2h_{as} k_c B_{as} l_\delta, \text{ Вб}. \quad (1.53)$$

Магнитный поток зубца

$$\Phi_z = \frac{\pi D}{Z_s} B_\delta l_\delta = B_{zs} b_{zs} k_c l_\delta, \text{ Вб}. \quad (1.54)$$

Здесь B_δ , B_{as} , B_{zs} – индукции в воздушном зазоре, спинке и зубце статора, Тл; k_c – коэффициент заполнения пакета статора сталью; b_{zs} – ширина зубца, м; h_{as} – высота спинки статора, м.

Из выражений (1.53) и (1.54) будем иметь:

$$h_{as} = \frac{D}{2pk_c \chi_a}, \text{ м и } b_{zs} = \frac{\pi D}{Z_s k_c \chi_z}, \text{ м},$$

где $\chi_a = \frac{B_{as}}{B_\delta}$ и $\chi_z = \frac{B_{zs}}{B_\delta}$.

В результате выражение (1.52) с учетом значений k_{zs} , h_{as} , b_{zs} преобразуется к виду [13]:

$$\begin{aligned} Q_{ns}Z_s &= k_{zs} \left[\frac{\pi D}{4} \left(\frac{1}{k_D^2} - 1 \right) \right] = k_{zs} \left\{ \frac{\pi}{4} [(D_H - 2h_{as})^2 - D^2] - Z_s b_{zs} 0,5(D_H - 2h_{as} - D) \right\} = \\ &= k_{zs} \left\{ \frac{\pi}{4} \left[\left(D_H - \frac{2D}{2pk_c \chi_a} \right)^2 - D^2 \right] - \frac{\pi D}{k_c \chi_z} 0,5 \left(D_H - \frac{2D}{2pk_c \chi_a} - D \right) \right\} = \\ &= k_{zs} \left\{ \frac{\pi}{4} D_H^2 \left[\left(1 - \frac{k_D}{pk_c \chi_a} \right)^2 - k_D^2 \right] - \frac{0,5\pi D_H^2 k_D}{k_c \chi_z} \left(1 - \frac{k_D}{pk_c \chi_a} - k_D \right) \right\}, \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Окончательно получим:

$$k_{zs}(1 - k_D^2) = k_{zs} \left\{ \left[1 - \frac{k_D}{pk_c \chi_a} \right]^2 - k_D^2 \right\} - \frac{2k_D}{k_c \chi_z} \left(1 - \frac{k_D}{pk_c \chi_a} - k_D \right). \quad (1.55)$$

Аналогичное уравнение можно получить и для ротора. Последнее уравнение связывает конструктивные коэффициенты k_D и k_{zs} с относительными значениями индукции χ_a и χ_z и может использоваться для решения различных задач по определению рациональных размеров листа статора. При этом значения k_D , h_{as} , b_{zs} задаются из технологических соображений. Если соотношения между χ_a и χ_z неизвестны, то можно принять: $\chi_a = \chi_z$ при $2p=4$; $\chi_z = 1,25\chi_a$ при $2p=2$.

1.8. Обмотки статора машин переменного тока малой мощности

1.8.1. Виды обмоток статора

В трехфазных двигателях, конденсаторных и однофазных с пусковыми элементами наиболее широкое применение получили трехфазные и двухфазные обмотки: распределенные и сосредоточенные. Последние применяют в бесконденсаторных и явнополюсных машинах, причем обмотки изготавливаются в виде катушек и располагаются на явнополюсных полюсах.

Распределенные обмотки могут быть однослойными и двухслойными. К достоинствам двухслойных обмоток следует отнести возможность изготовления соответствующего укорочения, что улучшает форму кривой МДС и индукции.

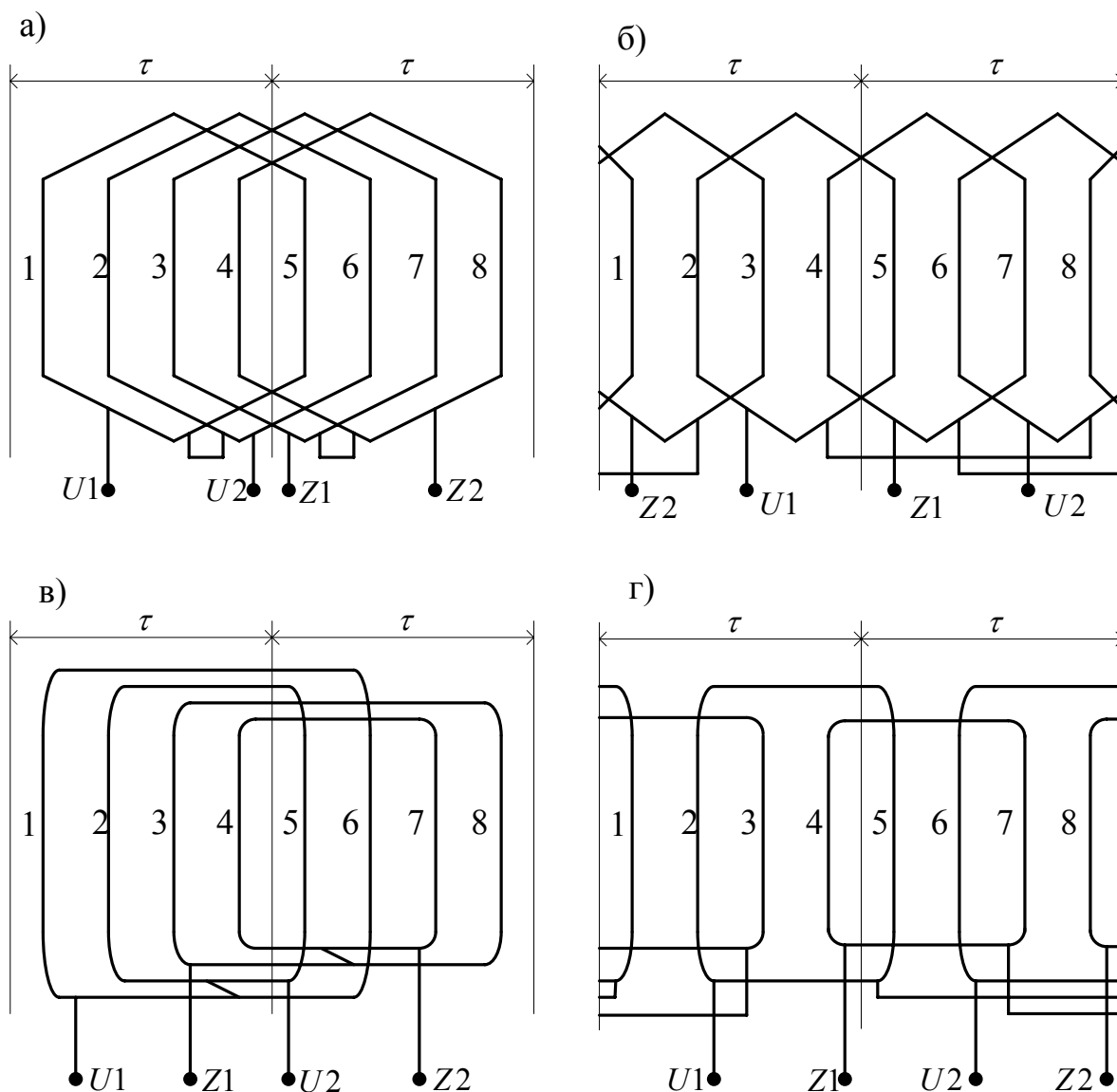


Рис. 1.8. Двухфазные однослойные обмотки:

- а) равносекционная; б) равносекционная с укороченными секциями;
- в) концентрическая; г) концентрическая с укороченными секциями

В зависимости от формы катушек и размещения лобовых соединений различают обмотки концентрические и равносекционные (катушечные).

Рассмотрим некоторые примеры двухфазных обмоток при следующих данных (рис. 1.8): $m = 2$; $Z_s = 8$; $2p = 2$; $q = \frac{Z_s}{2pm} = \frac{8}{2 \cdot 2} = 2$. Во всех схемах фазы обмоток образуются проводниками, лежащими в одних и тех же пазах.

Они отличаются последовательностью соединения секционных сторон, а также формой и размерами лобовых частей. В схемах обмоток (см. рис. 1.8, б,г) удастся укоротить лобовые соединения по сравнению с их длиной (см. рис. 1.8, а,в). В первом случае лобовые соединения выполняются «в развалку».

На рис. 1.9 изображены двухслойные обмотки при тех же данных: $m = 2$; $Z_s = 8$; $2p = 2$; $q = 2$.

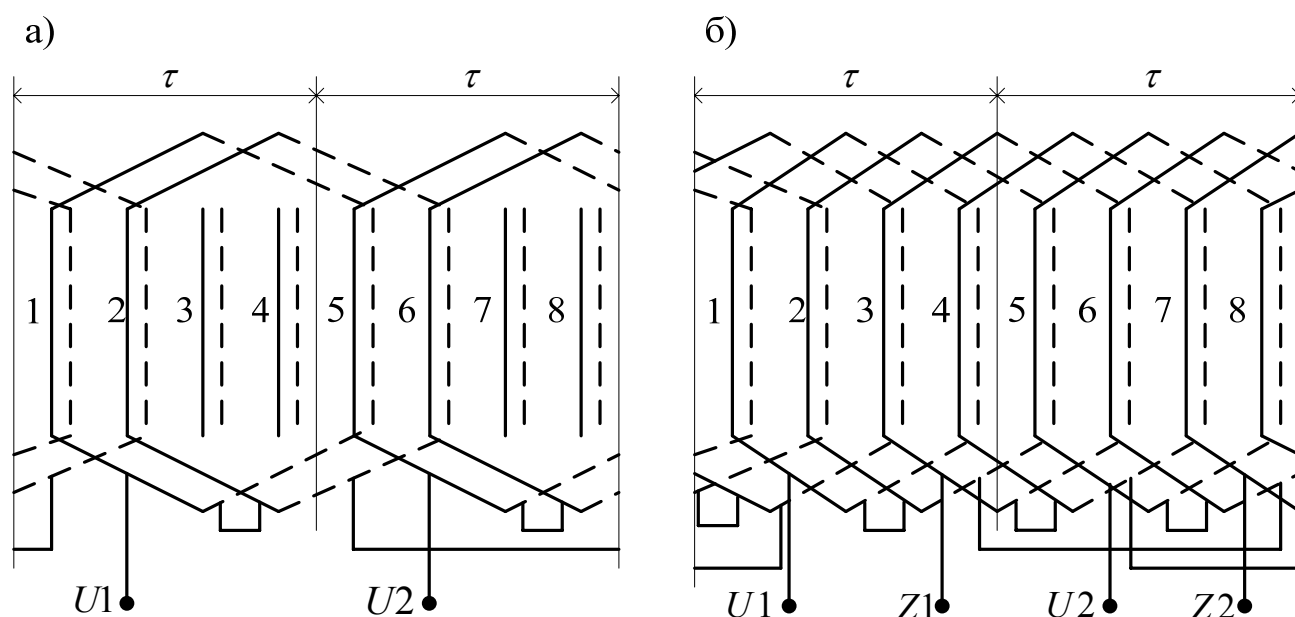


Рис. 1.9. Двухфазная двухслойная обмотка:

а) без укорочения шага ($y = \tau = 4$); б) с укорочением шага $y = \frac{3}{4}\tau$

Двухфазная двухслойная обмотка при $m = 2$; $Z_s = 24$; $2p = 4$; $q = 3$; $y = (2/3)\tau = 4$ приведена на рис. 1.10. Здесь изображена одна фаза, состоящая из четырех катушечных групп. Так же показаны начало и конец второй фазы, которая строится аналогично первой.

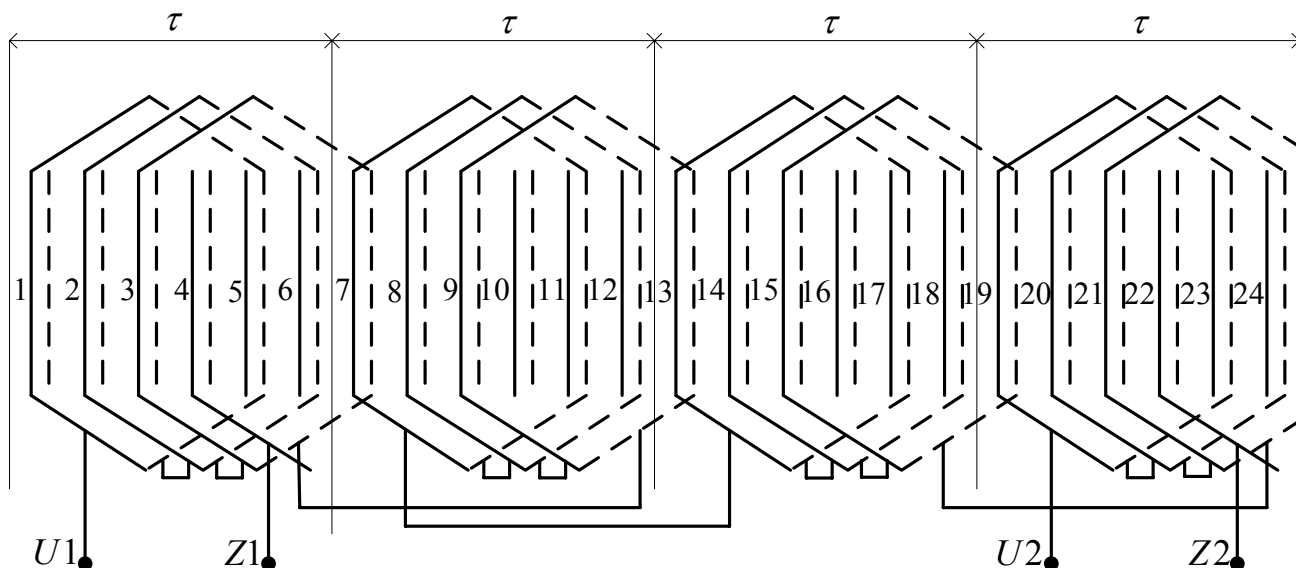


Рис. 1.10. Двухфазная двухслойная обмотка с укороченным шагом

Ниже изображена однослойная concentрическая обмотка АДК (рис. 1.11) с параметрами $m = 2$; $Z_s = 24$; $2p = 4$; $Q_U = 4$ и $Q_Z = 2$.

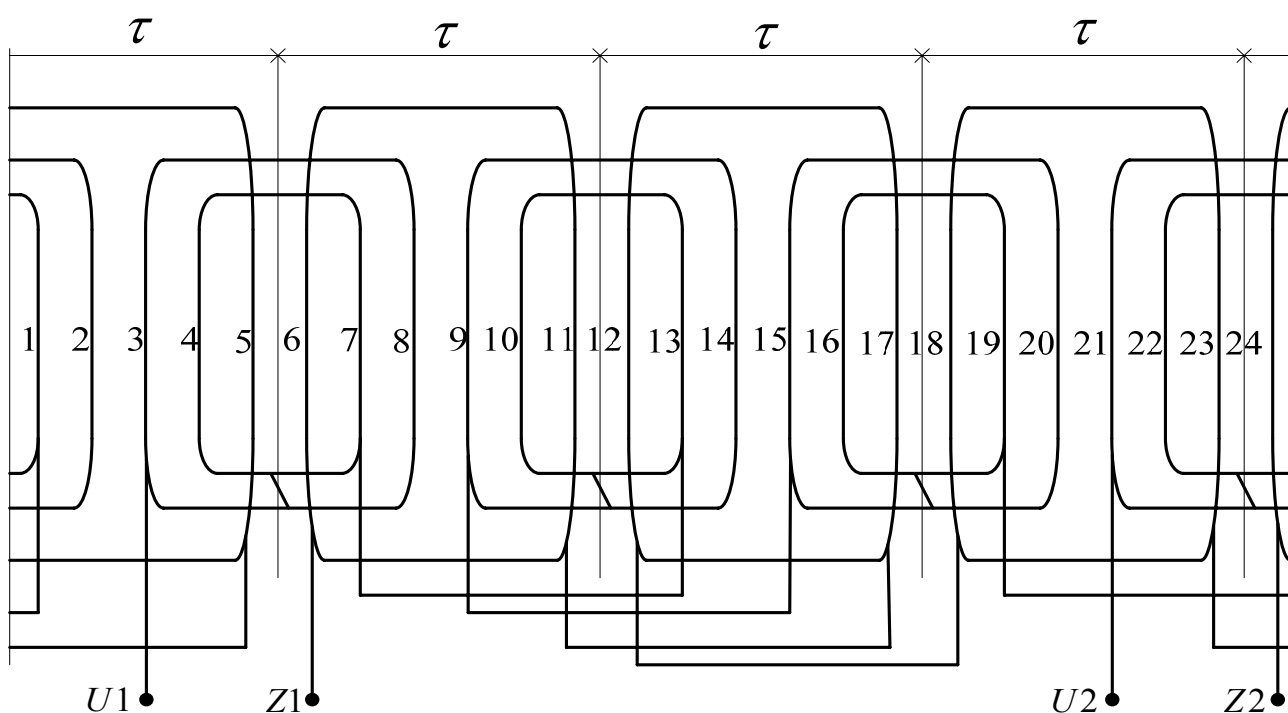


Рис. 1.11. Однослойная concentрическая обмотка статора АДК с пусковым элементом

1.8.2. Частично двухслойная и синусная двухфазные обмотки

В настоящее время получили применение обмотки частично двухслойные и синусные [13]. Они сочетают в себе черты однослойных и двухслойных обмоток.

Эти обмотки выполняются из катушек с разным числом витков. В некоторых пазах лежат две секционные стороны, принадлежащие разным фазам. У частично двухслойных обмоток число витков в катушках, занимающих весь паз или часть паза, различаются в два раза. У синусных обмоток закон распределения проводников по пазам более сложный. Изобразим схемы частично двухслойной и синусной обмоток при следующих данных: $m=2$; $Z_s=16$; $2p=2$. При этом выполним совмещенное изображение схем (рис. 1.12).

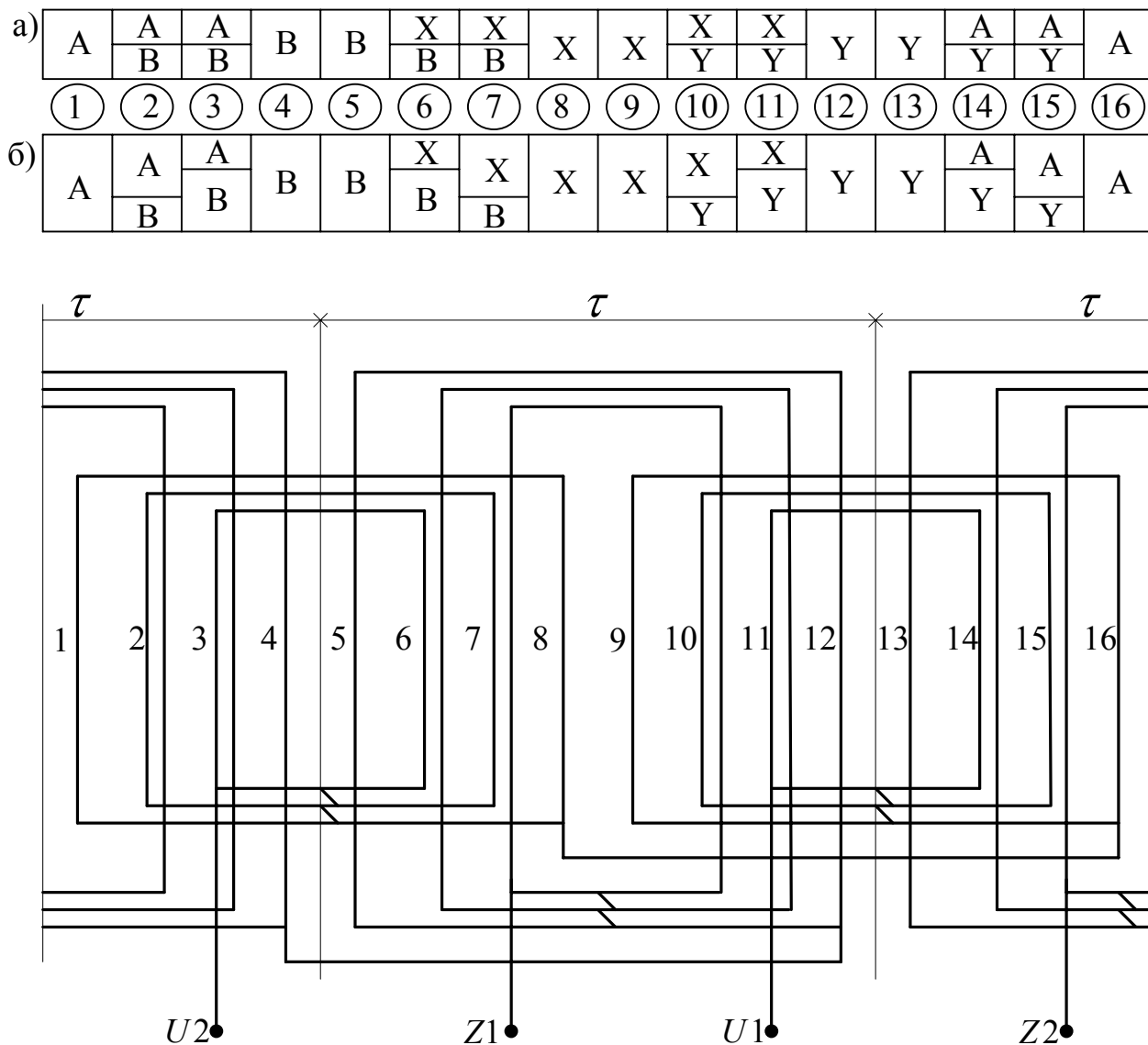


Рис. 1. 12. Частично двухслойная и синусная обмотки:

- а) распределение по пазам для частично двухслойной обмотки;
- б) распределение по пазам для синусной обмотки

Частично двухслойные обмотки по распределению проводников по пазам эквивалентны обычным двухслойным обмоткам с укороченным шагом.

Особенности синусной обмотки

Синусные обмотки находят широкое применение в двухфазных асинхронных двигателях (АД) [13]. Преимущественное применение они получили в однофазных АД с пусковой обмоткой. Их назначение состоит в том, чтобы при соответствующем распределении проводников по пазам получить кривую МДС в функции угла α (т. е. по окружности воздушного зазора), близкое к синусоидальной (рис. 1.13). Для синусной обмотки широко используются пазы различной формы и размеров. Расчет синусной обмотки сводится к установлению закона распределения проводников по пазам и определению обмоточных коэффициентов.

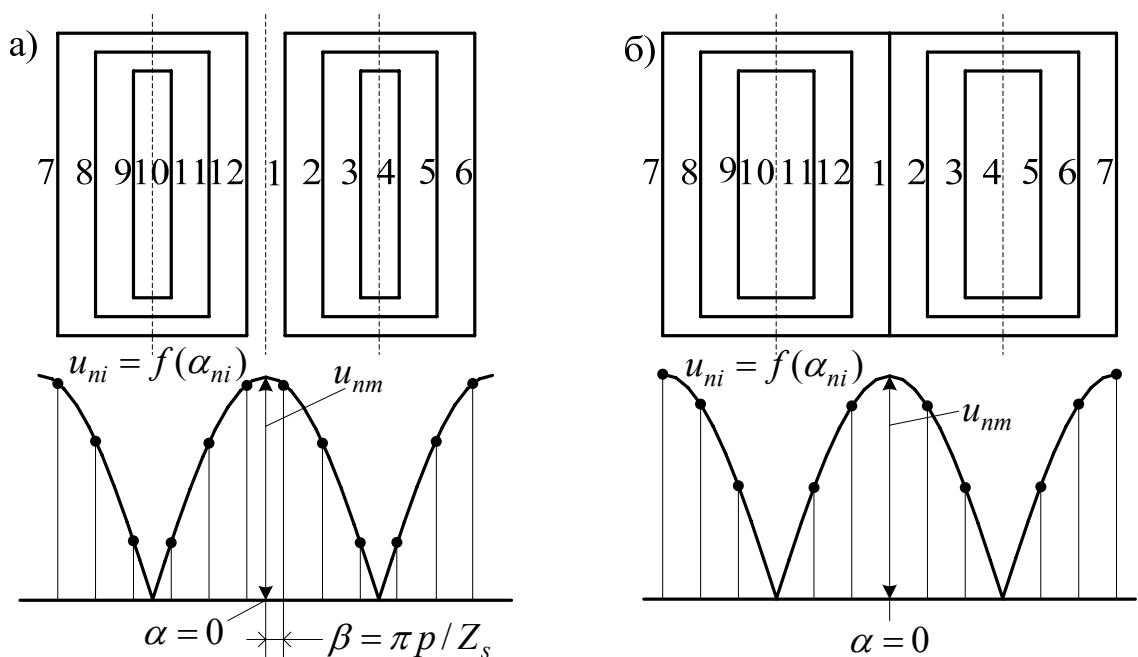


Рис. 1.13. Синусоидальное распределение проводников по пазам

Синусное распределения проводников по пазам обмотки $U_{ni} = f(\alpha)$ можно представить в виде

$$u_{ni} = u'_{nm} \cos(\alpha_{ni}); \quad (1.56)$$

$$\alpha_{ni} = \beta + (i-1) \cdot \left(\frac{\pi}{\tau_z} \right).$$

Здесь i – порядковый номер паза в пределах полюсного деления;

α_{ni} – угол от начала отсчета для соответствующего паза;

u'_{nm} – теоретическое максимальное число проводников в пазу (амплитуда синусоиды проводников);

τ_z – полюсное деление в пазах;

β – положение первого паза относительно начала отсчета, причем в зависимости от схемы обмотки $\beta = \pi p / Z_s$ или $\beta = 0$.

При этом

$$u'_{nm} = q \cdot W_s / p,$$

где W_s – число витков в фазе; $q = \sin(p\pi / Z_s)$ при $\beta = \pi p / Z_s$ и $q = \text{tg}(p\pi / Z_s)$ при $\beta = 0$.

Для получения ступенчатой кривой МДС функции угла α близкой к синусоиде, когда проводники каждой из фаз находятся не во всех пазах, рекомендуется число проводников в i -м пазе определять согласно выражению

$$\frac{u_{ni}}{W_s / (2p)} = \frac{2 \cos(2i-1)\gamma - \cos(2i+1)\gamma - \cos(2i-3)\gamma}{\left[2 / (1 - 2Q_p) + Z_s / 2p \right] \cos(2Q_p - 1)\gamma}, \quad (1.57)$$

где $\gamma = \pi p / Z_s$; Q_p – число катушек на полюс и фазу.

При подборе закона распределения проводников по пазам стремятся, по возможности, уменьшить обмоточные коэффициенты и прежде всего третьей, а затем пятой и седьмой гармоники.

Обмоточный коэффициент синусной обмотки определяется по соотношению

$$k_{0\nu} = \frac{F_{m\nu}}{F_{m\nu c}}, \quad (1.58)$$

где $F_{m\nu}$, $F_{m\nu c}$ – амплитуды МДС ν -й гармоники при заданном законе распределения и при сосредоточенной обмотке.

Для любого распределения проводников $k_{ni} = f(\alpha)$ можно записать

$$k_{0\nu} = \left[(f(\alpha_0) + \Delta f(\alpha_{ni})) \cos \gamma_{ni} \right] f_c, \quad (1.59)$$

где $f(\alpha_0)$ – МДС в точке начала отсчета ее кривой;

$\Delta f(\alpha_{ni}) = f(\alpha_{ni}) - f(\alpha_{n(i-1)})$ – приращение ординаты кривой МДС;

f_c – МДС при сосредоточенном распределении проводников;

α_{ni} – угол от начала отсчета соответствующего паза, который изменяется от 0 до $\pi/2$.

Попутно отметим, что $\Delta f(\alpha_{ni}) = u_{ni}$, а $f(\alpha_0) = 0$ при $\beta = \pi p / Z_s$ и $f(\alpha_0) = u_{nm} / 2$ при $\beta = 0$.

Если все проводники, приходящиеся на два полюсных деления, представляют одну катушку с диаметральным шагом, то

$$f_c = f(\alpha_0) + \sum_0^{\pi/2} \Delta f(\alpha_{ni}), \quad (1.60)$$

тогда

$$k_{0\nu} = \frac{f(\alpha_0)}{W_s / p} + \sum \frac{u_{ni}}{W_s / 2p} \cos \nu \alpha_{ni}. \quad (1.61)$$

На рис. 1.14 изображены схемы синусной обмотки однофазного двигателя с пусковой обмоткой, имеющей повышенное активное сопротивление. Главная и вспомогательная обмотки занимают не все пазы, причем часть пазов вспомогательной фазы имеют уменьшенные размеры. Схема выполнена в предположении, что проводники каждой из фаз располагаются согласно приближенному выражению

$$\frac{u_{ni}}{W_s/(2p)} = \frac{\sin 2\gamma i - \sin 2\gamma(i-1)}{\sin 2Q_p\gamma}. \quad (1.62)$$

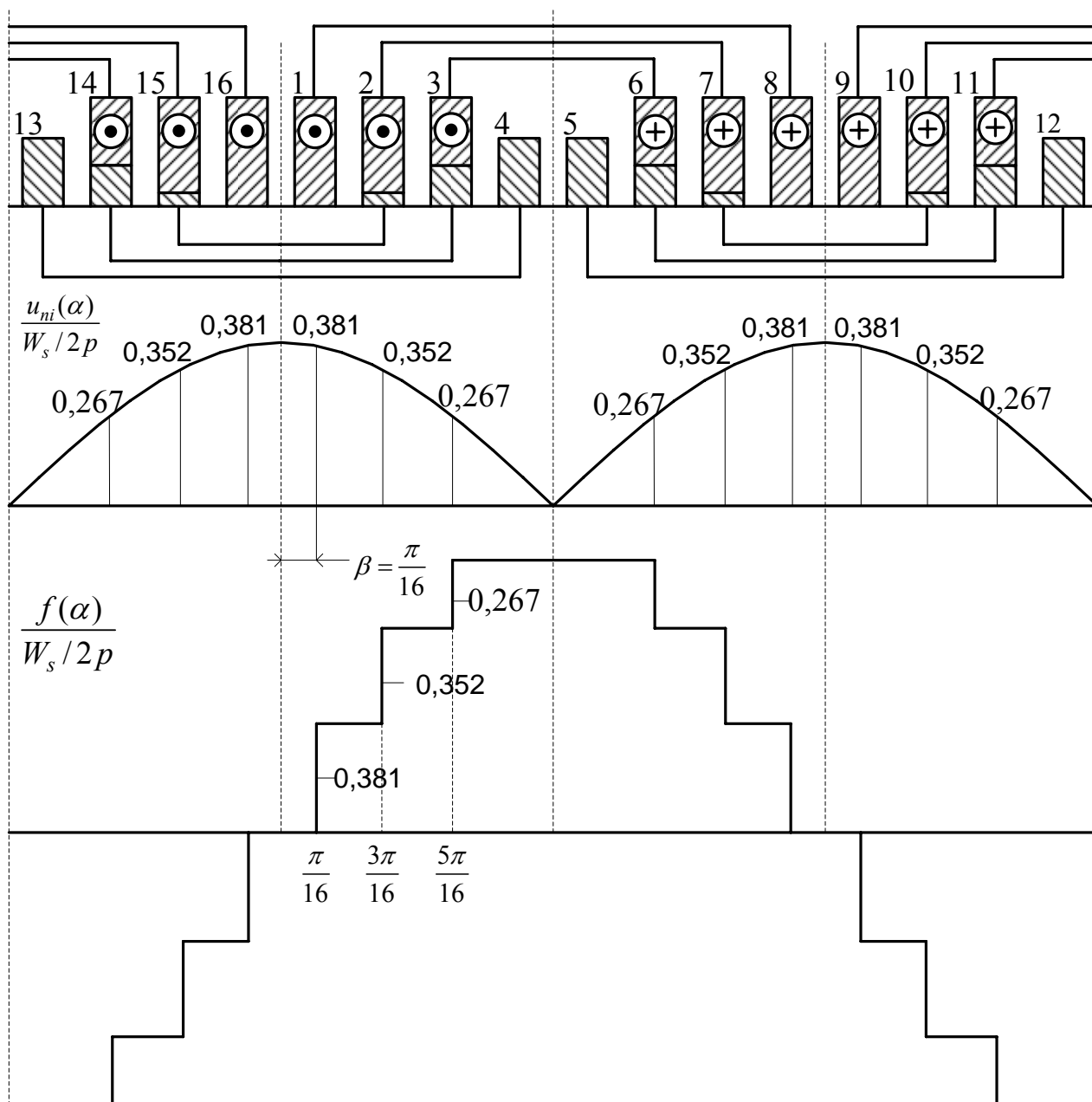


Рис. 1.14. Распределение проводников и МДС

Распределение проводников при $Z_s = 16$ и $2p = 2$ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Номера катушек	Шаг обмотки	Главная фаза		Вспомогательная фаза	
		Число проводников u_{ni}	$\frac{u_{ni}}{W_s/(2p)}$	Число проводников u_{ni}	$\frac{u_{ni}}{W_s/(2p)}$
I	1-4	144	0,267	101	0,269
II	1-6	191	0,352	132	0,351
III	1-8	205	0,381	142	0,380
Общее число проводников на полюс $W_s/(2p)$		540	1	375	1

В этом случае обмоточные коэффициенты для первой, третьей, пятой и седьмой гармоник будут

$$k_{01} = 0,381 \cos \frac{\pi}{16} + 0,352 \cos \frac{3\pi}{16} + 0,267 \cos \frac{5\pi}{16} = 0,815 ;$$

$$k_{03} = 0,381 \cos \frac{3\pi}{16} + 0,352 \cos \frac{9\pi}{16} + 0,267 \cos \frac{15\pi}{16} = -0,014 ;$$

$$k_{05} = 0,381 \cos \frac{5\pi}{16} + 0,352 \cos \frac{15\pi}{16} + 0,267 \cos \frac{25\pi}{16} = -0,084 ;$$

$$k_{07} = 0,381 \cos \frac{7\pi}{16} + 0,352 \cos \frac{21\pi}{16} + 0,267 \cos \frac{35\pi}{16} = 0,1 .$$

Обмотка позволяет повысить обмоточный коэффициент первой гармоники k_{01} и уменьшить коэффициенты высших гармоник.

Глава 2

Расчет микродвигателей постоянного тока с электромагнитным возбуждением

2.1. Определение основных размеров

Применительно к коллекторным микродвигателям постоянного тока при выборе основных размеров, т.е. диаметра и расчетной длины якоря D_a и l_δ широко используется упомянутый выше «энергетический» метод проектирования. С этой целью первоначально определяется расчетная мощность машины. Для двигателя параллельного возбуждения эта мощность с учетом потерь на возбуждение может быть рассчитана следующим образом

$$P_a = E_a I_a = UI - I_e^2 r_e - I_a^2 r_a - \Delta U_{щ} I_a = \frac{P_2}{\eta} - p_{м+щ}, \text{ Вт.} \quad (2.1)$$

Здесь P_2 – полезная мощность на валу при номинальном режиме, Вт;
 η – коэффициент полезного действия (КПД), предварительно выбираемый по кривым (рис. 2.1).

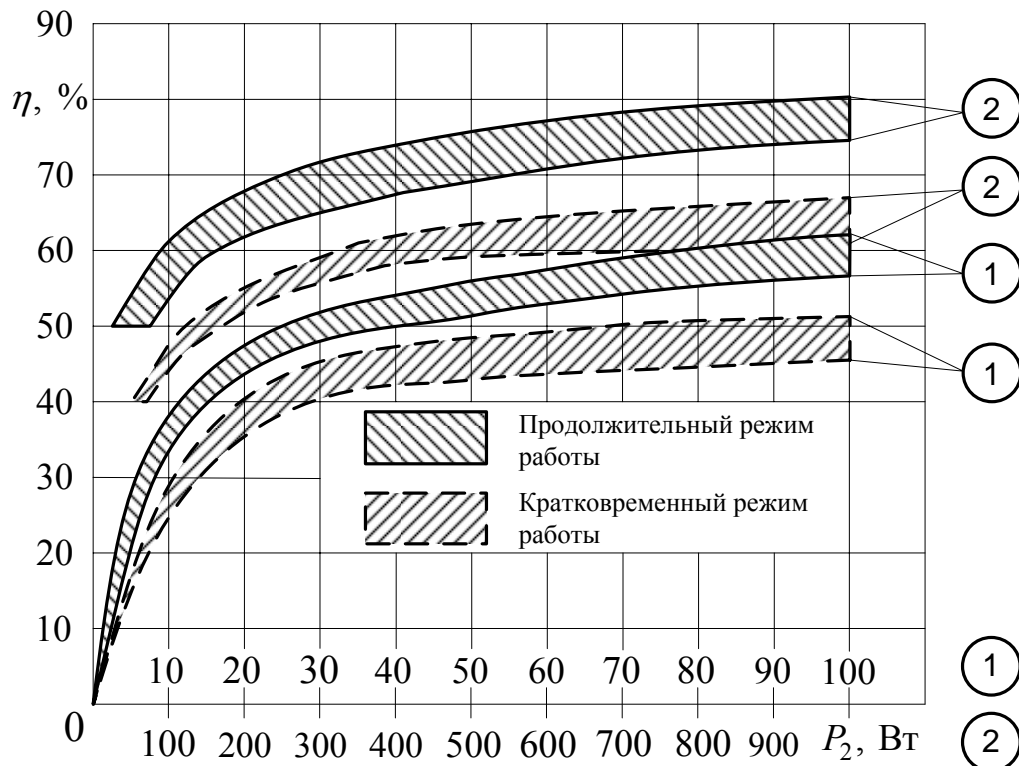


Рис. 2.1 Зависимость КПД микромашин постоянного тока от полезной мощности на валу

E_a – ЭДС обмотки якоря, В; I_a – ток якоря, А; I_e – ток возбуждения, А; U – напряжение питания, В; I – потребляемый из сети ток, А; r_e – сопротивление цепи обмотки возбуждения, Ом; r_a – сопротивление обмотки якоря, Ом; $\Delta U_{щ}$ – падение напряжения в щёточном контакте на пару разноимённых щёток, В; $p_{M+щ}$ – общие потери в обмотках и щёточном контакте, Вт; В случае двигателя последовательно возбуждения $I = I_a$ и потери на возбуждение равны $I_a^2 r_c$, где r_c – сопротивление последовательной обмотки, Ом.

При дальнейшем изложении используются основные выводы и рекомендации, содержащиеся в работе [6]. Согласно этим рекомендациям потери $p_{M+щ}$ при продолжительном режиме работы с достаточным приближением можно принять равными двум третям общих потерь микродвигателя

$$p_{M+щ} = \frac{2}{3} \sum p = \frac{2}{3} \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right) P_2, \text{ Вт},$$

тогда

$$P_a = P_1 - \frac{2}{3} \sum p = \frac{1+2\eta}{3\eta} P_2, \text{ Вт}. \quad (2.2)$$

В микродвигателях повторно-кратковременного или кратковременного режима работы потери в обмотках и щёточном контакте составляют около трёх четвертей общих потерь. В этом случае

$$P_a = \frac{1+3\eta}{4\eta} P_2. \quad (2.3)$$

Если учесть, что

$$E_a = \frac{pn}{60} \frac{N}{a} \Phi_\delta, \text{ В} \text{ и } I_a = \frac{\pi D_a 2a}{N} A, \text{ А},$$

а также

$$\Phi_\delta = \alpha_\delta \tau l_\delta B_\delta, \text{ Вб}, \quad (2.4)$$

то после подстановки этих значений E_a и I_a в выражение (2.1) машинная постоянная в данном случае получает вид

$$C = \frac{D_a^2 l_\delta n}{P_a} = \frac{D_a^3 \lambda n}{P_a} = \frac{6,1}{\alpha_\delta B_\delta A}. \quad (2.5)$$

Здесь Φ_δ – полезный поток якоря (поток воздушного зазора), Вб; N – число проводников обмотки якоря; a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря; $\tau = \frac{\pi D_a}{2p}$ – полюсное деление, м; $\lambda = \frac{l_\delta}{D_a}$ – относительная длина пакета якоря; $\alpha_\delta = 0,6 \dots 0,75$ – коэффициент расчётной полюсной дуги.

Из выражения машинной постоянной определяется наружный диаметр и расчётная длина якоря

$$D_a = \sqrt{\frac{CP_a}{\lambda n}}, \text{ м}; \quad l_\delta = \lambda D_a, \text{ м}. \quad (2.6)$$

Попутно отметим, что индукция в воздушном зазоре B_δ и линейная нагрузка A , при определении C , выбираются, исходя из опыта построенных машин по кривым изображенным на рис. 2.2 и 2.3.

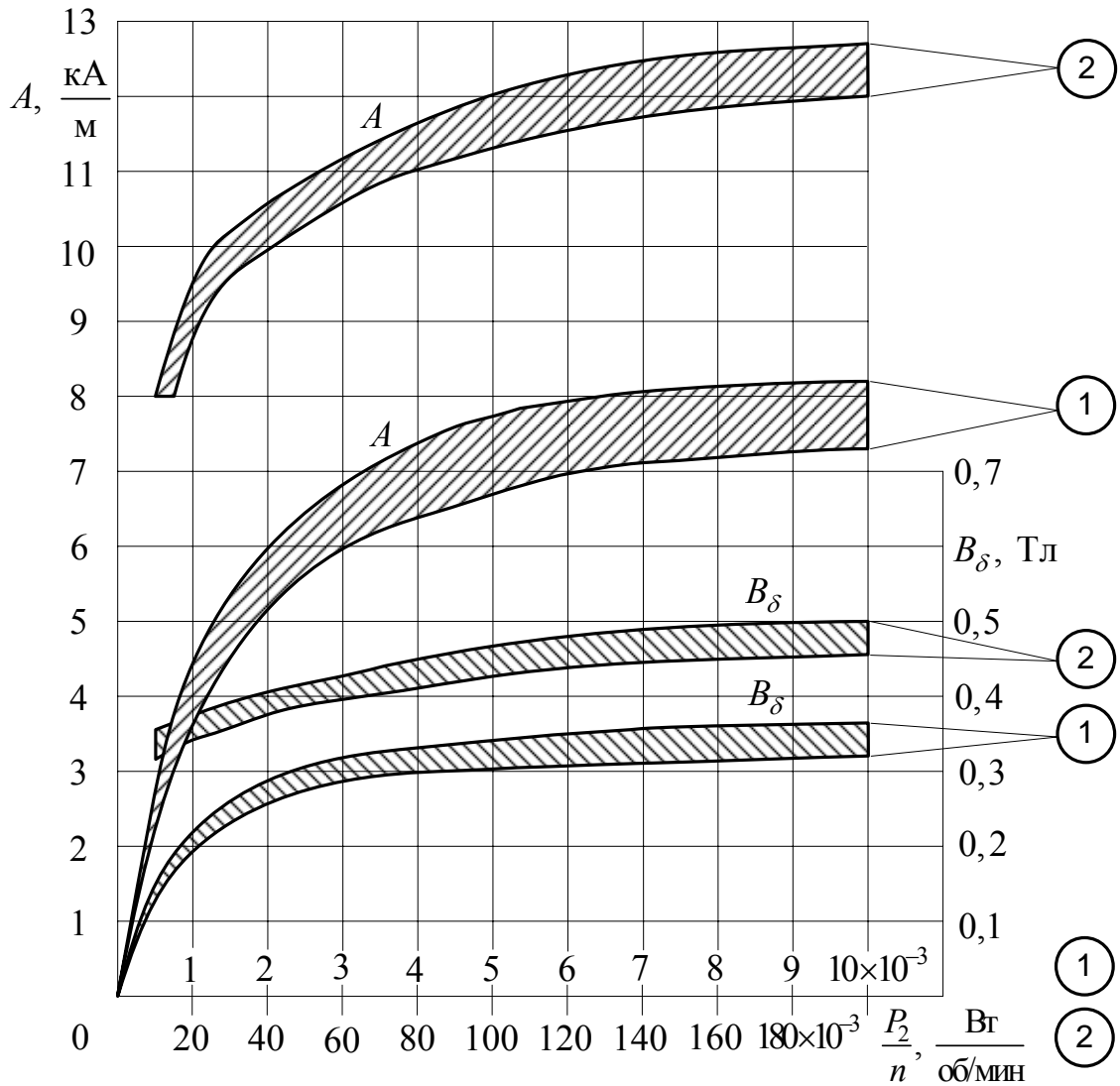


Рис. 2.2 Кривые индукции и линейной нагрузки при продолжительном режиме работы

Относительная длина якоря λ обычно находится в пределах 0,4...1,8. Однако в исполнительных двигателях она может достигать значений 1,4...2,4 и более. Так в малоинерционных исполнительных двигателях с гладким якорем $\lambda = 3...4$.

Полученные значения D_a и l_δ округляются до ближайших стандартных чисел (см. Приложение 1).

Воздушный зазор:

а) при продолжительном режиме работы

$$\delta = 0,25 \frac{\pi D_a A}{2p B_\delta} \cdot 10^{-6}, \text{ м}; \quad (2.7)$$

б) при повторно-кратковременном и кратковременном режимах

$$\delta = 0,15 \frac{\pi D_a A}{2p B_\delta} \cdot 10^{-6}, \text{ м}. \quad (2.8)$$

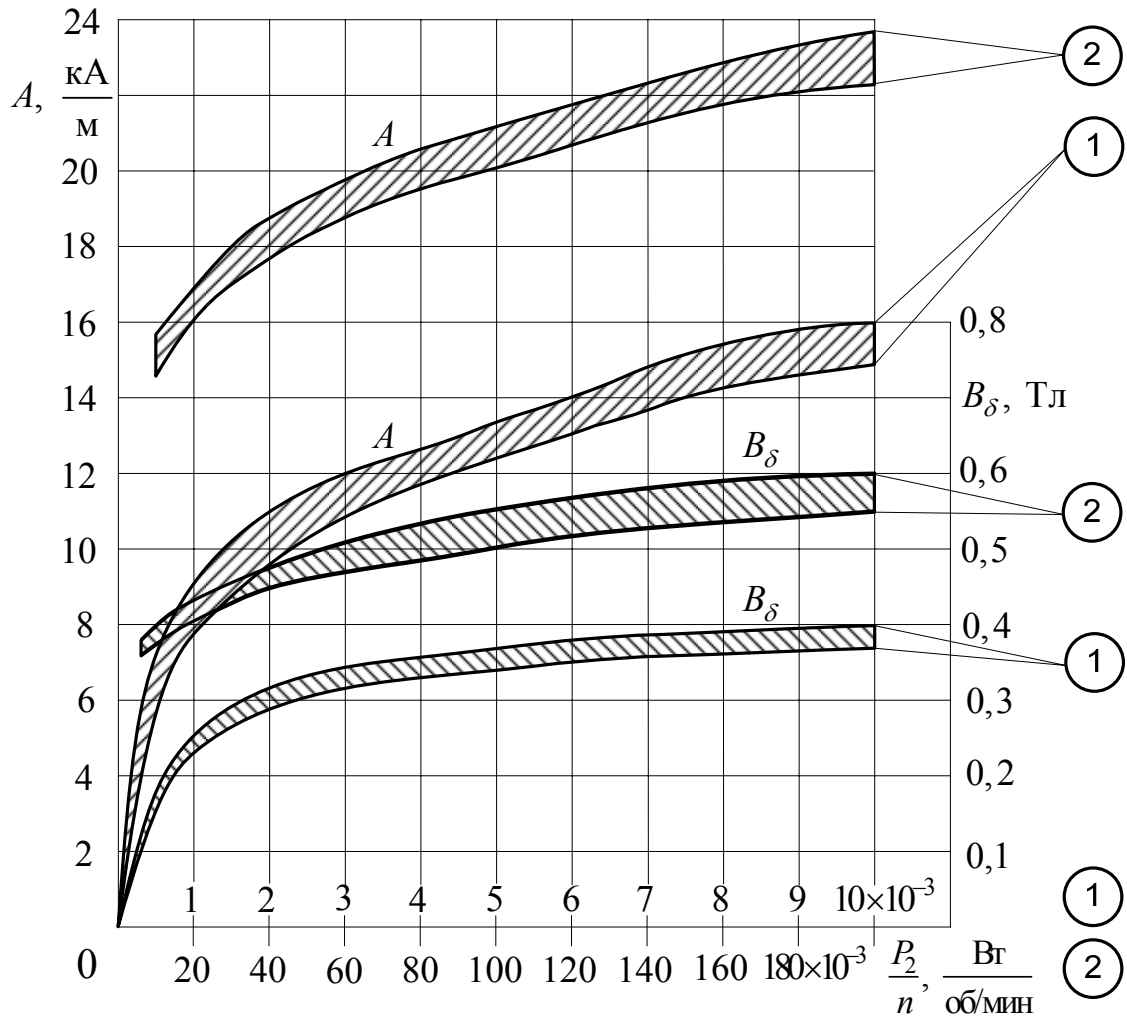


Рис. 2.3 Кривые индукции и линейной нагрузки при кратковременном (до 5 мин) режиме работы

Обычно $\delta = 0,2...0,5 \text{ мм} = 0,0002...0,0005 \text{ м}$.

Диаметр расточки полюсов

$$D_a = D_a + 2\delta, \text{ м}. \quad (2.9)$$

Расчётная полюсная дуга

$$b_\delta = \alpha_\delta \tau, \text{ м}. \quad (2.10)$$

Действительная полюсная дуга $b = (1,02...1,03)b_\delta$.

2.2. Предварительные значения токов и ЭДС якоря микродвигателя

Потребляемый ток, ток возбуждения и ток якоря:

а) *двигатель параллельного возбуждения*

$$I = \frac{P}{\eta U}, \text{ А}; \quad I_g = k_g I, \text{ А}; \quad I_a = I - I_g, \text{ А}, \quad (2.11)$$

где $k_g = 0,1 \dots 0,2$, большие значения относятся к машинам меньших мощностей;

б) *двигатель последовательного возбуждения*

$$I = I_a = \frac{P_2}{\eta U}, \text{ А}; \quad I_g = I_a, \text{ А}, \quad (2.12)$$

в) *двигатель с возбуждением от постоянных магнитов*

$$I = I = I_a = \frac{P_2}{\eta U}, \text{ А}; \quad I_g = 0, \text{ А}. \quad (2.13)$$

ЭДС якоря:

а) *двигатель параллельного возбуждения:*

при продолжительном режиме работы

$$E_a = \frac{P_a}{I_a} = \frac{1 + 2\eta}{3(1 - I_g / I)} U, \text{ В}; \quad (2.14)$$

при повторно-кратковременном и кратковременном режимах

$$E_a = \frac{1 + 3\eta}{4(1 - I_g / I)} U, \text{ В}; \quad (2.15)$$

б) *двигатель последовательного возбуждения:*

при продолжительном режиме работы

$$E_a = \frac{P_a}{I_a} = \frac{1 + 2\eta}{3} U, \text{ В}; \quad (2.16)$$

при повторно-кратковременном и кратковременном режимах

$$E_a = \frac{P_a}{I_a} = \frac{1 + 3\eta}{4} U, \text{ В}. \quad (2.17)$$

2.3. Обмотка якоря

В машинах постоянного тока малой мощности при двухполюсном исполнении применяется простая петлевая обмотка, а при четырехполюсном – простая волновая обмотка. Обмотка может выполняться вручную, путем непрерывной намотки проводом с выпуском отпаек (петель) к коллектору или из секций, предварительно изготовленных на станке и затем уложенных в пазы якоря. В первом случае обмотка нередко оказывается ступенчатой, а во втором – обязательно равносекционной. После укладки обмотки в пазы и припайки секций к коллекторным пластинам она вместе с якорем пропитывается изолирующим лаком и просушивается.

Вылет лобовой части

$$l'_\delta \approx (0,3 \dots 0,5)D_a, \text{ м.}$$

Магнитный поток в воздушном зазоре

$$\Phi_\delta = B_\delta l'_\delta b_\delta, \text{ Вб.}$$

Число проводников обмотки якоря (предварительное)

$$N' = \frac{60aE_a}{pn\Phi_\delta}, \quad (2.18)$$

где a – число пар параллельных ветвей.

Число пазов якоря

$$Z = (3 \dots 4)D_a, \quad (2.19)$$

где D_a – диаметр якоря, см. Значение Z округляется до ближайшего нечетного целого числа.

Число коллекторных пластин

$$K = (1 \dots 3)Z, \quad (2.20)$$

причём обычно $K = 2Z$ при $2p = 2$ и $K = Z$ или $K = 3Z$ при $2p = 4$.

Число витков в секции обмотки

$$W_c = \frac{N'}{2K} - \text{ц.ч.} \quad (2.21)$$

После округления числа витков в секции до целого числа, уточняют число проводников в обмотке якоря:

$$N = 2W_c K.$$

Проверка линейной нагрузки и сравнение её с первоначально принятой выше

$$A = \frac{NI_a}{\pi D_a 2a}. \quad (2.22)$$

Отклонение не должно превышать $\pm 10\%$.

Шаги обмотки якоря:

Для простой петлевой обмотки

$$y_1 = \frac{K}{2p} m\varepsilon - \text{ц.ч.}; \quad y_2 = y_1 - 1; \quad y = y_k = +1.$$

Для простой волновой обмотки

$$y = y_k = \frac{K-1}{p}; \quad y_1 = \frac{K}{2p} - \text{ц.ч.}; \quad y_2 = y - y_1.$$

Шаг обмотки по реальным пазам

$$y_n = \frac{Z}{2p} m\varepsilon - \text{ц.ч.}$$

2.4. Пазово-зубцовая зона

Прежде чем перейти к определению размеров пазово-зубцовой зоны, необходимо найти полную площадь паза $Q_{\text{п}}$, занимаемую изолированными проводниками ($Q_{\text{пп}}$), пазовой изоляцией ($Q_{\text{пи}}$) и клином ($Q_{\text{кл}}$). С этой целью предварительно рассчитывается удельная тепловая нагрузка поверхности якоря q , равная отношению электрических и магнитных потерь в якоре к его наружной цилиндрической поверхности. Величина q зависит от режима работы, типа исполнения машины условий охлаждения и класса изоляции [2,6]. Это учитывается с помощью коэффициента α' в спокойной среде и ограничения по допустимому превышению температуры обмотки якоря θ_m . При этом по опытным данным при нормальном давлении воздуха:

$$\alpha' = (1,4 \dots 1,8) \cdot 10^{-3} \text{ Вт/град} \cdot \text{см}^2 \text{ при закрытом исполнении};$$

$$\alpha' = (2,0 \dots 2,4) \cdot 10^{-3} \text{ Вт/град} \cdot \text{см}^2 \text{ при открытом исполнении};$$

$$\alpha' = (3,6 \dots 4,4) \cdot 10^{-3} \text{ Вт/град} \cdot \text{см}^2 \text{ при защищенном исполнении с вентилятором}.$$

В реальных условиях необходимо учитывать влияние обдува поверхности якоря воздухом. Если скорость обдувания не превышает значений 55...65 м/с, то коэффициент теплоотдачи достаточно точно определяется формулой

$$\alpha = \alpha' (1 + 0,1\nu), \text{ Вт/град} \cdot \text{см}^2.$$

Для более широкого диапазона скоростей

$$\alpha = \alpha' (1 + k_0 \sqrt{\nu}), \text{ Вт/град} \cdot \text{см}^2.$$

где $k_0 \approx 1,3$ – коэффициент обдувания; ν – результирующая скорость обдувания,

а) в машинах без встроенного вентилятора

$$\nu = \nu_a = \frac{\pi D_a n}{60}, \text{ м/с}; \quad (2.23)$$

б) в машинах со встроенным вентилятором

$$\nu = \sqrt{\nu_a^2 + \nu'^2}, \text{ м/с}.$$

$$\text{Причем } \nu' = (0,4 \dots 0,5) \nu_g, \text{ м/с}; \quad \nu_g = \frac{\pi D_g n}{60}, \text{ м/с}$$

где $D_g \approx (1,25 \dots 1,4) D_a$ – диаметр колеса центробежного вентилятора, м. Тепловая нагрузка поверхности якоря рассчитывается следующим образом:

а) при продолжительном режиме работы

$$q = \alpha \theta_m, \text{ Вт/см}^2; \quad (2.24)$$

б) при повторно-кратковременном режиме

$$q = \alpha k_{n1} \theta_m, \text{ Вт/см}^2; \quad (2.25)$$

в) при кратковременном режиме

$$q = \alpha k_{n2} \theta_m, \text{ Вт/см}^2; \quad (2.26)$$

Здесь θ_m – предельно допустимое превышение температуры якоря над температурой окружающей среды, зависящее от класса изоляции обмотки: $\theta_m = 65^{\circ}\text{C}$ – для

изоляции классов А, Е и $\theta_m = 90^\circ C$ – для изоляции классов В, F, Н; k_{n1} , k_{n2} – коэффициенты перегрузки, причем

$$k_{n1} = \frac{k_{n2}}{1 + \sum_{k=0}^{k=m-1} e^{-ka_1 y_1}}.$$

$$\text{Здесь } y_1 = \frac{t_p}{T_p},$$

$$k_{n2} = \frac{1}{1 - e^{-y_1}}.$$

При этом t_p – время рабочего периода, с; $T_p \approx 0,9D_a/\alpha$ – постоянная времени нагревания вращающегося якоря, с; $T_n \approx 0,9D_a/\alpha'$ – постоянная времени охлаждения неподвижного якоря, с; D_a – диаметр якоря, см; $a_1 = \left(1 + \frac{T_p t_n}{T_n t_p}\right)$ – относительная величина рабочего периода.

Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря

$$j_a' = \frac{Hq}{A}, \text{ А/мм}^2. \quad (2.27)$$

Здесь H – коэффициент, зависящий от частоты вращения якоря (табл. 2.1). Сечение и диаметр провода обмотки.

$$q_a = \frac{I_a}{2j_a'}, \text{ мм}^2 \quad (2.28)$$

Сечение q_a и соответствующие ему диаметры голого (d_a) и изолированного (d_{au}) провода окончательно выбираются по соответствующему стандарту (Приложение 2). После этого уточняется плотность тока j_a .

Таблица 2.1

Зависимость коэффициента H от частоты вращения якоря

Частота вращения, об/мин	H	
	$2p=2$	$2p=4$
До 5000	$17 \cdot 10^4$	$13 \cdot 10^4$
5000... 10000	$14 \cdot 10^4$	$11 \cdot 10^4$
10000... 15000	$12 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$

Площадь паза, занимаемая изолированными проводниками

$$Q_{\text{пз}} = \frac{N_{\text{п}} d_{\text{ан}}^2}{f_0}, \text{ мм}^2, \quad (2.29)$$

где $N_{\text{п}} = N/Z$ – число проводников в пазу; f_0 – технологический коэффициент заполнения паза, учитывающий неточности и неплотности укладки проводников в пазу, $f_0 = 0,70 \dots 0,74$.

Площадь, занимаемая пазовой изоляцией

$$Q_{\text{пи}} = 0,7 \delta_{\text{и}} D_a \cdot 10^3, \text{ мм}^2. \quad (2.30)$$

Здесь $\delta_{\text{и}} = 0,1 \dots 1,0$ – толщина пазовой изоляции, мм, выбираемая в зависимости от напряжения машины:

$$\delta_{\text{и}} = (0,10 \dots 0,15), \text{ мм} \text{ – при напряжении } 6 \dots 12 \text{ В};$$

$$\delta_{\text{и}} = (0,15 \dots 0,25), \text{ мм} \text{ – при напряжении } 12 \dots 30 \text{ В};$$

$$\delta_{\text{и}} = (0,3 \dots 0,5), \text{ мм} \text{ – при напряжении } 110 \dots 220 \text{ В},$$

D_a – диаметр якоря, м.

В современных электрических машинах малой мощности при повышенном напряжении в качестве пазовой изоляции применяется изофлекс (класс нагревостойкости B) и имидофлекс (класс нагревостойкости F) с односторонней толщиной

$$\delta_{\text{и}} = 0,35 \text{ мм}.$$

Площадь клина

$$Q_{\text{пк}} = b_{\text{кл}} h_{\text{кл}}, \text{ мм}^2,$$

где $b_{\text{кл}} = (3 \dots 6)$, мм – ширина клина по дуге окружности якоря;

$h_{\text{кл}} = (0,5 \dots 1,0)$, мм – высота клина.

Полная требуемая площадь паза якоря

$$Q = Q_{\text{пп}} + Q_{\text{пи}} + Q_{\text{пк}}, \text{ мм}^2. \quad (2.31)$$

Коэффициент заполнения паза изолированным проводом

$$k_{\text{пи}} = \frac{N_{\text{п}} q_{\text{аи}}}{Q_{\text{п}}}, \quad (2.32)$$

где $q_{\text{аи}} = \pi d_{\text{аи}}^2 / 4$, мм² – сечение изолированного провода. Этот коэффициент $k_{\text{пи}}$ составляет $0,30 \dots 0,46$.

Зубцовый шаг

$$t_1 = \frac{\pi D_a}{Z} \cdot 10^3, \text{ мм}, \quad (2.33)$$

минимальное сечение зубца

$$b_z = \frac{B_z t_1}{k_c B_z}, \text{ мм}, \quad (2.34)$$

где $B_z = 1,3 \dots 1,6$ – максимальная индукция в зубце, Тл; $k_c = 0,93 \dots 0,95$ – коэффициент заполнения пакета якоря сталью.

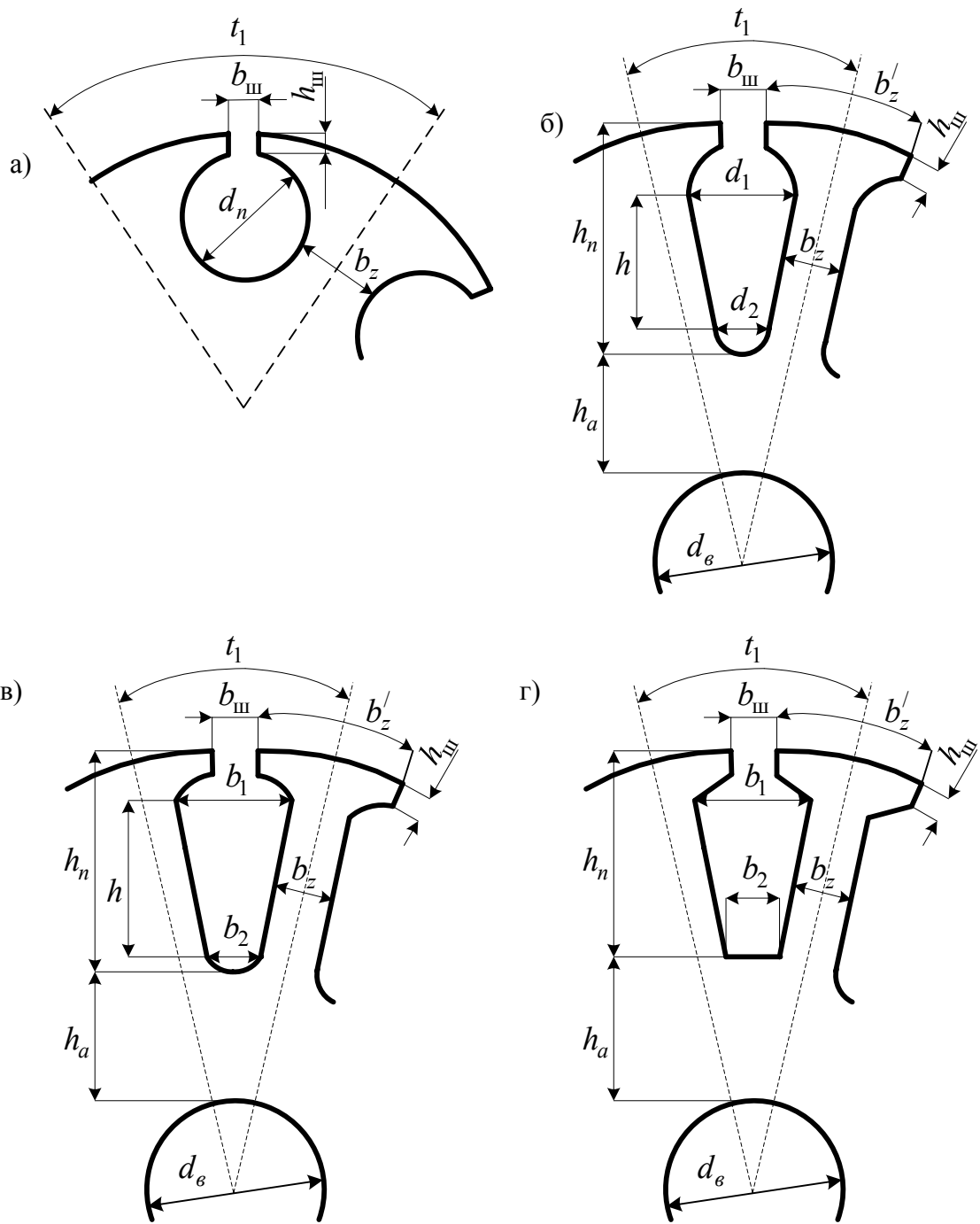


Рис. 2.4. Виды пазов применяемые в микродвигателях

В микродвигателях постоянного тока широкое применение получили пазы круглой (рис. 2.4, а), грушевидной (рис. 2.4, б), и неявновыраженной трапецидальной (рис. 2.4, в) форм. В коротких машинах с относительно большим диаметром якоря нередко применяются пазы явновыраженной трапецидальной формы (рис. 2.4, г).

Диаметр круглого паза

$$d_{\Pi} = \sqrt{\frac{4Q_{\Pi}}{\pi}} = 1,13\sqrt{Q_{\Pi}}, \text{ мм.} \quad (2.35)$$

При наличии скоса пазов

$$d_n = \frac{d_n}{\sqrt{\cos \gamma}}, \text{ мм,} \quad (2.36)$$

где $\cos \gamma = \frac{l_{\delta}}{\sqrt{t_1^2 + l_{\delta}^2}}$.

Размеры грушевидного (овального) паза (см. рис. 2.4, б) определяются следующим образом.

Высота шлица

$$h_{\text{ш}} = (0,2 \dots 0,8), \text{ мм.}$$

Ширина шлица

$$b_{\text{ш}} = d_{\text{вн}} + 2\delta_{\text{н}} + 0,2, \text{ мм.}$$

Диаметры верхней и нижней частей паза

$$d_1 = \frac{\pi(D_a \cdot 10^3 - 2h_{\text{ш}}) - Zb_z}{Z + \pi}, \text{ мм;} \quad (2.37)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{d_1 \left(\frac{Z}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4Q_{\Pi}}{\frac{Z}{\pi} - \frac{\pi}{2}}}, \text{ мм.} \quad (2.38)$$

Расстояние между центрами окружностей

$$h = \frac{d_1 - d_2}{2\pi} Z, \text{ мм.}$$

Высота паза

$$h_{\Pi} = h_z = h + \frac{d_1 + d_2}{2} + h_{\text{ш}}, \text{ мм.}$$

После построения масштабного эскиза части пазово-зубцовой зоны следует проверить индукцию в зубце, принимая его ширину постоянной по высоте.

Спинка якоря

$$h_a = \frac{\Phi_{\delta}}{2k_c B_a l_{\delta}} \cdot 10^3, \text{ мм;} \quad (2.39)$$

где $B_a = 1,3 \dots 1,5$ – максимально допустимое значение индукции в спинке якоря, Тл.
С другой стороны,

$$h'_a = \frac{D_a \cdot 10^3 - 2h_{\Pi} - d_e}{2}, \text{ мм;} \quad (2.40)$$

где диаметр вала

$$d_e = (0,18 \dots 0,24) D_a \cdot 10^3, \text{ мм.} \quad (2.41)$$

Необходимо, чтобы выполнялось неравенство $h'_a > h_a$.

Если это условие не выполняется, то следует несколько уменьшить высоту паза при одновременном уменьшении ширины зубца. Если при этом окажется, что $b_z < 1$ мм, то следует перейти к меньшему диаметру стандартного провода обмотки якоря или к большему диаметру якоря при сохранении потока Φ_δ .

Возможен графический метод определения геометрии пазово-зубцовой зоны с использованием масштабного эскиза паза. Это особенно относится к неявно- и явновыраженной трапецеидальной форме пазов. В этом случае сначала выбирают минимальную ширину зубца b_z , исходя из максимально допустимой индукции в нём. При этом ширина зубца b_z , одинаковая по его высоте, не должна быть менее 1 мм. Затем в секторе, ограниченном осями двух соседних зубцов, вычерчивается паз, исходя из его площади Q_n при высоте $h_n \approx (0,25 \dots 0,35)D_a$.

Ширина зубца у его вершины

$$b_z' = t_1 - b_{ш}, \text{ мм.} \quad (2.42)$$

Средняя длина одного проводника обмотки якоря:

$$l_{cp.a} = l_\delta + 1,2D_a, \text{ м} \quad \text{при } 2p = 2; \quad (2.43)$$

$$l_{cp.a} = l_\delta + 0,8D_a, \text{ м} \quad \text{при } 2p = 4.$$

Сопротивление обмотки якоря

$$r_a = \frac{Nl_{cp.a}}{57(2a)^2 q_a} k_\theta, \text{ Ом.} \quad (2.44)$$

Здесь q_a – сечение провода обмотки якоря, мм²; $k_\theta = 1 + 0,004(\theta - 20)$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления обмотки при нагревании её от 20°С до $\theta^\circ\text{C}$.

Падение напряжения в обмотке якоря

$$\Delta U_a = I_a r_a, \text{ В.} \quad (2.45)$$

Действительная величина ЭДС якоря двигателя параллельного возбуждения

$$E_a = U - \Delta U_a - \Delta U_{щ}, \text{ В,} \quad (2.46)$$

где $\Delta U_{щ}$ – падение напряжения в щёточном контакте на пару щёток (предполагается, что сорт щёток известен).

Действительные значения потока и индукции в воздушном зазоре

$$\Phi_\delta = \frac{60aE_a}{pnN}, \text{ Вб}; \quad B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{b_\delta l_\delta}, \text{ Тл.} \quad (2.47)$$

Далее осуществляется проверка значений индукции в зубцах и спинке якоря. Действительная величина ЭДС якоря двигателя последовательного возбуждения определяется после расчёта обмотки возбуждения.

2.5. Коллектор и щётки

Коллектор состоит из пластин, изготавливаемых из твердотянутой меди и изолированных друг от друга и от корпуса машины миканитом или пластмассой.

Конструкции коллекторов электрических микромашин изображены на рис. 2.5, щёткодержателей на рис. 2.6.

Предварительные значения диаметра коллектора и ширины коллекторного деления

$$D_k' = (0,5 \dots 0,9) D_a, \text{ м};$$

$$t_k = \frac{\pi D_k'}{K}, \text{ м} \quad (2.48)$$

Ширина коллекторной пластины

$$b_k = (2 \dots 5) \cdot 10^{-3}, \text{ м}.$$

Толщина изоляции между коллекторными пластинами:

$$\beta_{и} = (0,4 \dots 0,6) \cdot 10^{-3}, \text{ м} \text{ при напряжении } 30 \text{ В};$$

$$\beta_{и} = (0,6 \dots 0,8) \cdot 10^{-3}, \text{ м} \text{ при напряжении } 110 \text{ В и выше}.$$

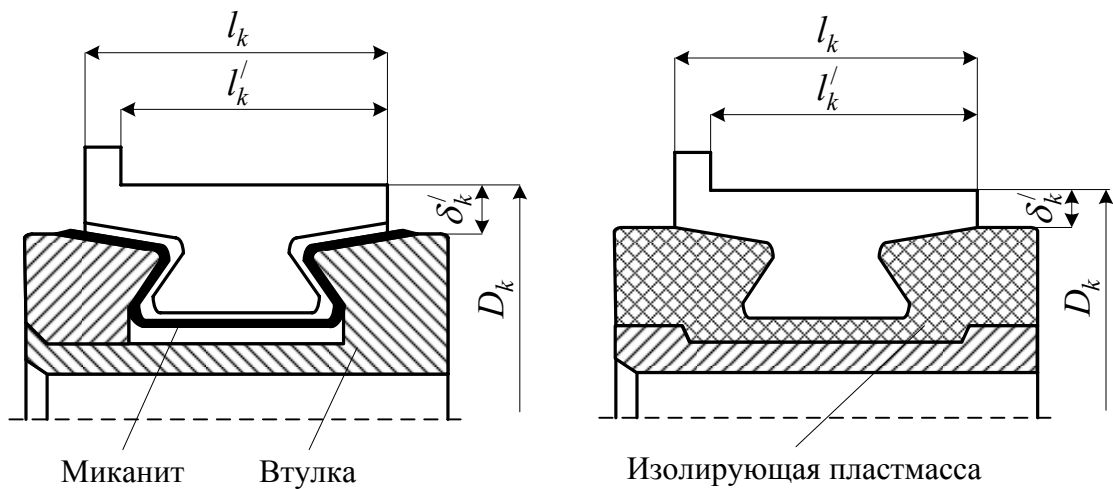


Рис. 2.5. Конструкции коллекторов

Окончательные значения ширины коллекторного деления и диаметра

$$t_k = b_k + \beta_{и}; \quad (2.49)$$

$$D_k = \frac{K t_k}{\pi}, \text{ м} . \quad (2.50)$$

Окружная скорость коллектора

$$v_k = \frac{\pi D_k n}{60}, \text{ м/с} . \quad (2.51)$$

Выбор марки щёток. В низковольтных микродвигателях постоянного тока в основном применяются медно-графитные щётки марок М-1, М-6, МГ, а в высоковольтных (110...220 В), кроме указанных, – графитные Г-3 и Г-8 и электрографитированные марок ЭГ-8 и ЭГ-14 (см. Приложение 3, табл. 3.2).

Размеры щёток.

Контактная поверхность

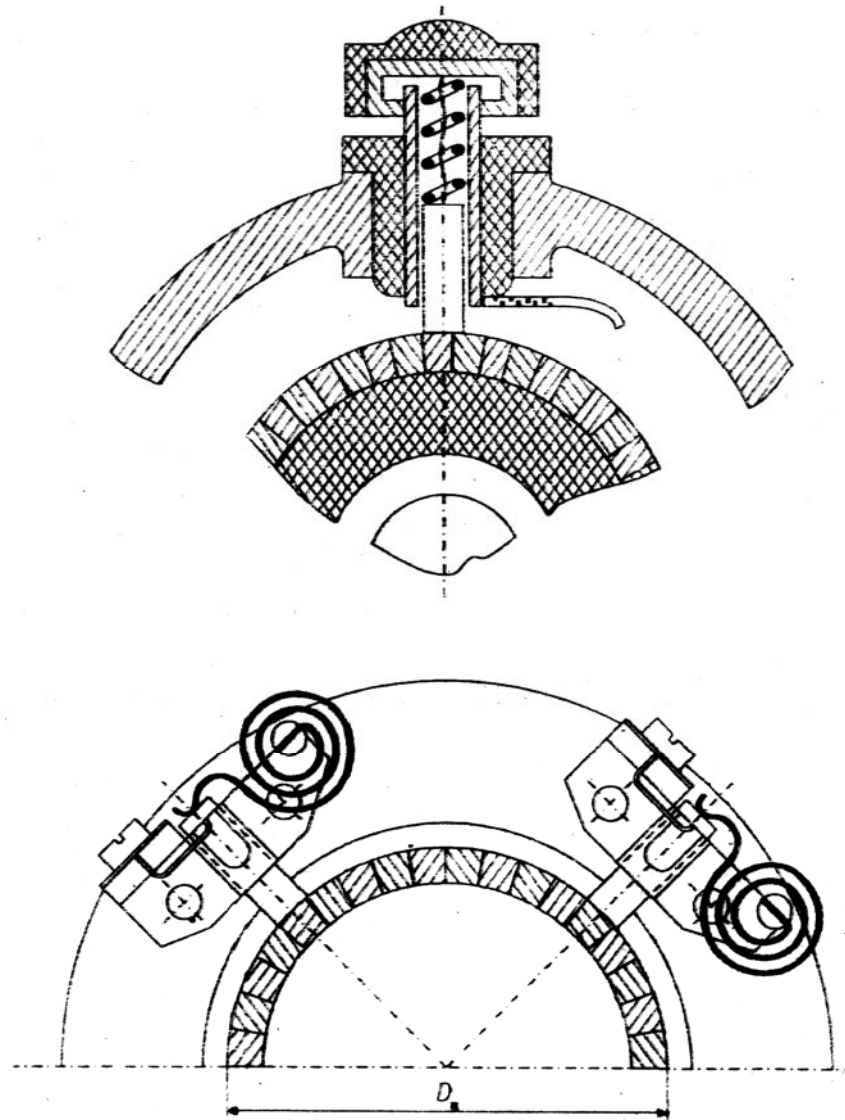


Рис. 2.6. Конструкция щеткодержателей

$$S_{\text{щ}} = \frac{I_a}{\rho j'_{\text{щ}}}, \text{ см}^2, \quad (2.52)$$

где $j'_{\text{щ}}$ – предварительное значение плотности тока, А/см² (см. Приложение 3, табл. 3.2).

Ширина щётки по дуге окружности коллектора

$$b_{\text{щ}} = (1...3)t_k, \text{ м}. \quad (2.53)$$

Длина щётки по оси коллектора

$$a_{\text{щ}} = \frac{S_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}}} \cdot 10^{-4}, \text{ м}. \quad (2.54)$$

Размеры $b_{щ}$ и $a_{щ}$ уточняются по ГОСТ (см. Приложение 3, табл. 3.1).

Окончательная плотность тока под щётками

$$j_{щ} = \frac{I_a}{p a_{щ} b_{щ}}, \text{ А/м}^2. \quad (2.55)$$

Активная и полная длина коллектора по оси вала

$$l'_k = (1,5 \dots 2) a_{щ}, \text{ м}; \quad (2.56)$$

$$l_k = l'_k + (3 \dots 5) d_a, \text{ м}.$$

2.6. Проверка коммутации

Ширина зоны коммутации

$$b_{зк} = b'_{щ} + \left(u_n + \left| \frac{K}{2p} - y_1 \right| - \frac{a}{p} \right) t'_k, \text{ м}, \quad (2.57)$$

где

$$b'_{щ} = b_{щ} \frac{D_a}{D_k}; \quad u_n = \frac{K}{Z}; \quad t'_k = t_k \frac{D_a}{D_k}.$$

Для благоприятной коммутации необходимо выполнение условия

$$b_{зк} < 0,8(\tau - b_{\delta}).$$

Среднее значение реактивной ЭДС

$$e_r = 2\omega_c \xi l_{\delta} A v_a, \text{ В}, \quad (2.58)$$

где ξ – удельная магнитная проводимость для полей рассеяния коммутируемой секции

$$\xi = \left[0,6 \frac{h_n}{b_n} + \frac{l_n}{l_{\delta}} + 0,92 \lg \left(\frac{\pi t_1}{b_{щ}} \right) \right] \cdot 10^{-6}, \text{ Гн/м}. \quad (2.59)$$

Здесь h_n – высота паза; b_n – средняя ширина паза: $b_n = d_n$ (см. рис. 2.4, а), $b_n = 0,5(d_1 + d_2)$, (см. рис. 2,4, б); $b_n = 0,5(b_1 + b_2)$, (см. рис, 2.4, в, г); $l_n, l_{\delta}, b_{щ}$ – определены выше.

ЭДС в короткозамкнутой секции, индуцируемая полем якоря

$$e_a = \frac{8\pi\omega_c A \tau l_{\delta} v_a \cdot 10^{-7}}{\tau - b_{\delta}}, \text{ В} \quad (2.60)$$

Среднее значение результирующей ЭДС в короткозамкнутой секции якоря

$$e = e_r + e_a, \text{ В}.$$

Коммутацию можно считать удовлетворительной, если:

$e < 0,5$ при напряжениях машины $U_H < 30$ В;

$e < 1,5$ при напряжениях машины $U_H > 110$ В.

2.7. Расчёт магнитной цепи и характеристики холостого хода

Расчёт магнитной цепи имеет целью определение МДС её отдельных участков и суммарной МДС на пару полюсов. Магнитную цепь разбивают на следующие участки: спинка якоря, зубцы якоря, воздушный зазор между полюсом и якорем, сердечник полюса, воздушный зазор между полюсом и станиной, станина. Эскиз магнитной цепи изображен на рис. 2.7.

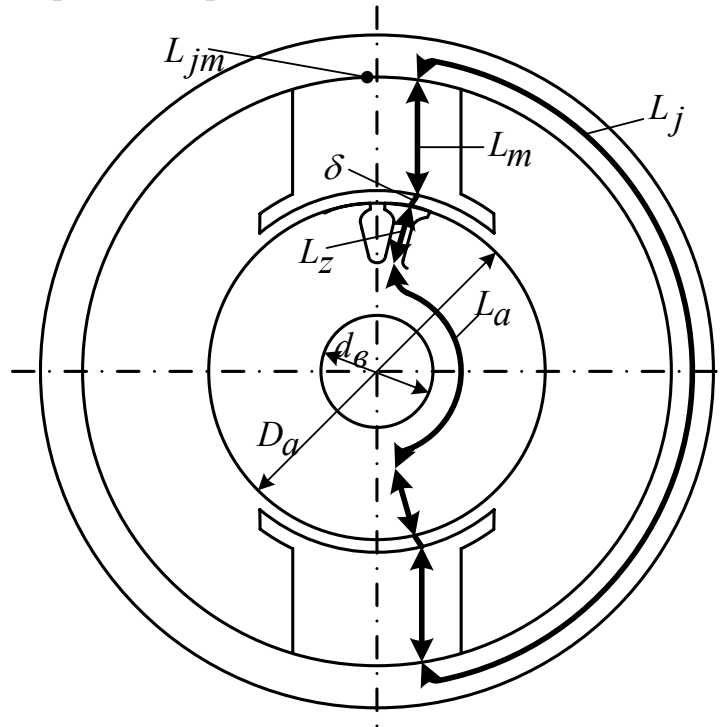


Рис. 2.7. Пути магнитного потока

Расчёт магнитной цепи осуществляется в следующей последовательности.

Высота спинки якоря:

$$h_a = \frac{D_a - (2h_z + d_e)}{2}, \text{ м.} \quad (2.61)$$

Уточненное значение индукции в спинке якоря:

$$B_a = \frac{\Phi_\delta}{2k_c h_a l_\delta}, \text{ Тл.} \quad (2.62)$$

Осевая длина полюса: $l_m = l_\delta, \text{ м.} \quad (2.63)$

Высота сердечника полюса: $h_m = (0,25 \dots 0,4) D_a, \text{ м.} \quad (2.64)$

Поток сердечника полюса

$$\Phi_m = k_\sigma \Phi_\delta, \text{ Вб,} \quad (2.65)$$

где $k_\sigma \approx 1,08 \dots 1,15$ – коэффициент рассеяния.

Поперечное сечение сердечника полюса

$$Q_m = \frac{\Phi_m}{B_m}, \text{ м}^2, \quad (2.66)$$

где $B_m = 1,0 \dots 1,5$ – индукция в сердечнике полюса, Тл.

Ширина сердечника полюса

$$b_m = \frac{Q_m}{k'_c l_m}, \text{ м}, \quad (2.67)$$

где $k'_c = 0,95$ – коэффициент заполнения сердечника полюса при шихтованных полюсах; в случае цельных полюсов $k'_c = 1,0$.

Поперечное сечение станины

$$Q_j = \frac{\Phi_m}{2B_j}, \text{ м}^2, \quad (2.68)$$

Где $B_j = 1,0 \dots 1,5$ – индукция в станине, Тл.

Осевая длина станины:

а) с отъемными полюсами

$$l_j = l_\delta + (3 \dots 5) \cdot 10^{-2}, \text{ м}; \quad (2.69)$$

б) шихтованной

$$l_j = l_\delta, \text{ м}. \quad (2.70)$$

Высота станины

$$h_j = \frac{Q}{k'_c l_j}, \text{ м}. \quad (2.71)$$

Определение средних длин путей магнитного потока (см. рис. 2.7):

а) в станине – L_j , м;

б) в сердечнике полюсов – $L_m = 2h_m$, м;

в) воздушном зазоре между полюсами и якорем $L_\delta = 2\delta$, м;

г) в зубцах якоря – $L_z = 2h_z = 2h_n$, м;

д) в спинке якоря –

$$L_a = \frac{\pi(D_a - 2h_z - h_a)}{2p}, \text{ м}; \quad (2.72)$$

е) в воздушном зазоре между полюсами и станиной –

$$L_{nc} = 2\delta_c = 2(0,35 \dots 0,40) \cdot 10^{-4}, \text{ м}.$$

Коэффициенты пропорциональности для расчёта потоков, индукций и МДС:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{60a}{pnN}; \quad A_2 = k_\sigma A_1; \quad B_1 = \frac{A_1}{b_\delta l_\delta}; \quad B_2 = \frac{t_1 B_1}{k_c b_z}; \\ B_3 &= \frac{A_1}{2k_c l_\delta h_a}; \quad B_4 = \frac{A_2}{k'_c l_m b_m}; \quad B_5 = \frac{A_2}{2k'_c l_j h_j}; \\ C_1 &= 1,6 \cdot k_\delta \delta B_1 \cdot 10^6; \quad C_2 = 1,6 \cdot \delta_c B_4 \cdot 10^6; \\ C_3 &= 2h_z; \quad C_4 = L_a; \quad C_5 = 2h_m; \quad C_6 = L_j \end{aligned} \quad (2.73)$$

Здесь k_δ – коэффициент воздушного зазора

$$k_{\delta} = \frac{t_1 + 10\delta}{b'_z + 10\delta}. \quad (2.74)$$

Приведение выражений для потоков и индукций к виду, удобному для расчёта характеристики холостого хода:

$$\begin{aligned} \Phi_{\delta} &= A_1 E_a, \text{ Вб}; & \Phi_m &= A_2 E_a, \text{ Вб}; \\ B_{\delta} &= B_1 E_a, \text{ Тл}; & B_z &= B_2 E_a, \text{ Тл}; \\ B_a &= B_3 E_a, \text{ Тл}; & B_m &= B_4 E_a, \text{ Тл}; & B_j &= B_5 E_a, \text{ Тл}. \end{aligned} \quad (2.75)$$

МДС воздушного зазора

$$F_{\delta} = C_1 E_a, \text{ А.}$$

МДС стыка между станиной и отъемными полюсами

$$F_{jm} = C_2 E_a, \text{ А.}$$

МДС зубцовой зоны

$$F_z = C_3 H_z, \text{ А.}$$

МДС спинки якоря

$$F_a = C_4 H_a, \text{ А.} \quad (2.76)$$

МДС сердечников полюсов

$$F_m = C_5 H_m, \text{ А.}$$

МДС станины

$$F_j = C_6 H_j, \text{ А.}$$

Здесь H_z, H_a, H_m, H_j – напряженности в зубцах, спинке якоря, в сердечниках полюсов и станине, определяемые для известных значений индукции по кривым намагничивания магнитных материалов (см. Приложение 4), из которых выполнены соответствующие участки магнитной цепи. Материалы отдельных участков предварительно оговариваются.

Результирующая МДС возбуждения на пару полюсов при холостом ходе

$$F_{\epsilon} = F_{\delta} + F_a + F_z + F_m + F_j + F_{jm}, \text{ А.} \quad (2.77)$$

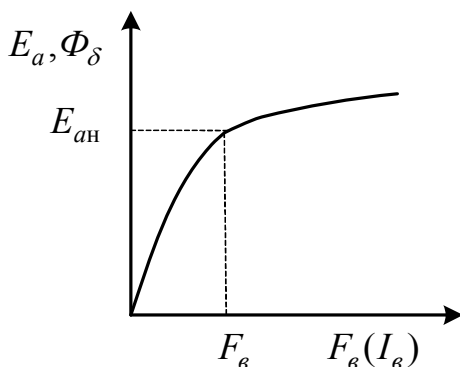


Рис. 2.8. Характеристика холостого хода

Характеристика холостого хода представляет собой зависимость ЭДС якоря от тока или МДС возбуждения при постоянной частоте вращения и токе якоря, равном нулю, т.е. зависимость $E_a = f(I_{\epsilon})$ или $E_a = f(F_{\epsilon})$ (рис. 2.8). Так как $\Phi_{\delta} = A_1 E_a$, то в другом масштабе эта характеристика представляет собой зависимость $\Phi_{\delta} = f(F_{\epsilon})$.

Расчёт характеристики холостого хода осуществляется по общепринятой методике. Задаваясь несколькими относительными значениями ЭДС (0,5; 0,8; 1,0; 1,15; 1,3) $E_{ан}$, для каждого из них определяют результирующую МДС, необходимую для проведения

потока через все участки магнитной цепи при холостом ходе. Результаты расчёта удобно свести в табл.2.2.

Таблица 2.2

Результаты расчёта характеристики холостого хода

Расчитываемые параметры	$k E_a$				
	$0,5 E_a$	$0,8 E_a$	E_a	$1,15 E_a$	$1,3 E_a$
Φ_δ					
B_δ					
B_z					
B_a					
B_m					
B_j					
$B_{jm} = B_m$					
H_z					
H_a					
H_m					
$F_\delta = 1,6B_\delta k_\delta \delta 10^6$					
$F_z = H_z L_z$					
$F_a = H_a L_a$					
$F_m = 2H_m h_m$					
$F_j = H_j L_j$					
$F_{jm} = 1,6B_m \delta_c 10^6$					
$F_\epsilon = \Sigma F$					
$(F_\delta + F_z)/2$					

2.8. Полная МДС возбуждения при нагрузке

При работе коллекторного микродвигателя постоянного тока под нагрузкой на магнитное поле воздушного зазора существенное влияние оказывает реакция якоря, которая может проявляться в виде трех составляющих МДС якоря: поперечной, продольной и коммутационной. Как известно, при наличии насыщения магнитной цепи поперечная МДС якоря F_q всегда вызывает ослабление поля машины, а продольная и коммутационная МДС F_d и F_k в электродвигателях малой мощности усиливает его. Следовательно, суммарная МДС якоря микродвигателя при нагрузке будет:

$$F_r = F_q - F_d - F_k, \text{ А.} \quad (2.78)$$

Тогда полная МДС возбуждения при нагрузке (на пару полюсов)

$$F'_\epsilon = F_\epsilon + F_r, \text{ А.} \quad (2.79)$$

Для определения размагничивающей составляющей поперечной реакции якоря F_q , строят по расчётным данным переходную характеристику $B_\delta = f(F_\delta + F_z)/2$ (рис. 2.9). Далее изображённый на этом рисунке прямоугольник $abcd$ с основанием bc перемещают вправо так, чтобы площади заштрихованных криволинейных треугольников были равны.

Тогда

$$F_q = 2mn. \quad (2.80)$$

При определении размагничивающего воздействия поперечной реакции якоря по переходной характеристике следует учитывать возможность «опрокидывания» магнитного поля в зоне полюсного наконечника, где МДС якоря и возбуждения действуют встречно (рис. 2.10). В этом случае размагничивающую МДС поперечной реакции якоря определяют согласно рис. 2.10:

$$B_{\delta \text{ ср.}} = B'_{\delta \text{ ср.}} - B''_{\delta \text{ ср.}}, \text{ Тл,} \quad (2.81)$$

где

$$B'_{\delta \text{ ср.}} = \frac{1}{6}(4B_{\delta \text{ н}} + B_{\delta \text{ макс}}), \text{ Тл,}$$

$$B''_{\delta \text{ ср.}} = \frac{1}{6}(4B'_{\delta} + B'_{\delta \text{ макс}}), \text{ Тл.}$$

Непосредственно из рис. 2.10 следует, что поперечная составляющая МДС якоря $F_q \approx 2xy$.

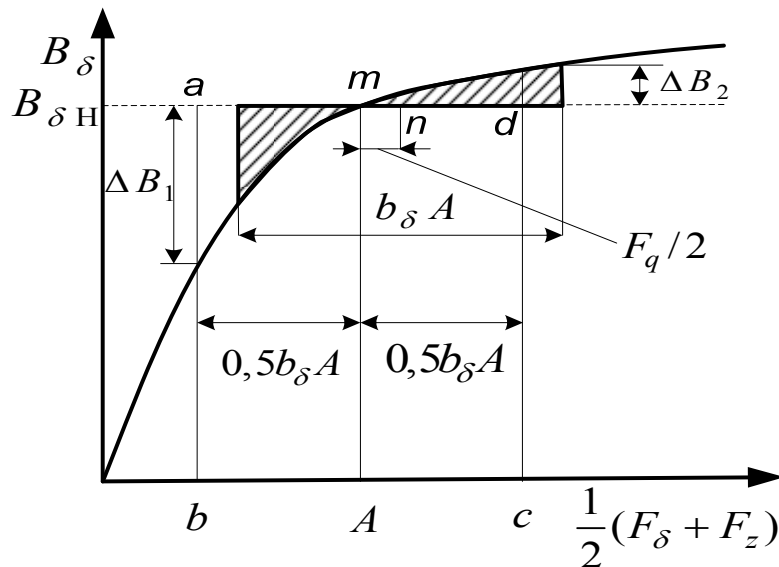


Рис. 2.9. Переходная характеристика

Продольная составляющая МДС якоря

$$F_d = 2b_d A, \text{ А,} \quad (2.82)$$

где $b_d = (0,15...0,3) \cdot 10^{-3}$, м – возможное самопроизвольное смещение щёток с геометрической нейтрали по механическим причинам и неточности установки.

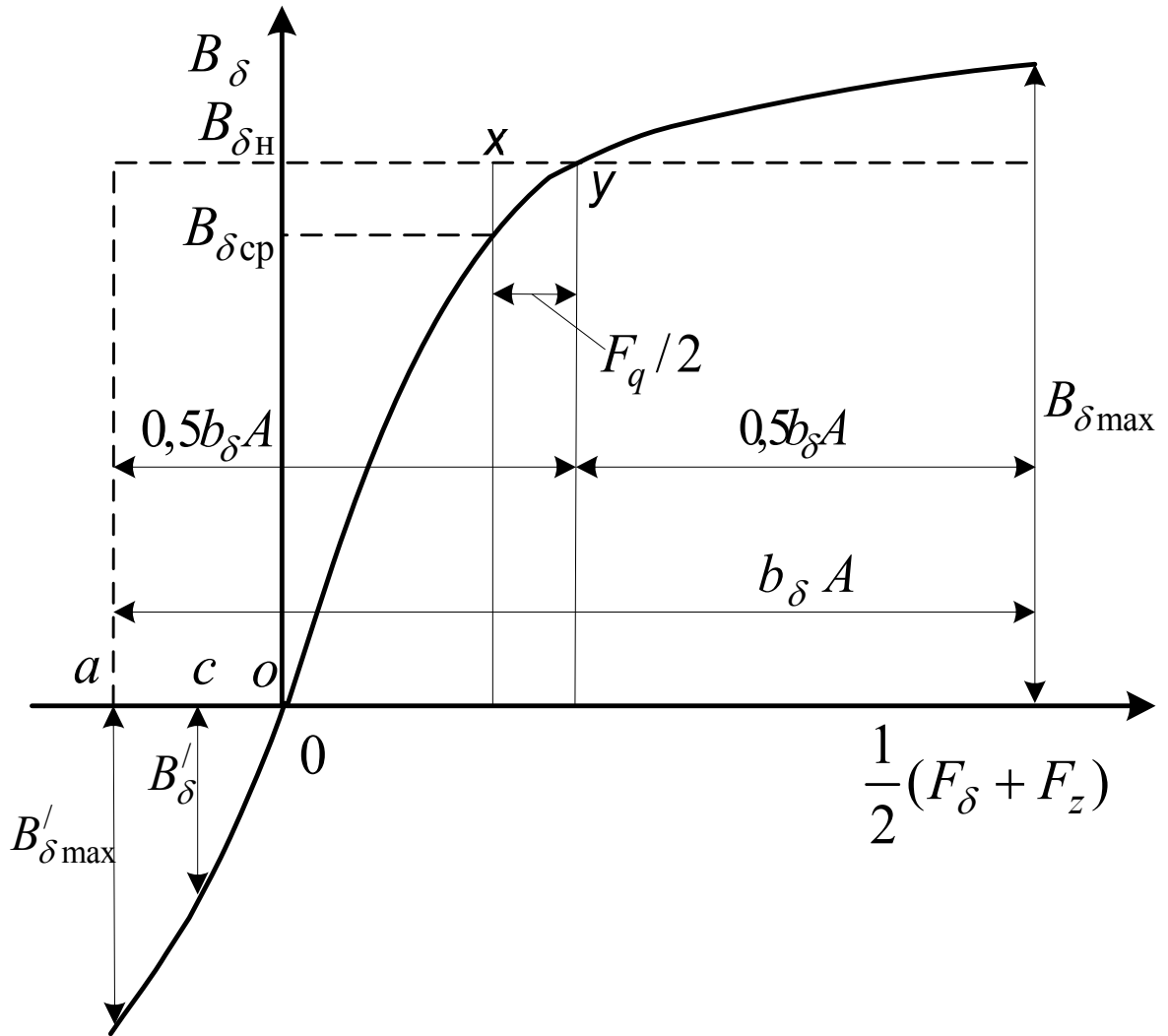


Рис. 2.10. Переходная характеристика с учетом «опрокидывания» магнитного поля

Как известно, в машинах постоянного тока без добавочных полюсов при положении щёток на геометрической нейтрали процесс коммутации тока в короткозамкнутых секциях имеет замедленный характер. В этом случае коммутационная МДС якоря F_K по отношению к полю полюсов оказывается намагничивающей в электродвигателях и размагничивающей в генераторах.

Продольная коммутационная МДС якоря F_K в машинах малой мощности возникает благодаря смещению нейтральной точки обмотки с геометрической нейтрали при замедленной коммутации тока в короткозамкнутых секциях. Ее величина может быть определена по следующей формуле:

$$F_K = b_K A \frac{i_2^2 \cdot \omega}{a'_0 + b'_0 \cdot i_2 + \omega \cdot i_2} \left(1 + \frac{0,2\pi \cdot \tau}{\delta_0 \cdot \xi} \cdot 10^{-8} \right),$$

где $i_2 = I/I_a$ – относительная величина тока якоря в долях номинального значения; $\omega = \Omega/\Omega_H$ – относительная величина угловой скорости вращения якоря

в долях номинального значения; A – линейная нагрузка якоря при номинальном токе согласно (2.22).

$$a'_0 = \frac{1,7a' \cdot A'}{\Delta U_{\text{щ}}}; b'_0 = \frac{1,7b' \cdot A'}{\Delta U_{\text{щ}}}; \delta_0 = \frac{\tau(1 - \alpha_\delta)}{2}, \text{ при этом}$$

$$A' = \frac{r_{\text{щ}} \cdot T_K}{L_\sigma}; r_{\text{щ}} = \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{2I_{\text{щ}}}; T_K = \frac{b_{\text{щ}}}{\nu_K}.$$

Здесь $L_\sigma = \frac{W_C \cdot \xi \cdot A \cdot l_\delta \cdot b'_{\text{щ}}}{i_a}$ – средняя эквивалентная индуктивность секции якоря,

Гн; $\Delta U_{\text{щ}}$ – переходное падение напряжения в щеточном контакте, В; $I_{\text{щ}} = I_a / p$ – ток одной щетки, А; $i_a = I_2 / 2a$ – ток параллельной ветви; a', b' – составляющие переходного падения напряжения в щетках; $\tau, W_C, \nu_K, b_{\text{щ}}, b'_{\text{щ}}, b_K, \xi, \delta_0$ – величины рассчитаны ранее.

Переходное падение напряжения в контакте щеток при номинальных плотностях тока в них в среднем можно принять для следующих марок щеток:

$$\mathbf{M-1} - a' = 0,8 \text{ В}; b' = 0,7 \text{ В};$$

$$\mathbf{МГ-4} - a' = 0,6 \text{ В}; b' = 0,4 \text{ В};$$

$$\mathbf{\text{ЭГ-2}} - a' = 2,1 \text{ В}; b' = 0,4 \text{ В}.$$

2.9. Расчёт обмотки возбуждения

Двигатель параллельного возбуждения.

Сечение провода обмотки

$$q_\theta = k_\theta \frac{pF'_\theta l_{\text{ср.}\theta}}{57U}, \text{ мм}^2. \quad (2.84)$$

где k_θ – коэффициент, учитывающий сопротивление обмотки возбуждения при ее нагревании от 20°C до $\theta^\circ\text{C}$, F'_θ – полная МДС возбуждения на пару полюсов при нагрузке; $l_{\text{ср.}\theta}$ – средняя длина витка обмотки возбуждения:

$$l_{\text{ср.}\theta} = 2(l_m + b_m) + \pi b_k, \text{ м} - \text{при отъёмных полюсах};$$

$$l_{\text{ср.}\theta} = 2l_m + b_m + b_\delta + \pi b_k, \text{ м} - \text{для шихтованной станины}; \quad (2.84, \text{ а})$$

$$b_k = (1,0 \dots 2,0) \cdot 10^{-2}, \text{ м} - \text{ширина катушки}; U - \text{напряжение возбуждения, В}.$$

Марка и размеры провода выбираются по приложению 2.

Плотность тока в обмотке возбуждения:

$$j_\theta = \frac{I_\theta}{q_\theta}, \text{ А/мм}^2. \quad (2.85)$$

В машинах длительного режима с естественным охлаждением – $j_g = 3...5$, А/мм²; с самовентиляцией – $j_g = 5...8$, А/мм²; с продувом – $j_g = 7...12$, А/мм². Для машин кратковременного режима указанные пределы могут быть увеличены на 30... 100%.

Число витков обмотки возбуждения на полюс

$$W_g = \frac{F_g}{2I_g}. \quad (2.86)$$

Потребная площадь окна для размещения обмотки возбуждения

$$Q'_g = \frac{Wd_g}{f'_0}, \text{ мм}^2, \quad (2.87)$$

где d_g – диаметр изолированного провода обмотки параллельного возбуждения; $f'_0 = 0,82...0,88$ – коэффициент, учитывающий возможные неточности намотки рядов провода в катушке.

Фактическая площадь окна для размещения обмотки возбуждения

$$Q_g = (1,1...1,2)Q'_g, \text{ мм}^2.$$

Далее производится размещение обмотки возбуждения и уточнение высоты полюса.

Сопротивление обмотки параллельного возбуждения в нагретом состоянии

$$r_g = k_\theta \frac{2pW_g l_{cp.g}}{57q_g}, \text{ Ом}. \quad (2.88)$$

Полученное сопротивление обмотки возбуждения при заданном напряжении машины должно соответствовать скорректированному значению тока возбуждения:

$$I_g = \frac{U}{r_g}, \text{ А}. \quad (2.89)$$

Двигатель последовательного возбуждения.

Число витков последовательной обмотки возбуждения на полюс

$$W_c = \frac{F'_g}{2I_a}. \quad (2.90)$$

Сечение и диаметр провода обмотки возбуждение

$$q_c = \frac{I_a}{j_c}, \text{ мм}^2, \quad (2.91)$$

где j_c – предварительное значение плотности тока в обмотке возбуждения. По приложению 2 окончательно выбирают ближайшее сечение и диаметр провода ($q_c, d_c, d_{ис}$) и уточняют плотность тока в обмотке возбуждения.

Сопротивление последовательной обмотки возбуждения в нагретом состоянии

$$r_c = k_\theta \frac{2pW_c l_{cp.c}}{57q_c}, \text{ Ом}. \quad (2.92)$$

Здесь $l_{ср,с}$ – средняя длина витка обмотки возбуждения (см. *Расчёт длины витка обмотки параллельного возбуждения*).

Падение напряжения в обмотке возбуждения

$$\Delta U = I_a r_c, \text{ В.} \quad (2.93)$$

Проверка величины ЭДС якоря при нагрузке

$$E_a = U - \Delta U_a - \Delta U_{щ} - \Delta U_c, \text{ В.} \quad (2.94)$$

Если эта величина ЭДС отличается от первоначально принятого значения более чем на $\pm 3...5\%$, то для обеспечения заданной частоты вращения нужно по полученному здесь значению ЭДС и характеристике холостого хода определить результирующую МДС F'_θ и полную МДС возбуждения

$$F'_\theta = F_\theta + F_r, \text{ А.}$$

Далее осуществляется пересчёт $W_c, r_c, \Delta U_c, E_a$.

2.10. Потери и коэффициент полезного действия

Электрические потери в обмотке якоря.

$$P_{эл.1} = I_a r_a, \text{ Вт.} \quad (2.95)$$

Электрические потери в обмотке возбуждения:

а) при параллельном возбуждении

$$P_{эл.2} = P_\theta = I_\theta^2 r_\theta = U I_\theta, \text{ Вт} \quad (2.96)$$

б) при последовательном возбуждении

$$P_{эл.2} = P_c = I_a^2 r_c, \text{ Вт.} \quad (2.97)$$

Электрические потери в переходном контакте щёток на коллекторе

$$p_{щк} = I_a \Delta U_{щ}, \text{ Вт,} \quad (2.98)$$

Магнитные потери на гистерезис и вихревые токи в стали якоря:

а) Масса стали зубцов

$$G_z = 7800 Z b_z h_n l_\delta k_c, \text{ кг,} \quad (2.99)$$

где b_z и $h_n = h_z$ – ширина зубца и высота паза.

б) Масса стали спинки якоря

$$G_a = 1950 \left[(D_a - h_n)^2 - d_\theta^2 \right] l_\delta k_c, \text{ кг,} \quad (2.100)$$

в) Потери на гистерезис и вихревые токи

$$P_{мг} = 2,3 p_{1,0/50} \left(\frac{pn}{3000} \right)^\beta (B_z^2 G_z + B_a^2 G_a), \text{ Вт.} \quad (2.101)$$

Здесь $p_{1,0/50}$ – удельные потери в листовой электротехнической стали при индукции $B = 1$ Тл и частоте перемагничивания $f = 50$ Гц (Приложение 5); $\beta = 1,3...1,5$.

Механические потери:

а) Потери трения щёток о коллектор

$$p_{\text{тщ}} = k_{\text{тщ}} p_{\text{щ}} S_{\text{щ}} v_{\text{к}}, \text{ Вт}, \quad (2.102)$$

где $k_{\text{тщ}}$ – коэффициент трения щёток о коллектор;

$p_{\text{щ}}$ – удельное давление на щётки, Па;

$S_{\text{щ}}$ – суммарная поверхность всех щеток, м²;

$v_{\text{к}}$ – окружная скорость коллектора, м/с.

При средних значениях удельного давления на щётки $p_{\text{щ}} = 3 \cdot 10^4$ Па и коэффициенте трения $k_{\text{тщ}} = 0,25$.

$$p_{\text{тщ}} = 7,5 S_{\text{щ}} v_{\text{к}} \cdot 10^{-3}, \text{ Вт}; \quad (2.103)$$

б) Потери на трение в подшипниках

$$p_{\text{тп}} = k_m m'_a n \cdot 10^{-3}, \text{ Вт}. \quad (2.104)$$

Здесь k_m – коэффициент, который для электрических микромашин с шарикоподшипниками составляет (по опытным данным) 1...3; m'_a – масса якоря, кг.

$$m'_a = \pi / 4 (D_a^2 l_{\delta} \gamma_a + D_k^2 l_k \gamma_k). \quad (2.105)$$

Если принять $k_m = 2$, а среднюю плотность массы якоря и коллектора

$$\gamma_a = \gamma_k = 8500 \text{ кг/м}^3,$$

то

$$p_{\text{тп}} = 1,3 (D_a^2 l_{\delta} + D_k^2 l_k) n \cdot 10^{-3}, \text{ Вт}; \quad (2.106)$$

в) Потери на трение якоря о воздух

$$p_{\text{тв}} = 2 D_a^3 l_{\delta} n^3 \cdot 10^{-6}, \text{ Вт при } n < 12000 \text{ об/мин} \quad (2.107)$$

$$p_{\text{тв}} = 0,3 D_a^5 \left(1 + 5 \frac{l_{\delta}}{D_a} \right) n^3 \cdot 10^{-6}, \text{ Вт при } n > 15000 \text{ об/мин} \quad (2.108)$$

Суммарные механические потери

$$P_{\text{мх}} = p_{\text{тщ}} + p_{\text{тп}} + p_{\text{тв}}, \text{ Вт}. \quad (2.109)$$

Общие потери в машине

$$\Sigma p = 1,1 (p_{\text{эл.1}} + p_{\text{эл.2}} + p_{\text{щк}} + p_{\text{мг}} + p_{\text{мх}}), \text{ Вт}. \quad (2.110)$$

Проверка полезной мощности:

$$P_2' = P_1 - \Sigma p = UI - \Sigma p, \text{ Вт}, \quad (2.111)$$

где $P_1 = UI$ – потребляемая двигателем мощность, Вт.

Необходимо, чтобы $P_2' \approx P_2$.

$$\text{Коэффициент полезного действия } \eta = \frac{UI - \Sigma p}{UI} \cdot 100, \%. \quad (2.112)$$

2.11. Рабочие характеристики электродвигателя

Основными рабочими характеристиками электродвигателя постоянного тока являются зависимости I_a , P_1 , n , P_2 , $\eta = f(M_2)$, где M_2 – полезный момент на валу.

В табл. 2.3 даны формулы для расчёта ряда необходимых величин при заданном значении потребляемого тока. Расчёт потерь $p_{\text{мг}}$, $p_{\text{мх}}$ и Σp осуществляют по формулам, приведенным выше.

Попутно отметим, что для двигателя параллельного возбуждения $\Delta U_c = 0$, $F_g = 2I_g W_g = \text{const}$, для двигателя последовательного возбуждения $I_g = 0$, $I_a = I$, $F_g = 2W_g I_a$, $p_{\text{эл.2}} = I_a^2 r_c$.

Расчёт рабочих характеристик электродвигателя целесообразно выполнить на ЭВМ. Студенту предлагается самостоятельно составить алгоритм электромагнитного расчёта двигателя на ЭВМ, положив в основу методику, изложенную в настоящем пособии.

Таблица 2.3

Формулы для расчёта необходимых величин при заданном значении потребляемого тока

Рассчитываемые величины	Потребляемый ток				
	$0,4 I_H$	$0,6 I_H$	$0,8 I_H$	$1,0 I_H$	$1,2 I_H$
I_g, A					
$I_a = I - I_g, \text{A}$					
$\Delta U = I_a r_a, \text{B}$					
$\Delta U_c = I_a r_c, \text{B}$					
$\Delta U_{\text{щ}}, \text{B}$					
$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_{\text{щ}} + \Delta U_c, \text{B}$					
$E_a = U - \Delta U, \text{B}$					
$F_g' = 2W_g I_g; F_g' = 2W_c I_g, \text{A}$					
$F_r = F_{rH} I_a / I_{aH}, \text{A}$					
$F_g = F_g' - F_r, \text{A}$					
$\Phi_\delta, \text{Вб}$					
$n = \frac{60aE_a}{pN_a \Phi_\delta}, \text{об/мин}$					
$p_{\text{эл.1}} = I_a^2 r_c, \text{Вт}$					
$p_{\text{эл.2}} = UI_g; p_{\text{эл.2}} = I_a^2 r_c, \text{Вт}$					
$p_{\text{щк}} = I_a \Delta U_{\text{щ}}, \text{Вт}$					
$p_{\text{мг}}, \text{Вт}$					
$p_{\text{мх}}, \text{Вт}$					
$\Sigma p, \text{Вт}$					
$P_1 = UI, \text{Вт}$					

$P_2 = UI - \Sigma p$, Вт					
$\eta = P_2 / P_1 \cdot 100$, %					
$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n}$, Н·м					

2.12. Особенности расчёта исполнительных двигателей постоянного тока с зубчатым якорем

2.12.1. Электромагнитные нагрузки и расчётно-конструктивные константы

При расчёте исполнительных двигателей постоянного тока (ИДП) основное внимание должно быть обращено на выбор геометрии якоря, исходя из заданного быстродействия. Это предполагает максимально возможное использование всех материалов и обеспечение максимально возможного момента инерции. Поэтому в задании на проектирование такого ИДП наряду с полезной мощностью или моментом на валу, частотой вращения и способом возбуждения должны быть заданы электромеханическая постоянная времени T_m , мс или момент инерции J , кг·м².

Появление новых электротехнических материалов и возможность увеличения электромагнитных нагрузок позволяет создать быстродействующий ИДП в обычном исполнении с динамическими и массогабаритными показателями, приемлемыми для ряда систем автоматического управления и регулирования. При этом не исключается существенное насыщение магнитопровода машины.

При расчёте быстродействующих ИДП обычного исполнения предполагаются предварительно выбранными или заданными следующие величины:

η – коэффициент полезного действия (КПД);

A – линейная нагрузка якоря, А/м;

Aj_a – произведение линейной нагрузки на плотность тока в обмотке якоря, А²/м³;

B_z – индукция в зубцах якоря, Тл;

B_a – индукция в спинке якоря, Тл;

a_δ – коэффициент расчётной полюсной дуги;

p – число пар полюсов;

λ – отношение расчётной длины якоря к его диаметру;

$k_{з.п.}$ – коэффициент заполнения паза якоря голой медью;

k_ϕ – коэффициент формы паза, равный отношению площади трапеции,

описанной около паза к реальной площади паза;

k_d – отношение диаметра вала к диаметру якоря;

k_c – коэффициент заполнения пакета якоря сталью.

Значение η и A предварительно выбирают согласно рекомендациям, изложенными в пунктах 2.1.1. и 2.1.2. Стремление уменьшить момент инерции приводит к

необходимости увеличения индукции в зубцах и спинке якоря до значений: $B_z = 1,6 \dots 1,8$ Тл и $B_a = 1,4 \dots 1,6$ Тл. Это обуславливает значительное насыщение магнитной цепи машины.

Особое внимание должно быть обращено на выбор произведения Aj_a , пропорционального удельной тепловой нагрузке якоря. Оно зависит от класса нагревостойкости изоляции и линейной скорости. Для быстродействующего ИДП наиболее целесообразно применять изоляцию класса F . В этом случае произведение Aj_a находится в пределах $(7,0 \dots 10,0) 10^{10} \text{ А}^2/\text{м}^3$.

Коэффициент расчётной полюсной дуги $a_\delta = 0,6 \dots 0,7$.

Число пар полюсов двигателя зависит от его мощности и может быть равно 1 или 2. Однако, как показывает анализ, четырехполюсный ИДП с простой волновой обмоткой оказывается более предпочтительным в отношении быстродействия.

По условиям быстродействия коэффициент λ следует выбирать в пределах $1,4 \dots 2,5$. Чрезмерное его увеличение недопустимо по условиям механической жесткости вала и обеспечения надлежащей критической частоты вращения. Ввиду отмеченных ограничений желательно, чтобы $\lambda \leq 2$. По тем же соображениям следует несколько увеличивать значение коэффициента k_d и принимать его равным $0,3 \dots 0,35$. Пакет якоря набирают из листов электротехнической стали.

Для этой цели применяется горячекатаная сталь толщиной $0,35$ мм и $0,5$ мм марок **1212, 1213, 1311, 1312**, а при повышенной частоте – **1411, 1412, 1413**. В случае изоляции листов лаком коэффициент заполнения пакета сталью $k_c = 0,93$ при толщине листа $0,5$ мм и $k_c = 0,91$ при толщине – $0,35$ мм. Если пакет якоря набирают из листов холоднокатаной изотропной стали толщиной $0,5$ мм, то при изоляции оксидированием $k_c = 0,97$.

Пазы якоря выполняются, как правило, полузакрытыми и имеют круглую, овальную или трапецеидальную форму (см. рис. 2.4). При этом $k_\phi = 1,06 \dots 1,08$ для трапецеидальных и $k_\phi = 1,11 \dots 1,14$ для круглых и овальных пазов. Коэффициент заполнения паза якоря голый медью $k_{з.п.} = 0,25 \dots 0,35$.

2.12.2. Выбор основных размеров

Диаметр якоря

$$D_a = \sqrt[7]{\frac{4M_a^2 k_\phi}{\pi^2 \lambda^2 (Aj_a) k_{з.п.} \xi'}}, \quad (2.113)$$

где M_a – электромагнитный момент, Нм,

$$\begin{aligned} M_a &= P_a / \Omega ; \\ \xi' &= a_\delta^2 B_\delta^2 \Psi . \end{aligned} \quad (2.114)$$

P_a – электромагнитная мощность, Вт:

$$P_a = \frac{1 + 2\eta}{3\eta} P_2;$$

B_δ – индукция в воздушном зазоре, Тл.

$$\Psi = B_\delta^2 \left[\frac{\pi a_\delta}{4pk_c^2 B_a B_z} - \left(\frac{\pi a_\delta}{4pk_c B_a} \right) \right] - B_\delta \left[\frac{1-k_d}{2k_c B_a} + \frac{\pi a_\delta k_d}{4pk_c^2 B_a} \right] + \frac{1-k_d^2}{4}. \quad (2.115)$$

Выражение, аналогичное (2.113), но при $j_a = \text{const}$ получено в работе [11]. Заданное быстродействие учитывается здесь функцией $\xi = f(B_\delta)$ при $B_z = \text{const}$ и $B_a = \text{const}$. Действительно, от величины ξ зависят момент инерции якоря J_a и электромеханическая постоянная времени T_M :

$$J_a = \frac{\gamma_{\text{cp}} \pi}{32} \left(\frac{4M_a^2 k_\phi}{\pi^2 (A j_a) k_{3.\text{п.}} \xi^l} \right)^{5/7} \cdot \frac{k_h}{\lambda^{3/7}}, \text{ кг м}^2; \quad (2.116)$$

$$T_M = \frac{\lambda_{\text{cp}} k_h k_r p k_\phi}{8k_{3.\text{п.}}} \cdot \frac{1}{\xi^l}.$$

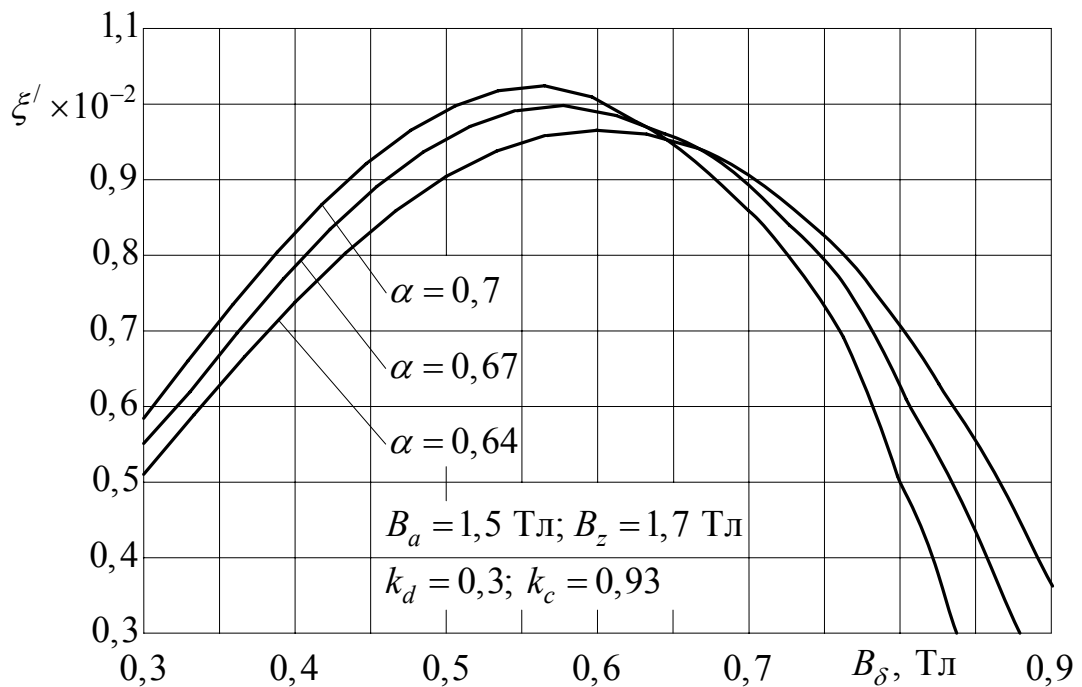


Рис. 2.12. Зависимости $\xi^l = f(B_\delta)$ при $p=1$

Здесь $\gamma_{\text{cp}} = (8 \dots 8,5) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – средняя плотность якоря и коллектора;

$k_h = 1 + \frac{k_\lambda + \pi}{2\rho\lambda} \sin \alpha$ – коэффициент, учитывающий момент инерции лобовых

частей обмотки якоря;

$k_\lambda = l_\delta/\tau = 1,1 \dots 1,2$ – коэффициент лобовых частей обмотки якоря;

$\alpha = \arccos(1/k_\lambda)$ – угол наклона лобовой части к активной части проводника;

$k_r = 1 + \frac{k_{\pi}\pi}{2\rho\lambda}$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления обмотки

якоря под влиянием лобовых частей;

ρ – удельное сопротивление меди при максимально допустимой температуре обмотки якоря, зависящее от класса нагревостойкости изоляции (таблица 2.4).

Таблица 2.4

Удельное сопротивление меди при максимально допустимой температуре обмотки якоря

Класс изоляции	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
ρ , Ом·м	$0,0234 \cdot 10^{-6}$	$0,0246 \cdot 10^{-6}$	$0,0249 \cdot 10^{-6}$	$0,0263 \cdot 10^{-6}$	$0,028 \cdot 10^{-6}$

Как следует из выражений (2.116) и (2.117), для увеличения быстродействия следует увеличивать значение функции $\xi = f(B_{\delta})$. Определяя производную от ξ по B_{δ} и приравнивая ее к нулю, можно найти индукцию в зазоре двигателя, соответствующую максимуму ξ и, следовательно, минимуму момента инерции. Зависимости $\xi = f(B_{\delta})$ при заданных B_a , B_z , k_d , k_c , a_{δ} и p приведены на рис. 2.12 и рис. 2.13. Благоприятное влияние на момент инерции J_a оказывает увеличение числа пар полюсов двигателя и расчётного коэффициента полюсной дуги a_{δ} .

Попутно отметим, что возможны случаи, когда оптимум функции ξ отсутствует и она монотонно возрастает с увеличением B_{δ} . Тогда при выборе значения индукции в воздушном зазоре следует руководствоваться ограничениями по другим показателям двигателя.

Согласно выражению (2.116) на момент инерции якоря оказывает влияние отношение $\frac{k_h}{\lambda^{3/7}}$. Однако при $\lambda \approx 2$ влияние этого отношения невелико. В результате решения уравнения (2.116) относительно ξ будем иметь [4]

$$\xi' = \frac{4M_a^2 k_{\phi}}{\pi^2 (A j_a) k_{3,п.}} \left(\frac{\gamma_{ср} \pi k_h}{32 J_a \lambda^{3/7}} \right)^{7/5}. \quad (2.118)$$

Выражение (2.116) позволяет определить величину ξ , соответствующую заданному моменту инерции. Далее по формуле (2.113) можно рассчитать диаметр якоря D_a и по кривым $\xi' = f(B_{\delta})$ найти индукцию в воздушном зазоре B_{δ} . Аналогичным способом поступают, если задана электромеханическая постоянная времени T_m .

Дальнейший расчёт ИДП осуществляется по изложенной выше традиционной методике [2, 6].

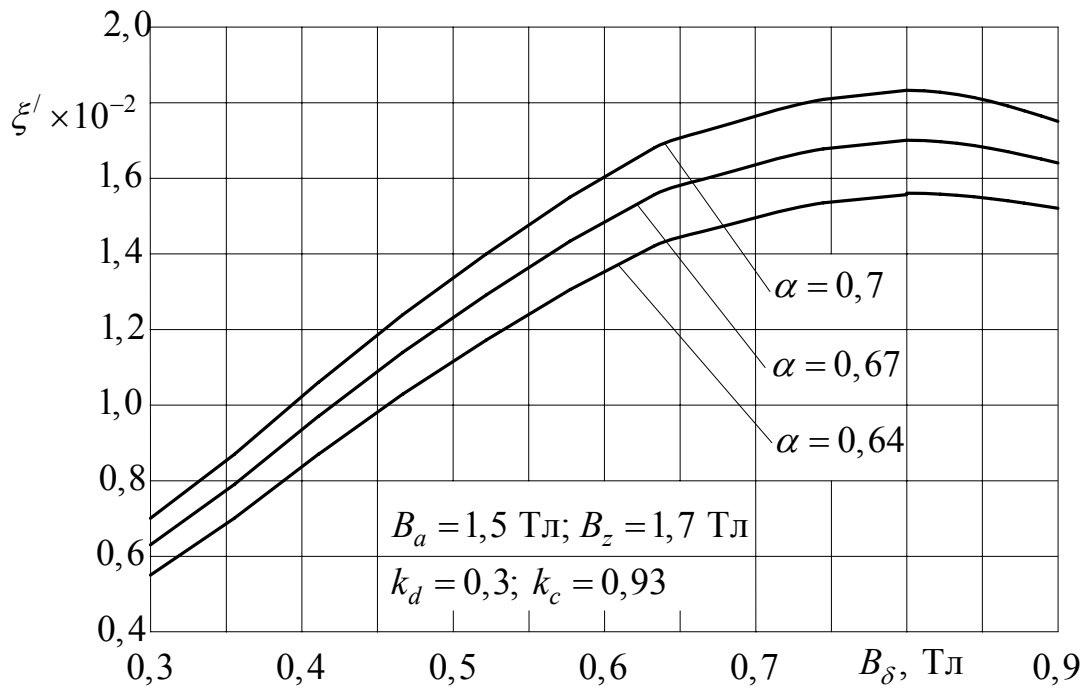


Рис. 2.13. Зависимости $\xi' = f(B_\delta)$ при $p=2$

Так, число пазов Z , высоту спинки якоря h_a , высоту паза h_n , ширину зубца b_z при выбранной геометрии пазово-зубцовой зоны (см. рис. 2.4) определяют, соответственно, по формулам:

$$Z = (3 \dots 10) D_a \cdot 10^{-2}, \text{ где } D_a \text{ в метрах}$$

$$h_a = \frac{\pi D_a a_\delta B_\delta}{4 p k_c B_a}; \quad (2.119)$$

$$h_n = 0,5 D_a (1 - k_d) - h_a; \quad (2.120)$$

$$b_z = \frac{\pi D_a B_\delta}{B_z k_c z}. \quad (2.121)$$

2.13. Тепловой расчёт микродвигателя постоянного тока

2.13.1. Общие замечания

Задачей теплового расчёта любой электрической машины является определение превышений температуры различных частей машины над температурой окружающей среды. Среднее превышение температуры обмоток не должны быть больше пределов, указанных в ГОСТ 183–74 в зависимости от класса нагревостойкости изоляции. При температуре охлаждающей среды $+40^\circ\text{C}$ предельные допускаемые превышения температуры для многослойных обмоток возбуждения и якорных обмоток, соединённых с коллектором, составляют: для класса изоляции **A** – 65°C ; для класса **E** – 75°C ; для класса **B** – 85°C . Превышение этих пределов приводит к значительному сокращению срока службы машины.

Тепловой расчёт проводится для номинального режима работы, который может быть продолжительным, кратковременным или повторнократковременным.

2.13.2. Тепловая схема замещения якоря

Приближенный тепловой расчёт якоря микродвигателя постоянного тока может быть выполнен на основе его тепловой схемы замещения (рис. 2.14)

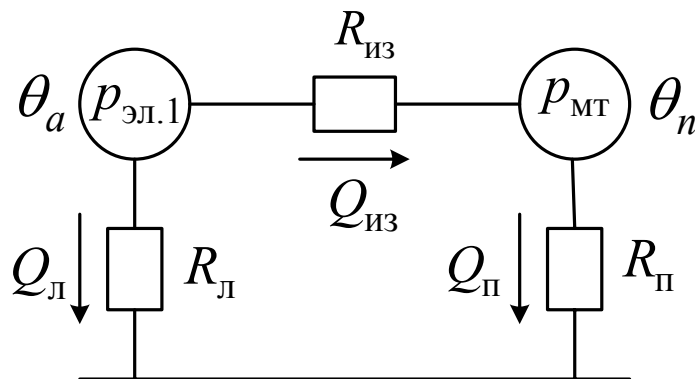


Рис. 2.14. Тепловая схема замещения якоря

Здесь приняты следующие обозначения:

$p_{эл.1}$ – электрические потери в обмотке якоря;

$p_{мт}$ – магнитные потери и потери на трение якоря о воздух, $p_{мт} = p_{мг} + p_{тв}$;

$R_{из}$ – общее тепловое сопротивление изоляции активной части обмотки якоря;

$R_{п}$ – тепловое сопротивление от пакета якоря к охлажденному воздуху;

$R_{л}$ – тепловое сопротивление лобовых частей обмотки якоря;

$Q_{из}$ – тепловой поток к стенкам зубцов пакета якоря с перепадом температуры в тепловом сопротивлении $R_{из}$;

$Q_{л}$ – тепловой поток с наружной поверхности лобовых частей;

$Q_{п}$ – тепловой поток с наружной поверхности пакета якоря;

θ_a – превышение температуры обмотки якоря;

θ_n – превышение температуры пакета якоря.

2.13.3. Расчёт тепловых сопротивлений якоря

Тепловое сопротивление изоляции активной части обмотки якоря

$$R_{из} = \frac{\delta'_и}{\lambda_{эКВ} S_{из}}. \quad (2.122)$$

Здесь $\delta'_и = \delta'_{и1} + \delta'_{и2}$ – общая толщина пазовой изоляции от меди до стенки паза (здесь и далее все линейные размеры берутся в см); $\delta'_{и1}$ – толщина пазовой изоляции и изоляции одной стороны проводника; $\delta'_{и2}$ – эквивалентная междувитковая изоляция проводников в пазу,

$$\delta'_{и2} = \frac{m_a}{4} \cdot \frac{d_{аи}}{k_{с0}}, \quad (2.123)$$

где m_a – число изолированных проводников в ряду по средней ширине паза

$$k_{с0} = 1 + 4 \left(\frac{d_a}{d_{аи}} - 0,4 \right);$$

d_a и $d_{аи}$ – диаметр голого и изолированного проводника обмотки якоря; $\lambda_{эКВ}$ – коэффициент теплопроводности между витковой изоляцией проводов в пазу и пазовой изоляцией, в электрических микромашинах $\lambda_{эКВ} \approx 0,0013...0,0014$, Вт/см²град; $S_{из}$ – площадь изоляции, см², $S_{из} = Z\Pi l_{\delta}$; Z – число пазов; Π – периметр паза; l_{δ} – длина пакета якоря.

Тепловое сопротивление от пакета якоря к охлаждающему воздуху

$$R_{\Pi} = \frac{1}{\alpha S_{\Pi}}, \quad (2.124)$$

где $\alpha = \alpha'(1 + 0,1\nu_a)$ – результирующий коэффициент теплоотдачи наружной поверхности якоря; $\alpha' = 0,0016...0,0020$, Вт/см²град для закрытого исполнения и $\alpha' = 0,0036...0,0044$ Вт/см²град для защищенного исполнения с вентилятором; ν_a – окружная скорость вращения якоря, м/с; $S_{\Pi} = Zl_{\delta}b'_z$ – теплорассеивающая поверхность пакета якоря, см²; b'_z – ширина зубца у его вершины. Тепловое сопротивление лобовой части обмотки якоря

$$R_{\Pi} = \frac{\delta''_и}{\lambda''_{эКВ} S_{л}} + \frac{1}{\alpha S_{л}}. \quad (2.125)$$

Здесь $\delta''_и = \delta''_{и1} + \delta''_{и2}$ – общая толщина изоляции лобовых частей катушек обмотки якоря; $\delta''_{и1} = 0,02$ см – толщина изоляции между медью катушек и их поверхностью теплоотдачи; $\delta''_{и2}$ – эквивалентная толщина междувитковой изоляции по высоте лобовой части,

$$\delta''_{и2} = \frac{m_{л}}{4} \cdot \frac{d_{аи}}{k_{с0}}, \quad (2.126)$$

$m_{л}$ – число изолированных проводников по этой высоте; $\lambda''_{эКВ} \approx 0,0016$ Вт/смград; $S_{л} \approx 0,5\pi D_a \tau$ – поверхность теплоотдачи лобовых частей, см²; D_a – наружный диаметр якоря; τ – полюсное деление.

2.13.4. Превышение температуры обмотки якоря

В результате расчёта тепловой схемы замещения (см. рис. 2.14) можно получить следующую формулу среднего превышения температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды внутри машины:

$$\theta_a = \frac{P_{\text{эл.1}} + P_{\text{мт}} \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{из}} - R_{\text{п}}}}{\frac{1}{R_{\text{из}} - R_{\text{п}}} + \frac{1}{R_{\text{л}}}}. \quad (2.127)$$

Превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды

$$\theta'_a = \theta_a + \theta_n, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где θ_n – температура подогретого воздуха внутри машины.

2.13.5. Тепловая схема замещения катушки обмотки возбуждения

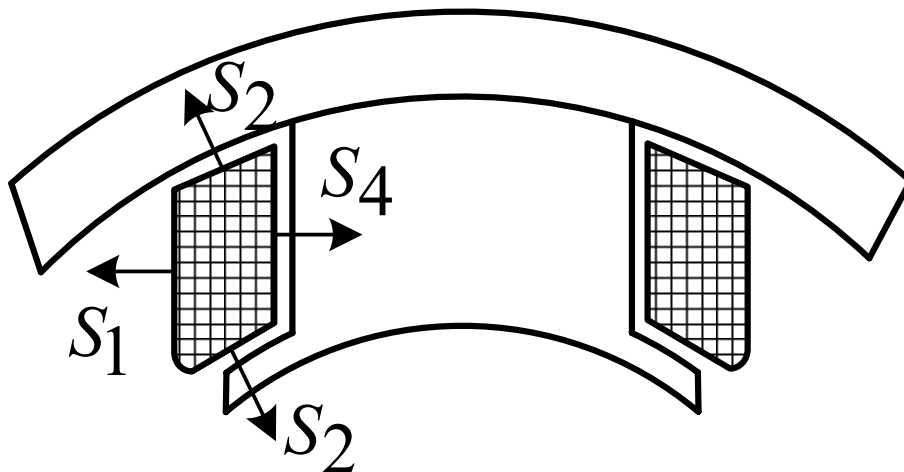


Рис. 2.15. Катушка обмотки возбуждения

При построении тепловой схемы замещения катушки обмотки возбуждения в случае станины с отъёмными полюсами необходимо учитывать следующие её поверхности охлаждения [3]:

$$S_1 \approx 2(b_m + l_m + 4\delta_k)h_k, \text{ см}^2, \quad (2.128)$$

– наружная поверхность по высоте катушки, соприкасающаяся с воздухом,

$$S_2 \approx 2(b_m + l_m + 4\delta_k)\delta_k + 2l_m\delta_k, \text{ см}^2, \quad (2.129)$$

– поверхность соприкосновения катушки с внутренней поверхностью станины и полюсного наконечника,

$$S_3 \approx 2(b_m + 2\delta_k)\delta_k, \text{ см}^2, \quad (2.130)$$

– наружная поверхность по высоте катушки, соприкасающаяся с воздухом вне полюсного наконечника (на рис. 2.15 S_3 не показана).

$$S_4 \approx 2(b_m + l_m)h_k, \text{ см}^2, \quad (2.131)$$

– поверхность соприкосновения катушки с сердечником полюса.

Здесь b_m и l_m – ширина и осевая длина сердечника полюса, δ_k и h_k – ширина и высота катушки возбуждения.

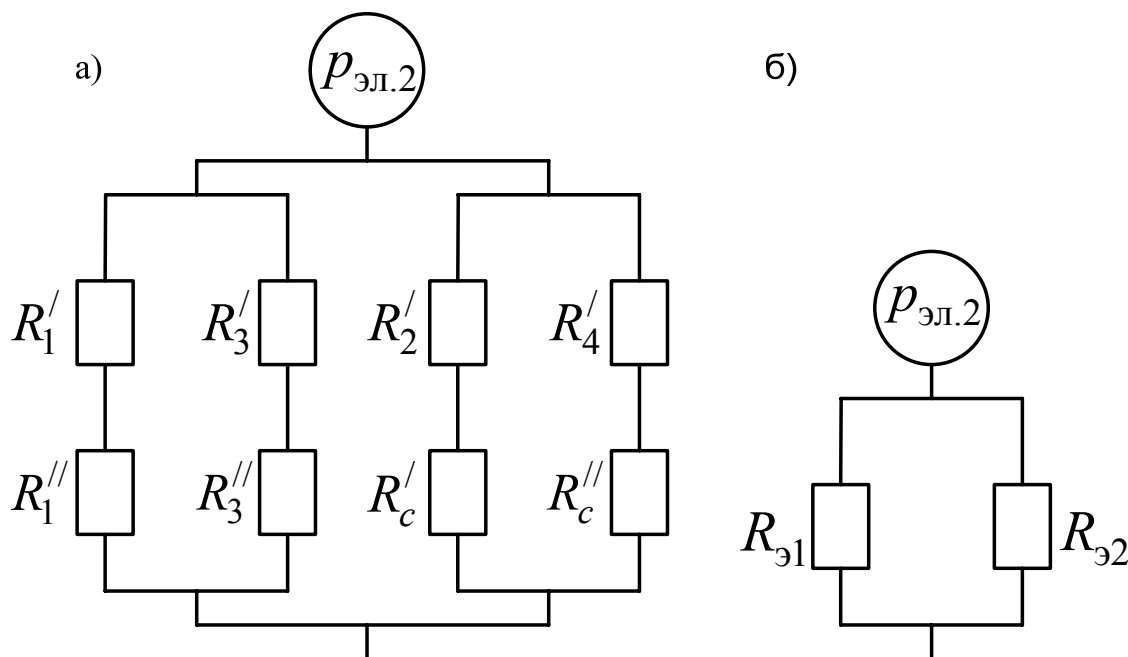


Рис. 2.16. Тепловая схема замещения катушки возбуждения

Всё тепло, выделяющееся в катушке, частично снимается воздухом непосредственно с поверхностей S_1 и S_3 , а частично передается через поверхности S_2 и S_4 стали сердечника полюса и станины и затем снимается с её внутренней и наружной поверхностей S'_c и S''_c . При этом

$$S' = \frac{\pi D_1 l_1}{2p} - S_2 \quad \text{и} \quad S'' = \frac{\pi D_n l_1}{2p}, \quad (2.132)$$

где D_1 и D_n – внутренний и наружный диаметры станин; l_1 – ее длина.

Тепловая схема замещения катушки возбуждения имеет вид, изображённый на рис. 2.16. На этой развернутой схеме (см. рис. 2.16, а) показаны следующие тепловые сопротивления: R'_1 и R'_3 – тепловое сопротивление изоляции от меди до поверхности катушек S_1 и S_3 ; R''_1 и R''_3 – тепловые сопротивления от поверхностей S_1 и S_3 к охлаждающему воздуху; R_2 и R_4 – тепловое сопротивление изоляции от меди до поверхности катушек S_2 и S_4 ; R'_c и R''_c – тепловые сопротивления от поверхностей S_2 и S_4 к охлаждающему воздуху.

2.13.6. Расчёт тепловых сопротивлений обмотки возбуждения

$$R_1' = \frac{\delta_{и1}}{\lambda_1 S_1}; R_1'' = \frac{1}{\alpha_0'' S_1}; R_2 = \frac{\delta_{и2}}{\lambda_2 S_2}; R_3' = \frac{\delta_{и3}}{\lambda_3 S_3}; \quad (2.133)$$

$$R_3'' = \frac{1}{\alpha_0'' S_3}; R_4 = \frac{\delta_{и4}}{\lambda_4 S_4}; R_c' = \frac{1}{\alpha_c' S_c'}. \quad (2.134)$$

Развернутая тепловая схема замещения (см. рис. 2.16, а) может быть приведена к виду, изображенному на рис. 2.16, б. Полное тепловое сопротивление этой схемы

$$R_3 = \frac{R_{31} R_{32}}{R_{31} + R_{32}}, \text{ где} \quad (2.135)$$

$$R_{31} = \frac{1}{\frac{\lambda_1 \alpha_0'' S_1}{\lambda_1 + \alpha_0'' \delta_{и1}} + \frac{\lambda_3 \alpha_0'' S_3}{\lambda_3 + \alpha_0'' \delta_{и3}}};$$

$$R_{32} = \frac{1}{\alpha_c' S_c' + \alpha_c'' S_c''} + \frac{1}{\lambda_2 \frac{S_2}{\delta_{и2}} + \lambda_4 \frac{S_4}{\delta_{и4}}};$$

Где α_0'' и α_c' – коэффициенты теплоотдачи наружной поверхности катушки и внутренней поверхности станины, Вт/см²·град:

– при закрытом исполнении:

$$\alpha_0'' = 0,0007...0,0008;$$

$$\alpha_c' = 0,0004...0,0005;$$

– при защищенном исполнении машины с вентилятором:

$$\alpha_0'' = 0,0014...0,0016;$$

$$\alpha_c' = 0,0008...0,0010.$$

$\alpha_c'' = 0,0008...0,0010$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности станины; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – коэффициенты теплопроводности междувитковой и наружной изоляций соответствующих поверхностей катушки, в среднем равные $\lambda_i = 0,0008...0,0009$ Вт/см·град; $\delta_{и1} = \delta_{и4} = \delta'_{ик} + \delta'_3$ – общая толщина изоляции от меди до поверхностей катушки возбуждения S_1 и S_4 ; $\delta_{и2} = \delta_{и3} = \delta''_{ик} + \delta''_3$ – то же до поверхностей S_2 и S_3 ; $\delta'_{ик}$ и $\delta''_{ик}$ – толщина изоляции между медью и соответствующей поверхностью катушки, соприкасающейся с воздухом или сталью станины, сердечника и наконечника полюса;

$$\delta'_3 = \frac{m'}{4} \cdot \frac{d_{ви}}{k_{c0}}, \quad \delta''_3 = \frac{m''}{4} \cdot \frac{d_{ви}}{k_{c0}} \quad (2.136)$$

– эквивалентные толщины междувитковой изоляции по ширине и высоте катушки:

$$m' \approx \frac{\delta_k}{d_{ви}}; \quad m'' \approx \frac{h_k}{d_{ви}} \quad (2.137)$$

– число витков в слое по ширине и высоте катушки; k_{c0} – см. п. 2.13.3; $d_{\text{ви}}$ – диаметр изолированного провода обмотки возбуждения.

2.13.7. Превышение температуры обмотки возбуждения

Среднее превышение температуры обмотки возбуждения электродвигателя над окружающей средой находят по формуле.

$$\theta_{\theta} = \frac{P_{\text{эл.2}}}{2p} R_{\theta}, \text{ } ^{\circ}\text{C}. \quad (2.138)$$

При определении температуры обмотки возбуждения электродвигателя с шихтованной станиной поверхности охлаждения катушки полюса рассчитываются по следующим приближенным формулам [6]:

$$\begin{aligned} S_1 &\approx (b_{\delta} + b_m + 2l_m + 8\delta_k)h_k; \\ S_2 &\approx (b_{\delta} + b_m + 4l_m + 4\delta_k)\delta_k; \\ S_3 &\approx (b_{\delta} + b_m + 4\delta_k)\delta_k; \\ S_4 &\approx (b_{\delta} + b_m + 4\delta_k)h_k, \end{aligned} \quad (2.139)$$

где b_{δ} – расчётная полюсная дуга.

Из-за неплотного прилегания катушки к сердечнику полюса коэффициент теплопроводности от меди к стали сердечника λ_4 через поверхность S_4 будет значительно меньше чем другие: $\lambda_4 = 0,0002 \dots 0,0003$ Вт/см·град. Величина $\delta_{\text{и4}}$ в данном случае должна включать в себя так же зазор между катушкой и сердечником полюса.

2.13.8. Превышение температуры коллектора

Полные потери на коллекторе

$$P_k = P_{\text{щк}} + P_{\text{тщ}}, \text{ Вт}; \quad (2.140)$$

где $P_{\text{щк}}$ – электрические потери в переходном контакте щеток; $P_{\text{тщ}}$ – потери на трение щёток о коллектор.

Поверхность охлаждения коллектора

$$S_k = \pi D_k l_k, \text{ см}^2. \quad (2.141)$$

Здесь D_k – диаметр коллектора, см; l_k – длина коллектора, см.

Среднее превышение температуры коллектора над температурой окружающей среды

$$\theta_k = \frac{P_k}{\alpha_k (1 + 0,1\nu_k) S_k}, \text{ } ^{\circ}\text{C}. \quad (2.142)$$

здесь α_k – коэффициент теплоотдачи коллектора, равный $0,004 \dots 0,008$ Вт/см²·град; ν_k – окружная скорость коллектора, м/с.

Глава 3

Расчет универсальных коллекторных микродвигателей

3.1. Общие сведения

Универсальный коллекторный двигатель (УКД) представляет собой двигатель, предназначенный для работы, как от сети переменного тока, так и от сети постоянного тока. Эти двигатели нашли широкое применение в системах автоматики и бытовой техники, где выполняют в основном силовые функции. В связи с этим они должны обладать достаточно высокими энергетическими показателями – КПД, $\cos\varphi$ и в целом удовлетворять общим техническим требованиям, содержащимся в ГОСТ 183–74.

Принципиально УКД могут иметь параллельное или последовательное возбуждение. Однако, как правило, они выпускаются с последовательным возбуждением и имеют две последовательно соединенные обмотки возбуждения. Одна из обмоток, с меньшим числом витков, предназначена для работы двигателя от сети переменного тока, а другая включается дополнительно при работе его от сети постоянного тока. Наличие во втором случае дополнительной обмотки связано с необходимостью обеспечения при номинальной мощности той же частоты вращения, что и при работе от сети переменного тока [2].

Вся магнитная система универсального коллекторного двигателя выполняется шихтованной, набираемой из листовой электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм.

3.2. Определение основных размеров

В работе [6] при определении расчетной мощности УКД потери в обмотках и щеточном контакте при работе его от сети переменного тока рекомендуется принимать равным в среднем около одной трети общих потерь. Однако, несмотря на увеличение магнитных потерь, в данном случае вследствие увеличения тока якоря увеличиваются потери в обмотках. Как показывают расчеты, эти потери можно принять равными примерно половине общих потерь.

При указанном допущении расчетную мощность УКД можно определить по следующей формуле

$$P_a = \frac{1+\eta}{2\eta} P_2, \text{ Вт}, \quad (3.1)$$

где P_2 – номинальная полезная мощность;

η – КПД двигателя, выбираемый по кривым рис 3.1.

Наружный диаметр D_a и расчетная длина l_s якоря определяются из выражения машинной постоянной

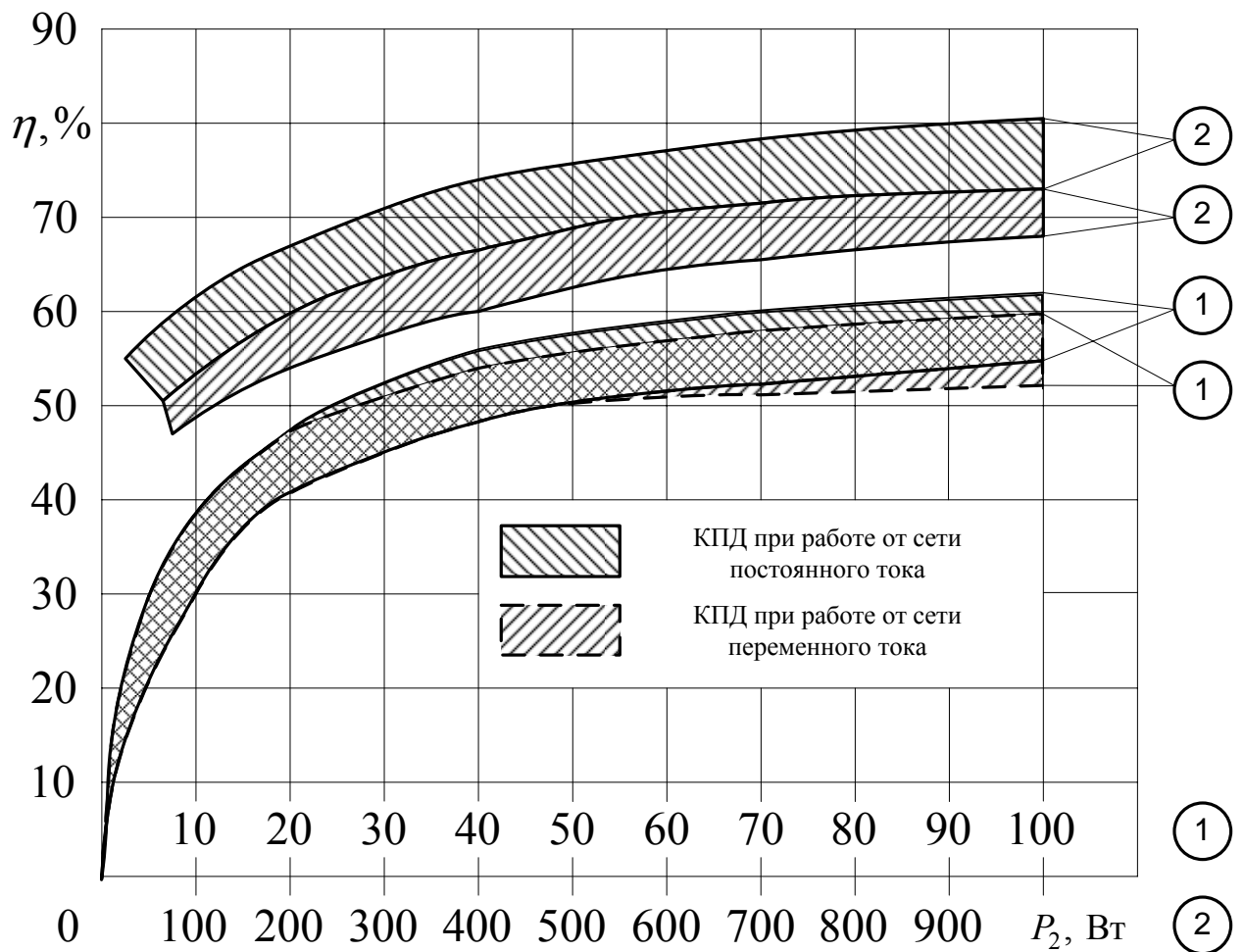


Рис. 3.1. Зависимость КПД от полезной мощности на валу

$$C = \frac{D_a^2 l_\delta n}{P_a} = \frac{D_a^3 \lambda n}{P_a} = \frac{6,1\sqrt{2}}{\alpha_\delta B_\delta A}, \frac{\text{м}^3 \text{об/мин}}{\text{Вт}}. \quad (3.2)$$

Здесь $\lambda = l_\delta / D = 0,4 \dots 1,6$ – относительная длина пакета якоря; n – частота вращения якоря, об/мин; $\alpha_\delta = 0,60 \dots 0,70$ – коэффициент расчетной полюсной дуги; B_δ и A – соответственно амплитудное значение индукции в воздушном зазоре предварительно выбираемые по рис. 2.2 и рис. 2.3.

Непосредственно из выражения (3.2) будем иметь:

$$D_a = \sqrt{\frac{CP_a}{\lambda n}}, \text{ м}; \quad l_\delta = \lambda D_a, \text{ м}. \quad (3.3)$$

Длина воздушного зазора под полюсом

$$\delta = 0,4 \frac{\tau A}{B_\delta} \cdot 10^{-6}, \text{ м}, \quad (3.4)$$

где $\tau = \frac{\pi D_a}{2p}$ – полюсное деление, м. Обычно $\delta = 0,0003 \dots 0,0008$ м.

Диаметр расточки полюсов

$$D_n = D_a + 2\delta, \text{ м.} \quad (3.5)$$

Расчетная полюсная дуга

$$b_\delta = \alpha_\delta \tau, \text{ м.} \quad (3.6)$$

Действительная полюсная дуга

$$b \approx (1,02 \dots 1,3) b_\delta, \text{ м.}$$

3.3. Предварительные значения тока и ЭДС якоря при нагрузке

Ток якоря

$$I_a = \frac{P_2}{\eta U_{np} \cos \varphi}, \text{ А.} \quad (3.7)$$

ЭДС якоря

$$E_a = \frac{P_a}{I_a} = \frac{1 + \eta}{2} U_{np} \cos \varphi, \text{ В,} \quad (3.8)$$

где U_{np} – номинальное напряжение при работе от сети переменного тока;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности универсального коллекторного двигателя при номинальной нагрузке, предварительно выбираемый по кривым рис. 3.2 в зависимости от коэффициента трансформации между обмотками возбуждения и якоря k , числа полюсов $2p$ и отношения частоты сети переменного тока f_1 , к частоте перемagnичивания стали якоря $f = \frac{pn}{60}$, т. е. отношения f_1 / f [1]; n – частота вращения, об/мин.

Как следует из кривых рис. 3.2, с точки зрения получения высокого $\cos \varphi$ целесообразно выбирать значения коэффициента трансформации k в пределах:

$$0,10 \dots 0,25 \text{ для } 2p=2;$$

$$0,05 \dots 0,10 \text{ для } 2p=4.$$

Попутно отметим, что УКД мощностью до 150...200 Вт обычно выполняются двухполюсными, а свыше этих мощностей – четырехполюсными. Однако возможны исключения из этого правила.

3.4. Якорь двигателя

Число проводников обмотки якоря

$$N = \frac{60a\sqrt{2}E_a}{pn\Phi_\delta}, \quad (3.9)$$

где p – число пар полюсов,

Φ_δ – магнитный поток в воздушном зазоре, Вб.

$$\Phi_\delta = B_\delta b_\delta l_\delta, \text{ Вб.} \quad (3.10)$$

Число коллекторных пластин $K = (2 \dots 3)Z$.

$$(3.11)$$

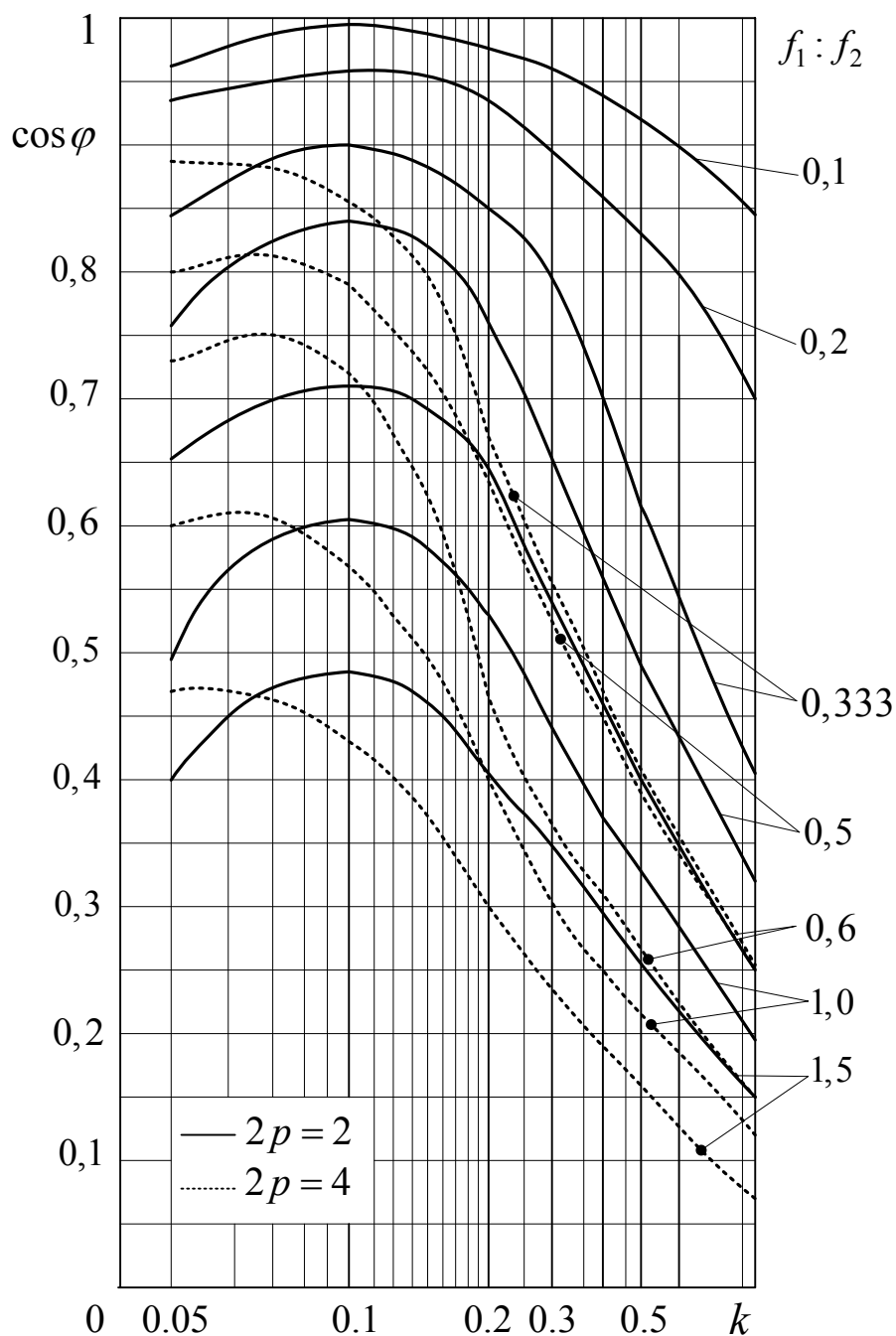


Рис.3.2. Кривые $\cos \varphi = f(k)$ универсального коллекторного двигателя

Здесь Z – число пазов якоря, определяемое по формуле (2.19).
 Наименьшее число коллекторных пластин из условия

$$K = \pi \left(\frac{f_1}{f} \right) \frac{E_a}{e_t},$$

с округляем до ближайшего целого числа, кратного числу пазов якоря. Здесь e_t – трансформаторная ЭДС в коммутируемых секциях обмотки якоря, которая по условиям благоприятной коммутации должна составлять

$$e_t \leq 6 \dots 8 \text{ В}$$

После определения числа витков в секции обмотки якоря по выражению (2.21) уточняют число проводников обмотки и окончательно рассчитывают линейную нагрузку A согласно (2.22). После сравнения A с первоначально принятым ее значением определяют шаги обмотки якоря и вычерчивают ее схему.

Геометрия пазово-зубцовой зоны и размеры проводников обмотки якоря определяются по формулам главы 2, (2.23,...,2.45).

Конструкция коллектора и щеточного аппарата и их расчет для УКД выполняются так же, как и для микродвигателей постоянного тока с использованием формул (2.48,...,2.56). При этом ширина щетки по окружности коллектора обычно принимается

$$b_{щ} = (1...1,5)b_k. \quad (3.12)$$

Проверка коммутации осуществляется по формулам (2.57,...,2.60). Кроме того, определяется трансформаторная ЭДС, индуцируемая в коммутируемой секции вследствие пульсации потока полюсов при работе двигателя от сети переменного тока.

$$e_t = \sqrt{2}\pi f_1 W_{ca} \Phi_\delta, \text{ В.} \quad (3.13)$$

3.5. Магнитопровод универсального коллекторного двигателя

Магнитопровод УКД выполняется шихтованным. Он включает в себя пакет якоря и станину с полюсами и набирается из листов электротехнической стали.

Расчет магнитопровода производится по тем же формулам, что и для микродвигателя постоянного тока, (2.61,...,2.77). В этих формулах используются первоначальные принятые значения ЭДС и потока – E_a и Φ_δ . При этом полная МДС при холостом ходе не содержит составляющую F_{jm} . Расчет и построение характеристики холостого хода $E_a = f(F_\delta)$ осуществляется по общепринятой методике [6]. Что касается полной МДС при нагрузке, то ее величина определяется с учетом реакции якоря, так же, как и в машинах постоянного тока с использованием формул (2.78,...,2.83).

3.6. Расчет обмотки возбуждения переменного тока

При работе универсального коллекторного двигателя от сети переменного тока в нем возникают два пульсирующих потока с амплитудами $\Phi_{mb} = \Phi_\delta$ и Φ_{mq} (рис. 3.3). Эти потоки наводят в обмотках возбуждения и якоря ЭДС самоиндукции, эффективные значения которых соответственно равны:

$$E_b = \sqrt{2}\pi f W'_b \Phi_\delta, \text{ В;} \quad (3.14)$$

$$E_q = \sqrt{2}\pi f W_a \alpha_\delta \Phi_{mq}, \text{ В.} \quad (3.15)$$

Определение E_b при известном числе витков обмотки возбуждения, которое будет определено ниже, не встречает затруднений. Что касается расчета E_q , то при ее определении следует учитывать ряд особенностей. Дело в том, что

согласно допущению, принятому в работе [1], поперечная МДС якоря создается витками в пределах полюсной дуги, т.е.

$$W_{aq} = W_a \alpha_\delta = \frac{N}{4a} \alpha_\delta, \text{ В}, \quad (3.16)$$

где a – число пар параллельных ветвей.

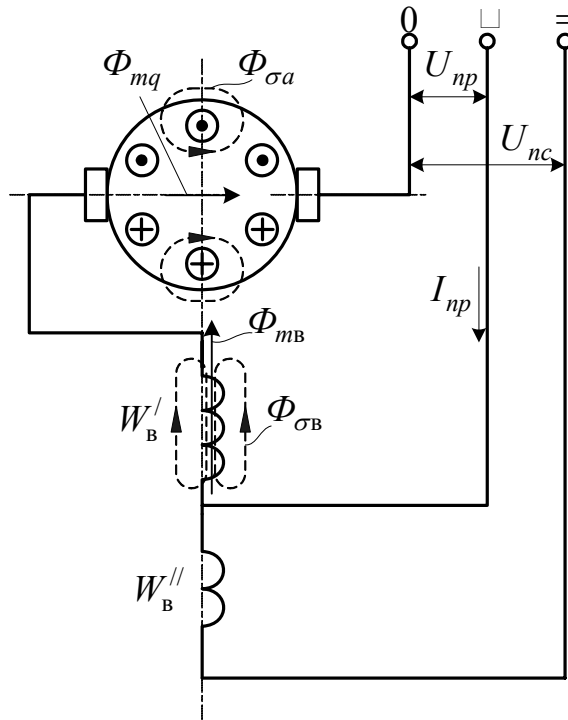


Рис. 3.3. Принципиальная схема УКД

При этом поперечная МДС

$$F_{aq} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{N}{4a} \frac{\alpha_\delta}{p} I_a, \text{ А}. \quad (3.17)$$

Магнитная индукция поперечного поля

$$B_{aq} = \frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu q}} \frac{\sqrt{2}}{4a} \frac{\alpha_\delta}{p} I_a, \text{ Тл}, \quad (3.18)$$

где k_δ – коэффициент воздушного зазора (см. формулу 2.74)

$k_{\mu q}$ – коэффициент насыщения поперечной оси $k_{\mu q} \approx 1$.

Поперечный поток

$$\Phi_{mq} = \frac{\mu_0 \tau \alpha_\delta l_\delta}{k_\delta k_{\mu q} \delta} \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2} \frac{N \alpha_\delta}{4ap} I_a, \text{ Вб}, \quad (3.19)$$

причем

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}.$$

После подстановки Φ_{mq} в выражение (3.15) и соответствующих преобразований будем иметь

$$E_q = 0,15 \cdot f_1 \cdot \frac{\alpha_\delta^3 N^2 D_a l_\delta}{k_\delta \delta a^2 p^2} \cdot I_a \cdot 10^{-6}, \text{ В.} \quad (3.20)$$

Аналогичное выражение можно получить, если воспользоваться теорией синхронных машин, приняв $\alpha_\delta = \frac{2}{\pi}$ и $k_{aq} = 0,61$ [15].

Число витков обмотки возбуждения на полюс

$$W'_B = \frac{N}{2a} k \quad (3.21)$$

Сечение провода обмотки возбуждения

$$q'_B = \frac{I_a}{j'_B}, \text{ мм}^2, \quad (3.22)$$

где предварительное значение плотности тока j'_B в машинах длительного режима с естественным охлаждением (закрытое исполнение) принимается в пределах $j'_B = 3 \dots 5 \text{ А/мм}^2$; с самовентиляцией – $j'_B = 5 \dots 8 \text{ А/мм}^2$; с продувом – $j'_B = 7 \dots 12 \text{ А/мм}^2$; в машинах кратковременного режима указанные пределы могут быть увеличены на 30...80%.

Далее полученное сечение q'_B и соответствующие ему диаметры неизолированного d'_B и изолированного $d'_{\text{ВИ}}$ провода выбираются по стандарту с соответствующим округлением $q'_B, d'_B, d'_{\text{ВИ}}$ (Приложение 2).

Окончательная плотность тока в обмотке возбуждения

$$j'_B = \frac{I_a}{q'_B}, \text{ А/мм}^2. \quad (3.23)$$

Сопротивление обмотки возбуждения при 75°C

$$r'_B = 1,22 \frac{2p W'_B l_{\text{CP}}}{57 q'_B}. \text{ Ом.} \quad (3.24)$$

Здесь l_{CP} , м – средняя длина витка, определяемая по эскизу расположения обмотки на полюсе (см. формулу 2.84, а).

Требуемая площадь окна для размещения обмотки возбуждения на полюсе определяется по формуле

$$Q'_B = \frac{W'_B d'^2_{\text{ВИ}}}{f'_0}, \text{ мм}^2, \quad (3.25)$$

где $f'_0 = 0,82 \dots 0,88$ – коэффициент, учитывающий неточность намотки катушки.

Фактическая площадь окна с учетом размещения дополнительной обмотки постоянного тока

$$Q_B = (1,3 \dots 1,6) Q'_B. \quad (3.26)$$

МДС обмотки возбуждения на пару полюсов при нагрузке

$$F'_B = 2\sqrt{2}W'_B I_a, \text{ (A)}. \quad (3.27)$$

Если эта МДС не равна полной МДС при нагрузке, полученной при расчете магнитопровода УКД (см. поз. 3.5), то следует несколько изменить величину воздушного зазора и соответственно коэффициента k_δ , чтобы добиться необходимого равенства.

3.7. Векторная диаграмма и коэффициент мощности УКД

Векторная диаграмма УКД (рис.3.4) при работе от сети переменного тока построена в соответствии с уравнением

$$U_{np} \& = -E_B \& - E_q \& - E_{вр} \& + I_{np} \& (r_a + r'_e) + jI_{np} \& (x_{\sigma a} + x_{\sigma e}), \text{ В} \quad (3.28)$$

или

$$\begin{aligned} U_{np} \& &= -E_B \& - E_q \& - E_{вр} \& + I_a \& (r_a + r'_e) + jI_a \& (x_{\sigma a} + x_{\sigma e}) = \\ &= -E_B \& - E_q \& - E_{вр} \& + \Delta U_a \& + \Delta U_\sigma \&, \text{ В}. \end{aligned} \quad (3.29)$$

где $E_B \&$ и $E_q \&$ – ЭДС самоиндукции обмоток возбуждения и якоря;

$E_a \& = E_{вр} \&$ – ЭДС вращения, В;

$\Delta U_a \& = I_a \& (r_a + r'_e)$ – активное падение напряжения, В;

$\Delta U_\sigma \& = I_a \& (x_{\sigma a} + x_{\sigma e})$ – индуктивное падение напряжения, В.

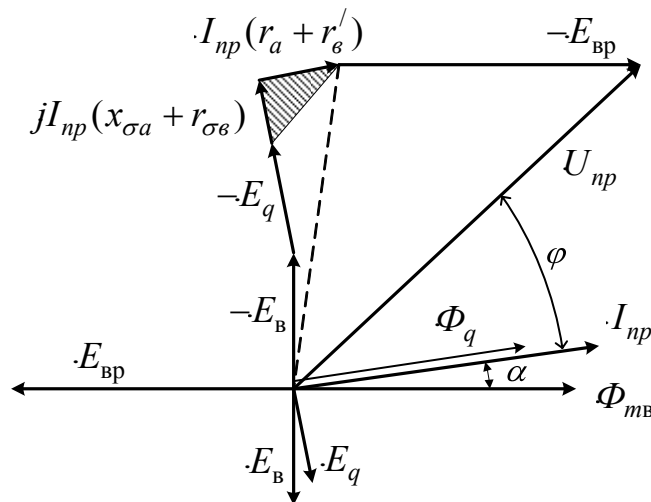


Рис. 3.4. Векторная диаграмма УКД

При этом индуктивные падения напряжения рассеяния в обмотках якоря и возбуждения определяются по следующим приближенным формулам

$$I_a x_{\delta a} = \frac{\pi f_1 N_2^2 \xi l_\delta}{2a^2 Z}, \text{ В}; \quad (3.30)$$

$$I_a x_{\sigma\delta} = \sqrt{2} \pi f_1 2p W'_6 \gamma_\sigma (k_\sigma - 1) \Phi_\delta, \text{ В}, \quad (3.31)$$

где ξ – удельная магнитная проводимость обмотки якоря, определяемая по формуле (2.59), Гн/м.

$\gamma_\sigma = 0,75 \dots 0,85$ – коэффициент сцепления поля рассеяния с обмоткой возбуждения;

k_σ – коэффициент магнитного рассеяния (см. формулу 2.65).

Активная составляющая напряжения

$$U_a \approx E_a + \Delta U_a + \Delta U_{\text{щ}}, \text{ В}, \quad (3.32)$$

где $\Delta U_{\text{щ}}$ – падение напряжения в щеточном контакте на пару разноименных щеток.

Индуктивная составляющая напряжения

$$U_\sigma \approx E_b + E_q + \Delta U'_\sigma, \text{ В}. \quad (3.33)$$

Напряжение на жимах двигателя

$$U_{np} = \sqrt{U_a^2 + U_\sigma^2}, \text{ В}. \quad (3.34)$$

Коэффициент мощности двигателя при нагрузке

$$\cos \varphi = U_a / U_{np} \quad (3.35)$$

3.8. Расчет дополнительной обмотки возбуждения постоянного тока

Ток и ЭДС якоря УКД при работе от сети постоянного тока

$$I'_a = \frac{P_2}{\eta' U_{nc}}, \text{ А}; E'_a = \frac{1 + \eta'}{2} U_{nc}, \text{ В}, \quad (3.36)$$

где P_2 и U_{nc} берутся по заданию, а η' – по кривой рис. 3.1.

Поток воздушного зазора

$$\Phi'_\delta = \frac{60 a E'_a}{p n N}, \text{ Вб}. \quad (3.37)$$

Полная МДС возбуждения F''_6 рассчитывается по тем же формулам, что и для двигателя постоянного тока. При этом индукции каждого участка магнитной системы должны быть изменены в отношении $\Phi'_\delta / \Phi_\delta$, т.е.

$$B'_\delta = B_\delta \frac{\Phi'_\delta}{\Phi_\delta}, \text{ Тл}, \quad (3.38)$$

где поток Φ_δ и индукция B_δ выбираются согласно поз. 2.1.

Общее число витков обмотки возбуждения на полюсе при работе от сети постоянного тока

$$W_B = \frac{F''_B}{2 I'_a}. \quad (3.39)$$

Число витков дополнительной обмотки возбуждения, приходящихся на один полюс

$$W_B^{//} = W_B - W_B' \quad (3.40)$$

Сечение и диаметр провода дополнительной обмотки возбуждения

$$q_B^{//} = \frac{I_a'}{j_B^{//}}, \text{ мм}^2. \quad (3.41)$$

Здесь $j_B^{//}$ – предварительное значение плотности тока (см. формулу для q_B' (3.22) и пояснения к ней).

Окончательное значение $q_B^{//}$ и соответствующие ему диаметры $d_B^{//}$, d_b'' и $d_{\text{ВИ}}^{//}$ выбираются по стандарту с надлежащим округлением (приложение 2).

Окончательная плотность тока в дополнительной обмотке возбуждения

$$j_B^{//} = \frac{I_a'}{q_B^{//}}, \text{ А/мм}^2. \quad (3.42)$$

Сопротивление дополнительной обмотки возбуждения при 75 °С

$$r_B^{//} = 1,22 \frac{2pW_B^{//}l_{\text{ср}}^{//}}{57q_B^{//}}, \text{ Ом}, \quad (3.43)$$

где $l_{\text{ср}}^{//}$ – средняя длина витка обмотки, м.

Падение напряжения в обеих обмотках возбуждения при работе двигателя от сети постоянного тока

$$\Delta U_e = I_a'(r_e' + r_e^{//}), \text{ В}. \quad (3.44)$$

Проверка величины ЭДС якоря при работе двигателя от сети постоянного тока

$$E_a' = U_{\text{нс}} - \Delta U_e - \Delta U_{\text{ш}} - \frac{I_a'}{I_a} \Delta U_a, \text{ В}. \quad (3.45)$$

$$\Delta U_a = I_a r_a$$

Отличие E_a' от первоначально принятого значения не должно превышать $\pm 3\%$.
Потребная площадь окна для размещения дополнительной обмотки возбуждения

$$Q_B^{//} = \frac{W_B^{//} d_{\text{ВИ}}^{//2}}{f_0^{//}}, \text{ мм}^2; \quad (3.46)$$

$$f_0^{//} = 0,82 \dots 0,88.$$

3.9. Потери и коэффициент полезного действия универсального коллекторного двигателя

Магнитные потери на гистерезис и вихревые токи.

Потери в стали станины

$$p_j = p_{cj} B_j^2 G_j, \text{ Вт}. \quad (3.47)$$

Потери в стали полюсов

$$p_m = p_{cm} B_m^2 G_m, \text{ Вт.} \quad (3.48)$$

Потери в стали зубцов

$$p_z = p_{cz} B_z^2 G_z, \text{ Вт.} \quad (3.49)$$

Потери в стали спинки якоря

$$p_a = p_{ca} B_a^2 G_a, \text{ Вт.} \quad (3.50)$$

Масса станины

$$G_j \approx 22 \cdot 10^3 (D_n + 2h_m + h_j) h_j l_\delta k_c, \text{ кг.}$$

Масса полюсов

$$G_m \approx 7800 \cdot 2 p Q_m h_m k_c, \text{ кг.}$$

Масса спинки якоря

$$G_a \approx 1950 \pi \left[(D_a - 2h_z)^2 - d_\delta^2 \right] k_c, \text{ кг.}$$

Масса зубцов якоря

$$G_z \approx 7800 Z b_z h_z l_\delta k_c, \text{ кг.}$$

Здесь линейные размеры в метрах.

Полные магнитные потери УКД при работе его от сети переменного тока

$$p_{\text{мг}} = p_j + p_m + p_z + p_a, \text{ Вт.} \quad (3.51)$$

Удельные потери в стали марки 1212 при толщине листов 0,5 мм

$$p_{cm} = p_{cj} = 2\varepsilon \left(\frac{f_1}{100} \right) + 2,5\rho \left(\frac{f_1}{100} \right)^2, \text{ Вт/кг;} \quad (3.52)$$

$$p_{ca} = 2\varepsilon \left(\frac{f_2}{100} \right) + 2,5\rho \left(\frac{f_2}{100} \right)^2, \text{ Вт/кг;} \quad (3.53)$$

$$p_{cz} = 1,5\varepsilon \left(\frac{f_2}{100} \right) + 3\rho \left(\frac{f_2}{100} \right)^2, \text{ Вт/кг,} \quad (3.54)$$

где f_1 – частота сети, Гц; $f_2 = pn/60$, Гц.

При работе двигателя от сети постоянного тока магнитные потери присутствуют лишь в спинке и зубцах якоря при другом значении поля. Что касается механических потерь, то они рассчитываются для УКД, так же как и в случае двигателя постоянного тока (см. формулу 2.109).

КПД универсального коллекторного двигателя соответственно при работе от сети переменного тока и от сети постоянного тока:

$$\eta = \frac{U_{np} I_a \cos \varphi - \Sigma p}{U_{np} I_a \cos \varphi} \cdot 100, \%; \quad (3.55)$$

$$\eta' = \frac{U_{nc} I'_a - \Sigma p'}{U_{nc} I'_a} \cdot 100, \%. \quad (3.56)$$

Здесь Σp и $\Sigma p'$ определяются согласно (2.110).

Глава 4

Примеры расчета электродвигателей постоянного тока

4.1. Расчет электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения

1. Задание

Полезная мощность на валу $P_2 = 10$ Вт; напряжение на зажимах $U = 12$ В; частота вращения вала двигателя $n = 6\ 000$ об/мин; способ возбуждения – параллельный; режим работы – продолжительный (S1); исполнение – закрытое.

2. Основные размеры

Расчётная мощность

$$P_a = \frac{1+2\eta}{3\eta} P_2 = \frac{1+2\cdot 0,38}{3\cdot 0,38} 10 = 15,44 \text{ Вт},$$

где согласно кривой на рис. 2.1 $P_2 = 10$ Вт; $\eta \approx 0,38$.

Потребляемый из сети ток

$$I = \frac{P_2}{\eta U} = \frac{10}{0,38 \cdot 12} = 2,19 \text{ А}.$$

Ток якоря

$$I_a = I - I_b = 2,19 - 0,39 = 1,8 \text{ А},$$

где $I_b = k_b I = (0,1 \dots 0,2) I = 0,18 \cdot 2,19 \approx 0,39$ А – ток возбуждения.

ЭДС якоря

$$E_a = \frac{P_a}{I_a} = \frac{15,44}{1,8} \approx 8,58 \text{ В}.$$

Машинная постоянная

$$C = \frac{6,1}{\alpha_\delta B \delta A} = \frac{6,1}{0,65 \cdot 0,26 \cdot 5000} \approx 7,22 \cdot 10^{-3},$$

здесь принято $\alpha = 0,65$ и согласно кривым (см. рис. 2.2.) $\frac{P_2}{n} = 1,67 \cdot 10^{-3}$:

$B_\delta = 0,26$ Тл; $A = 5\ 000$ А/м.

Наружный диаметр и расчётная длина пакета якоря

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{C P_a}{\lambda n}} = \sqrt[3]{\frac{6,7 \cdot 10^{-3} \cdot 15,44}{1,3 \cdot 6000}} \approx 0,0243 \text{ м};$$

$l_\delta = \lambda D_a = 1,3 \cdot 0,0243 = 0,0315$ м, где $\lambda = 1,3$.

Окончательно значения D_a и l_δ и округляются до ближайших стандартных чисел (Приложение 1):

$$D_a = 0,025 \text{ м и } l_\delta = 0,032 \text{ м.}$$

$$\text{Воздушный зазор: } \delta = 0,25 \frac{\pi D_a A}{2pB_\delta} \cdot 10^{-6} \approx 0,00019 \text{ м} = 0,2 \text{ мм}$$

Внутренний диаметр полюсов

$$D_n = D_a + 2\delta = 0,025 + 2 \cdot 0,0002 = 0,0254 \text{ м.}$$

Материал пакета якоря – листовая электротехническая сталь марки 1212 (Приложение 4).

Полюсное деление и расчётная полюсная дуга

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,025}{2} \approx 0,039 \text{ м;}$$

$$b_\delta = \alpha \tau = 0,65 \cdot 0,039 \approx 0,0255 \text{ м,}$$

где $2p = 2$.

Частота перемагничивания якоря

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{1 \cdot 6000}{60} = 100 \text{ Гц.}$$

3. Обмотка якоря

Полезный магнитный поток в воздушном зазоре при нагрузке двигателя

$$\Phi_\delta = B_\delta b_\delta l_\delta = 0,28 \cdot 0,0255 \cdot 0,032 = 2,124 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Число проводников обмотки якоря (предварительно)

$$N = \frac{60aE_a}{pn\Phi_\delta} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 8,58}{1 \cdot 6000 \cdot 2,124 \cdot 10^{-4}} \approx 404,$$

где a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря, $a = 1$.

Число пазов якоря

$$z = (3 \dots 4) D_a \cdot 10^2 = (3 \dots 4) \cdot 2,5 = 9.$$

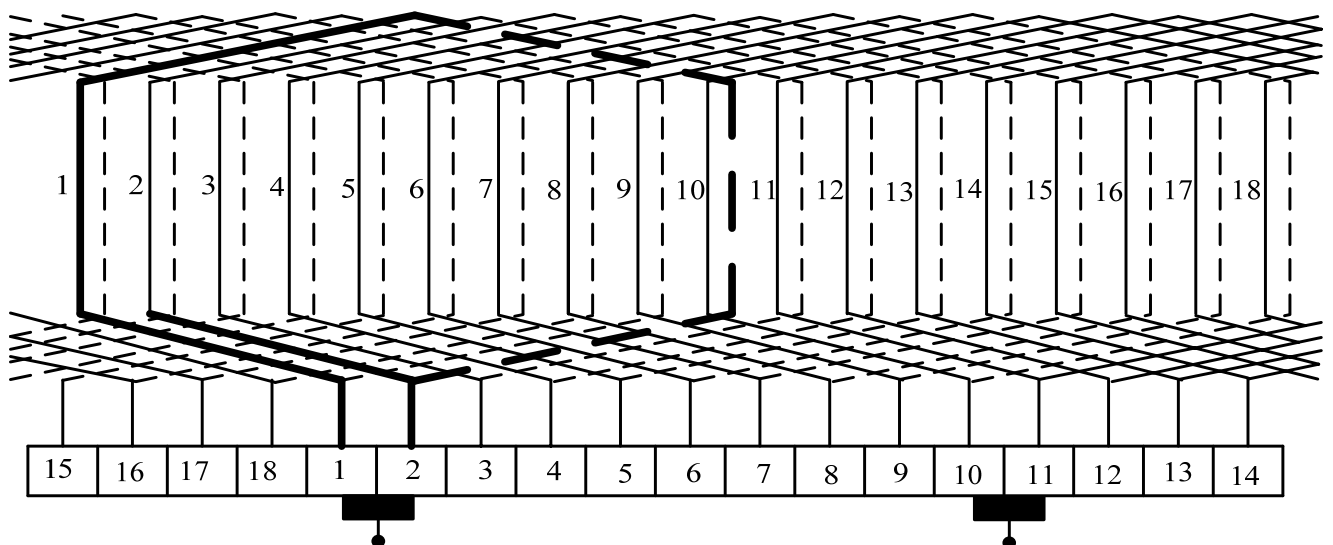


Рис. 4.1. Схема якорной обмотки

Число коллекторных пластин

$$K = 2Z = 2 \cdot 9 = 18.$$

Число витков в секции обмотки якоря

$$W_c = \frac{N}{2K} = \frac{404}{2 \cdot 18} = 11,23 \approx 12.$$

Окончательное число проводников обмотки якоря

$$N = 2KW_c = 2 \cdot 18 \cdot 12 = 432.$$

Число проводников обмотки якоря в пазу

$$N_{\text{п}} = \frac{N}{Z} = \frac{432}{9} = 48.$$

Уточнение линейной нагрузки

$$A = \frac{NI_a}{2\pi D_a} = \frac{432 \cdot 1,8}{2\pi \cdot 0,025} \approx 4945,5 \text{ А/м.}$$

Отклонение от первоначально принятого значения составляет $1,0\% < 10\%$.

Шаги обмотки якоря по секциям и коллектору

$$y_1 = \frac{K}{2p} - \varepsilon = \frac{18}{2} - 0 = 9;$$

$$y_2 = y_1 - 1 = 9 - 1 = 8; y = 1; y_k = 1.$$

4. Пазово-зубцовая зона

Окружная скорость вращения якоря

$$v_a = \frac{\pi D_a n}{60} = \frac{\pi 0,025 \cdot 6000}{60} = 7,85 \text{ м/с.}$$

Удельная тепловая нагрузка

$$q = \alpha \theta_m = \alpha' \theta_m (1 + 0,1v_a) \approx 0,12(1 + 0,1 \cdot 7,85) = 0,241 \text{ Вт/см}^2.$$

Здесь $\theta_m = 90^\circ \text{C}$ – допускаемое превышение температуры обмотки якоря.

Допустимая плотность тока в обмотке якоря

$$j_a = \frac{Hq}{A} = \frac{14 \cdot 10^4 \cdot 0,241}{4945,5} \approx 6,8 \text{ А/мм}^2$$

где H – коэффициент, зависящий от частоты вращения.

Сечение и диаметр обмотки якоря (предварительно)

$$q_a = \frac{I_a}{2j_a} = \frac{1,8}{2 \cdot 6,8} \approx 0,1318 \text{ мм}^2.$$

Сечение q_a и соответствующие ему диаметры голого (d_a) и изолированного ($d_{\text{ан}}$) провода выбираются по соответствующему стандарту (Приложение 2):

$q_a = 0,1419 \text{ мм}^2$; $d_{\text{ан}} = 0,48 \text{ мм}$; $d_a = 0,425 \text{ мм}$. Провод ПЭВ-2.

Уточнение плотности тока в обмотке якоря

$$j_a = \frac{I_a}{2q_a} = \frac{1,8}{2 \cdot 0,1419} \approx 6,34 \text{ А/мм}^2.$$

Площадь сечения паза якоря:

а) площадь паза, занимаемая изолированными проводниками

$$Q_{п.п} = \frac{N_{п} d_{аи}^2}{f_0} = \frac{48 \cdot 0,48^2}{0,72} \approx 15,36 \text{ мм}^2,$$

где f_0 – технологический коэффициент, учитывающий неточность и неплотность укладки проводников в пазу, $f_0 = 0,72 \dots 0,74$,

б) площадь паза, занимаемая пазовой изоляцией

$$Q_{п.и} = \delta_{и} \Pi = 0,15 \cdot 17,5 \approx 2,62 \text{ мм}^2.$$

Здесь $\delta_{и} = 0,15$ мм – толщина пазовой изоляции; Π – периметр паза,

$$\Pi \approx 0,7 D_{а} = 0,7 \cdot 25 = 17,5 \text{ мм},$$

в) площадь паза, занимаемая клином

$$Q_{п.к} = b_{к} l_{к} = 4 \cdot 0,8 = 3,2 \text{ мм}^2,$$

где принято $b_{к} = 4$ мм; $l_{к} = 0,8$ мм,

г) полная требуемая площадь сечения паза якоря

$$Q_{п} = Q_{п.п} + Q_{п.и} + Q_{п.к} = 15,36 + 3,2 + 2,62 = 21,185 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент заполнения паза изолированным проводом

$$k_{п.и} = \frac{N_{п} q_{аи}}{Q_{п}} = \frac{44 \cdot 0,181}{21,185} \approx 0,41, \text{ что допустимо.}$$

При этом

$$q_{аи} = \frac{\pi d_{аи}^2}{4} = \frac{\pi 0,48^2}{4} \approx 0,181 \text{ мм}^2.$$

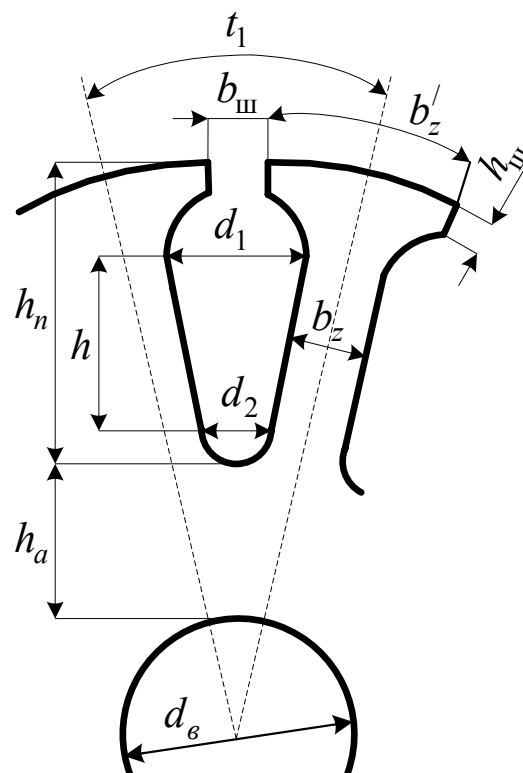


Рис. 3.2. Масштабный эскиз паза

Выбираем грушевидную форму паза с шириной зубца b_z , одинаковой по высоте паза, причём

$$b_z = \frac{B_\delta t_1}{k_c B_z} = \frac{0,26 \cdot 8,72}{0,93 \cdot 1,4} \approx 1,74 \text{ мм},$$

где t_1 – зубцовое деление якоря,

$$t_1 = \frac{\pi D_a}{Z} = \frac{\pi \cdot 0,025}{9} \cdot 10^3 \approx 8,72 \text{ мм};$$

k_c – коэффициент заполнения паза якоря сталью, $k_c = 0,93$;

B_z – индукция в зубце, $B_z = 1,4$ Тл.

Для определения геометрии пазово-зубцовой зоны использован графический метод, предусматривающий построение масштабного эскиза паза с учётом полученных выше значений $Q_{\text{п}}$, B_z , t_1 и высоты паза $h_{\text{п}} = (0,25 \dots 0,35) D_a$.

Высота шлица паза

$$h_{\text{ш}} = (0,2 \dots 0,8) \text{ мм} = 0,5 \text{ мм}.$$

Ширина шлица паза

$$b_{\text{ш}} = d_{\text{ан}} + 2\delta_{\text{и}} + 0,2 = 0,46 + 2 \cdot 0,15 + 0,2 \approx 1,0 \text{ мм}.$$

Уточнённое значение высоты и размеров паза (из масштабного эскиза)

$$h_{\text{п}} = 8,2 \text{ мм}, d_1 = 4,5 \text{ мм}, d_2 = 1,0 \text{ мм}, h_1 = 5 \text{ мм}.$$

Высота спинки якоря

$$h_a = \frac{D_a \cdot 10^3 - 2h_{\text{п}} - d_g}{2} = \frac{0,025 \cdot 10^3 - 13,6 - 8,2}{2} = 2,3 \text{ мм},$$

где d_g – диаметр вала, $d_g = (0,16 \dots 0,25) D_a \cdot 10^3 = 0,16 D_a \cdot 10^3 \approx 4 \text{ мм}$.

Индукция в спинке якоря

$$B_a = \frac{\Phi_\delta}{2k_c h_a l_\delta} = \frac{2,24 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,93 \cdot 0,0023 \cdot 0,032} \approx 1,55 \text{ Тл},$$

что находится в установленных пределах, $B_a = 1,3 \dots 1,6$ Тл.

Ширина зубца у его вершины

$$b'_z = t_1 - b_{\text{ш}} = 8,72 - 1 = 7,72 \text{ мм}.$$

Непосредственно из масштабного эскиза паза определяются $b''_{\text{п}}$ и $b''_{\text{п}}$.

Средняя длина одного проводника обмотки якоря

$$l_{\text{ср.а}} = l_\delta + 1,2 D_a = 0,032 + 1,2 \cdot 0,025 = 0,062 \text{ м}.$$

Сопротивление обмотки якоря

$$r_a = k_\theta \frac{N l_{\text{ср.а}}}{228 q_a} = \frac{432 \cdot 0,062}{228 \cdot 0,1419} \approx 1,06 \text{ Ом}.$$

Падение напряжения в обмотке якоря

$$\Delta U_a = I_a r_a = 1,8 \cdot 1,06 = 1,9 \text{ В}.$$

Действительная величина ЭДС якоря с учётом падения напряжения в щёточном контакте (щётки М-1, $\Delta U_{\text{щ}} = 1,5 \text{ В}$)

$$E = U - \Delta U_a - \Delta U_{\text{щ}} = 12 - 1,9 - 1,5 \approx 8,595 \text{ В}.$$

Эта ЭДС практически совпадает с первоначально принятым значением. Следовательно, и первоначально принятые значения Φ_δ и B_δ не требуют уточнения.

5. Коллектор и щётки

Предварительное значение диаметра коллектора

$$D'_k = (0,5 \dots 0,9) D_a = 0,6 \cdot 0,025 = 0,015 \text{ м.}$$

Ширина коллекторной пластины

$$t'_k = \frac{\pi D'_k}{K} = \frac{\pi \cdot 0,015}{18} = 0,0026 \text{ м.}$$

Примем ширину коллекторной пластины $b_k = 0,002$ м и толщину изоляции между коллекторными пластинами $\beta_{\text{и}} = 0,0006$ м; тогда $t_k = 0,002 + 0,0006 = 0,0026$ м.

Окончательный диаметр якоря

$$D_k = \frac{K t_k}{\pi} = \frac{18 \cdot 0,0026}{\pi} \approx 0,015 \text{ м.}$$

Сорт щёток и плотность тока под щётками.

Принимаем щётки марки М-1 (Приложение 3, таблица 3.1)

$$j'_{\text{щ}} = 0,15 \text{ А/мм}^2; \Delta U_{\text{щ}} = 1,5 \text{ В}; \mu = 0,25; p_{\text{щ}} = (1,47 \dots 1,96) \text{ Н/см}^2.$$

Площадь сечения щётки

$$S'_{\text{щ}} = \frac{I_a}{p j'_{\text{щ}}} = \frac{1,8}{1 \cdot 15} = 0,12 \text{ см}^2 = 12 \text{ мм}^2.$$

Причём

$$b_{\text{щ}} = (1 \dots 3) b_k = 1,5 \cdot 2 = 3 \text{ мм};$$

$$a_{\text{щ}} = \frac{S'_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}}} = \frac{12}{3} = 4 \text{ мм.}$$

Окончательно

$$b_{\text{щ}} = 3,2 \text{ мм}; a_{\text{щ}} = 4 \text{ мм}; h_{\text{щ}} = 8 \text{ мм.}$$

Действительная плотность тока под щётками

$$j_{\text{щ}} = \frac{I_2}{b_{\text{щ}} a_{\text{щ}}} = \frac{1,8}{3,2 \cdot 4} = 0,14 \text{ А/мм}^2.$$

Длина коллектора

$$l'_k = (1,5 \dots 2) a_{\text{щ}} = 2 \cdot 4 = 8 \text{ мм}; l_k = l'_k + (3 \dots 5) d_a = 8 + 5 \cdot 0,425 = 10 \text{ мм.}$$

Окружная скорость коллектора

$$v_k = \frac{\pi D_k n}{60} = \frac{\pi 0,015 \cdot 6000}{60} \approx 4,71 \text{ м/с}$$

Проверка коммутации:

а) ширина зоны коммутации

$$b_{\text{зк}} = b'_{\text{щ}} + \left(U_n + \left| \frac{K}{2p} - y_1 \right| - \frac{a}{p} \right) t_k = 0,0053 + (2 - 1) \cdot 0,0043 = 0,00973 \text{ м,}$$

где

$$b'_{\text{ш}} = b_{\text{ш}} \frac{D_a}{D_k} = 0,0032 \cdot \frac{0,025}{0,015} = 0,0053 \text{ м};$$

$$t'_k = t_k \frac{D_a}{D_k} = 0,0026 \cdot \frac{0,025}{0,015} = 0,0043 \text{ м};$$

$$b_{\text{зк}} < 0,8(\tau - b_{\delta}) = 0,8(0,039 - 0,0025) = 0,0112 \text{ м}.$$

б) удельная проводимость для полей рассеяния обмотки якоря

$$\begin{aligned} \xi &= \left[0,6 \cdot \frac{h_n}{b_n} + \frac{l_a}{l_{\delta}} + 0,92 \lg \left(\frac{\pi t_1}{b_{\text{ш}}} \right) \right] = \\ &= \left[0,6 \cdot \frac{6,8 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} + \frac{3 \cdot 10^{-2}}{3,2 \cdot 10^{-2}} + 0,92 \lg \left(\frac{\pi 8,72 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} \right) \right] \approx \\ &\approx 1,02 + 0,94 + 0,92 \cdot 1,437 = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}, \end{aligned}$$

в) среднее значение реактивной ЭДС

$$e_r = 2W_c \xi l_{\delta} A v_a = 2 \cdot 12 \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,032 \cdot 4945,5 \cdot 7,85 \approx 0,0387 \text{ В}.$$

г) ЭДС в короткозамкнутой секции, индуцируемая полем якоря

$$\begin{aligned} e_a &= \frac{8\pi W_c A \tau l_{\delta} v_a \cdot 10^{-7}}{\tau - b_{\delta}} = \\ &= \frac{8\pi \cdot 12 \cdot 4945,5 \cdot 0,039 \cdot 0,032 \cdot 7,85 \cdot 10^{-7}}{0,039 - 0,025} \\ &= 0,107 \text{ В}, \end{aligned}$$

д) среднее значение результирующей ЭДС в короткозамкнутой секции якоря

$$e = e_r + e_a = 0,0387 + 0,107 = 0,15 \text{ В} < 0,5 \text{ В}$$

Коммутацию можно считать удовлетворительной.

6. Расчёт магнитной цепи и характеристики холостого хода

Высота спинки якоря.

$$h_a = 0,0023 \text{ м}.$$

Индукция в спинке якоря

$$B_a = 1,45 \text{ Тл}.$$

Осевая длина полюса

$$l_m = l_{\delta} = 0,032 \text{ м}.$$

Высота сердечника полюса

$$h_m = (0,25 \dots 0,4) D_a = 0,35 \cdot 0,025 = 0,00875 \text{ м}.$$

Поток сердечника полюса

$$\Phi_m = k_{\sigma} \Phi_{\delta} = 1,1 \cdot 2,124 \cdot 10^{-4} = 2,188 \cdot 10^{-4} \text{ Вб},$$

где k_{σ} – коэффициент магнитного рассеяния, $k_{\sigma} = 1,08 \dots 1,15$.

Поперечное сечение сердечника полюса

$$Q_m = \frac{\Phi_m}{B_m} = \frac{2,188 \cdot 10^{-4}}{1,3} = 1,68 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

где $B_m = 1,0 \dots 1,5$ Тл – индукция в сердечнике полюса.

Ширина сердечника полюса

$$b_m = \frac{Q_m}{k_c' l_m} = \frac{1,68 \cdot 10^{-4}}{1,3,2 \cdot 10^{-4}} = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

где $k_c' = 1$.

Поперечное сечение станины

$$Q_j = \frac{\Phi_m}{2B_j} = \frac{2,188 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1,3} = 1,68 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

где $B_j = 1,0 \dots 1,5$ Тл – индукция в станине.

Осевая длина станины:

а) с отъёмными полюсами

$$l_j = l_\delta + (3 \dots 5) \cdot 10^{-2} = 0,032 + 3 \cdot 10^{-2} = 0,062 \text{ м};$$

б) шихтованная

$$l_j = l_\delta = 0,032 \text{ м}.$$

Высота станины

$$h_j = \frac{Q_j}{k_c' l_j} = \frac{1,68 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 0,062} = 2,72 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Средние, значения длин путей магнитного потока определяются из масштабного эскиза:

а) в станине – $L_j = 0,0759$ м;

б) в сердечнике полюсов – $L_m = 2h_m = 2 \cdot 0,00875 = 0,0175$ м;

в) в воздушном зазоре между полюсами и якорем –

$$L_\delta = 2\delta = 2 \cdot 0,0002 = 0,0004 \text{ м};$$

г) в зубцах якоря – $L_z = 2h_z = 2 \cdot 0,0082 = 0,0164$ м;

д) в спинке якоря –

$$L_a = \frac{\pi(D_a - 2h_z - h_a)}{2p} = \frac{\pi(0,025 - 2 \cdot 0,0082 - 0,0023)}{2} = 0,01 \text{ м};$$

е) в воздушном зазоре между полюсами и станиной

$$L_{jm} = 2\delta_c = 2 \cdot 0,03 \cdot 10^{-4} = 0,06 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Коэффициент воздушного зазора

$$k_\delta = \frac{t_1 + 10\delta}{b_z' + 2\delta} = \frac{8,72 + 10 \cdot 0,2}{7,72 + 10 \cdot 0,2} = 1,1$$

Коэффициенты пропорциональности, потоки и индукции на отдельных участках цепи

$$A_1 = \frac{60a}{pnN} = \frac{60 \cdot 1}{1 \cdot 6000 \cdot 432} = 2,31 \cdot 10^{-5}; \quad A_2 = k_\sigma A_1 = 1,1 \cdot 2,31 \cdot 10^{-5} = 2,55 \cdot 10^{-5};$$

$$B_1 = \frac{A_1}{l_\delta b_\delta} = \frac{2,31 \cdot 10^{-5}}{0,032 \cdot 0,0255} = 0,0283; \quad B_2 = \frac{t_1 B_1}{k_c b_z} = \frac{8,72 \cdot 0,0283}{0,93 \cdot 1,74 \cdot 10^{-3}} = 0,1526;$$

$$B_3 = \frac{A_1}{2k_c l_\delta h_a} = \frac{2,31 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 0,93 \cdot 0,032 \cdot 0,0023} = 0,1691;$$

$$B_4 = \frac{A_2}{k_c b_m l_m} = \frac{2,55 \cdot 10^{-5}}{1 \cdot 0,0053 \cdot 0,032} = 0,1513;$$

$$B_5 = \frac{A_2}{2k_c l_j h_j} = \frac{2,55 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 1 \cdot 0,062 \cdot 0,00272} = 0,0813;$$

$$\Phi_\delta = A_1 E_a = 2,31 \cdot 10^{-5} \cdot 8,58 = 2,124 \cdot 10^{-4} \text{ Вб};$$

$$\Phi_m = A_2 E_a = 2,55 \cdot 10^{-5} \cdot 8,58 = 2,188 \cdot 10^{-4} \text{ Вб};$$

$$B_\delta = B_1 E_a = 0,0283 \cdot 8,58 = 0,24 \text{ Тл}; \quad B_z = B_2 E_a = 0,1526 \cdot 8,58 = 1,31 \text{ Тл};$$

$$B_a = B_3 E_a = 0,1691 \cdot 8,58 = 1,45 \text{ Тл}; \quad B_m = B_4 E_a = 0,1513 \cdot 8,58 = 1,3 \text{ Тл};$$

$$B_j = B_5 E_a = 0,0813 \cdot 8,58 = 1,3 \text{ Тл};$$

$$C_1 = 1,6k_\delta \delta B_1 \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 1,1 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0283 \cdot 10^6 = 9,43;$$

$$C_2 = 1,6\delta_c B_4 \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 0,3 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1513 \cdot 10^6 = 7,26;$$

$$C_3 = 2h_z = 0,0164 \text{ м}; \quad C_4 = L_a = 0,01 \text{ м}; \quad C_5 = 2h_m = 0,0175 \text{ м}; \quad C_6 = 2L_j = 0,0795 \text{ м};$$

МДС участков магнитной цепи.

МДС воздушного зазора

$$F_\delta = C_1 E_a = 11 \cdot 8,58 = 81,06 \text{ А.}$$

МДС стыка между станиной и отъёмными полюсами

$$F_{jm} = C_2 E_a = 6,4 \cdot 8,58 = 62,4 \text{ А.}$$

МДС зубцовой зоны

$$F_z = C_3 H_z = 0,0164 \cdot 1180 = 19,35 \text{ А.}$$

МДС спинки якоря

$$F_a = C_4 H_a = 0,01 \cdot 1980 = 15,04 \text{ А.}$$

МДС сердечника полюсов

$$F_m = C_5 H_m = 0,0175 \cdot 1080 = 18,9 \text{ А.}$$

МДС станины

$$F_j = C_6 H_j = 0,0795 \cdot 580 = 42,5 \text{ А.}$$

Здесь H_z , H_m , H_a , H_j – напряжённости в соответствующих участках магнитной цепи, значения которых определяют по кривым намагничивания материалов, из которых выполнены эти участки.

Результирующая МДС на пару полюсов

$$F_e = F_\delta + F_z + F_a + F_m + F_j + F_{jm} = 81,06 + 19,35 + 15,04 + 18,9 + 42,5 + 62,4 = 239,2 \text{ А.}$$

Порядок расчёта и построения характеристики холостого хода и магнитной характеристики изложен в разделе 2.7. настоящего пособия (см. табл. 2.2).

МДС якоря.

По данным таблицы 2.2 строится переходная характеристика, т.е. зависимость $B_\delta = \left(\frac{F_\delta + F_z}{2} \right)$, согласно которой определяется размагничивающая МДС реакции якоря. Для проектируемого двигателя

$$F_q \approx 73,62 \text{ А.}$$

Продольная МДС якоря

$$F_d = 2b_d \cdot A = 2 \cdot 0,02 \cdot 10^{-2} \cdot 4945,5 = 1,98 \text{ А.}$$

Коммутационная МДС якоря (см. п. 2.8)

$$F_k = 0,74 \text{ А.}$$

Суммарная МДС якоря

$$F_r = F_q - F_d - F_k = 73,62 - 1,98 - 0,74 = 70,9 \text{ А.}$$

Полная МДС обмотки возбуждения (на пару полюсов)

$$F'_\epsilon = F_\epsilon + F_r = 239,2 + 70,9 = 311 \text{ А.}$$

7. Расчёт обмотки возбуждения

Сечение провода обмотки

$$q_B = k_\theta \frac{pF'_\epsilon l_{\text{ср.}\epsilon}}{57U} = 1,22 \cdot \frac{1 \cdot 311 \cdot 0,11}{57 \cdot 12} = 0,0611 \text{ мм}^2.$$

Здесь $l_{\text{ср.}\epsilon}$ – средняя длина витка обмотки возбуждения,

$$l_{\text{ср.}\epsilon} = 2(l_m + b_m) + \pi b_k = 2(0,032 + 0,064) + \pi 0,015 = 0,124 \text{ м;}$$

$b_k = (1,0 \dots 2,0) \cdot 10^{-2}$ м – ширина катушки. Выбираем стандартный провод:

$$q_B = 0,0616; \quad d_B = 0,28 \text{ мм;} \quad d_{\text{ви}} = 0,33 \text{ мм.}$$

Плотность тока в обмотке возбуждения

$$j_\epsilon = \frac{I_\epsilon}{q_B} = \frac{0,4}{0,0616} = 6,41 \text{ А/мм}^2.$$

Число витков обмотки возбуждения на полюс

$$W_\epsilon = \frac{F'_\epsilon}{2I_\epsilon} = \frac{311}{2 \cdot 0,39} = 394.$$

Требуемая площадь окна для размещения обмотки возбуждения

$$Q'_\epsilon = \frac{W_\epsilon d_{\text{ви}}^2}{f'_0} = \frac{394 \cdot 0,33^2}{0,82} = 56,5 \text{ мм}^2.$$

Здесь $f'_0 = 0,82 \dots 0,88$ – коэффициент, учитывающий возможные неточности намотки рядов провода в катушке.

Фактическая площадь окна для размещения обмотки возбуждения

$$Q_\epsilon = 1,15Q'_\epsilon = 1,15 \cdot 56,5 = 60,2 \text{ мм}^2.$$

Сопротивление обмотки возбуждения в нагретом состоянии

$$r_{\epsilon} = k_{\theta} \frac{2pW_{\epsilon}l_{\text{ср.}\epsilon}}{57q_{\text{в}}} = 1,22 \frac{2 \cdot 394 \cdot 0,11}{57 \cdot 0,0616} = 30 \text{ Ом}.$$

Реальный ток обмотки возбуждения

$$I_{\epsilon} = \frac{U_{\epsilon}}{r_{\epsilon}} = \frac{12}{30} \approx 0,398 \text{ А}.$$

Это значение I_{ϵ} – практически совпадает с первоначально принятым.

8. Потери и коэффициент полезного действия

Электрические потери:

а) электрические потери в обмотке якоря

$$P_{\text{эл.1}} = I_a^2 r_a = 1,8^2 \cdot 1,05 = 3,43 \text{ Вт};$$

б) электрические потери в обмотке возбуждения

$$P_{\text{эл.2}} = P_{\epsilon} = I_{\epsilon}^2 r_{\epsilon} = 0,38^2 \cdot 32 = 4,77 \text{ Вт};$$

в) электрические потери в переходном контакте щёток

$$P_{\text{щк}} = I_a \Delta U_{\text{щ}} = 1,8 \cdot 1,5 = 2,7 \text{ Вт};$$

Магнитные потери на гистерезис и вихревые токи в стали якоря:

а) масса стали зубцов

$$G_z = 7800 Z b_z h_n l_{\delta} k_c = 7800 \cdot 9 \cdot 1,87 \cdot 10^{-3} \cdot 6,8 \cdot 10^{-3} \cdot 32 \cdot 10^{-3} \cdot 0,93 = 0,0299 \text{ кг};$$

б) масса стали спинки якоря

$$\begin{aligned} G_a &= 1950\pi \left[(D_a - 2h_n)^2 - d_{\epsilon}^2 \right] l_{\delta} k_c = \\ &= 1950\pi \left[(25 \cdot 10^{-3} - 13,6 \cdot 10^{-3})^2 - 6,2 \cdot 10^{-6} \right] \cdot 32 \cdot 10^{-3} \cdot 0,93 = 0,00336 \text{ кг}; \end{aligned}$$

в) магнитные потери в стали якоря

$$\begin{aligned} P_{\text{мт}} &= 2,3 p_{1,0/50} \left(\frac{pn}{3000} \right)^{\beta} (B_z^2 G_z + B_a^2 G_a) = \\ &= 2,3 \cdot 3,3 \left(\frac{1 \cdot 6000}{3000} \right)^{1,4} (1,35^2 \cdot 0,026 + 1,39^2 \cdot 0,0166) = 1,17 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Механические потери:

а) механические потери на трение в подшипниках

$$\begin{aligned} P_{\text{тп}} &= k_m m'_a n \cdot 10^{-3} = k_m \pi / 4 (D_a^2 l_{\delta} \gamma_a + D_{\kappa}^2 l_{\kappa} \gamma_{\kappa})^n \cdot 10^{-3} = 1,3 (D_a^2 l_{\delta} + D_{\kappa}^2 l_{\kappa}) n \cdot 10^{-3} = \\ &= 1,3 (0,025^2 \cdot 0,032 + 0,015^2 \cdot 0,01) \cdot 6 \cdot 10^4 = 1,72 \text{ Вт}; \end{aligned}$$

б) потери на трение щёток о коллектор

$$P_{\text{тщ}} = k_{\text{тщ}} p_{\text{щ}} S_{\text{щ}} v_{\kappa} = k_{\text{тщ}} p_{\text{щ}} 2a_{\text{щ}} b_{\text{щ}} v_{\kappa} = 0,25 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot 4,71 = 0,45 \text{ Вт}.$$

Здесь $k_{\text{тщ}} = 0,25$ – коэффициент трения щёток о коллектор; $p_{\text{щ}} = 2 \cdot 10^4$ Па – удельное давление щёток на коллектор;

$S_m = 2a_{\text{щ}} b_{\text{щ}}$ – суммарная площадь контакта всех щёток;

в) потери на трение якоря о воздух

$$p_{\text{тв}} = 2D_a^2 l_{\delta} n^3 \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 0,025^3 \cdot 0,032 \cdot 6000^3 \cdot 10^{-6} = 0,216 \text{ Вт};$$

г) суммарные механические потери

$$p_{\text{мх}} = p_{\text{тп}} + p_{\text{тш}} + p_{\text{тв}} = 1,72 + 0,45 + 0,216 = 2,39 \text{ Вт.}$$

Полезная мощность двигателя

$$P_2 = P_1 - \Sigma p = UI - \Sigma p = 26,35 - 16,34 = 10,01 \text{ Вт,}$$

что совпадает с заданным значением этой мощности.

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} \cdot 100 \% = \frac{26,35 - 16,34}{26,35} \cdot 100 \% = 37,99.$$

Рабочие характеристики двигателя.

Расчёт и построение рабочих характеристик электродвигателя выполняются согласно рекомендациям, изложенным в разделе 2.11. настоящего пособия (см. табл. 2.3).

В заключение выполняется тепловой расчёт машины.

4.2. Расчет электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения

1. Задание

Полезная мощность на валу $P_2 = 10$ Вт; напряжение на зажимах $U = 12$ В; частота вращения вала двигателя $n = 6\ 000$ об/мин; способ возбуждения – последовательный; режим работы – продолжительный (S1); исполнение – закрытое.

2. Основные размеры

Расчётная мощность

$$P_a = \frac{1 + 2\eta}{3\eta} P_2 = \frac{1 + 2 \cdot 0,38}{3 \cdot 0,38} 10 = 15,44 \text{ Вт,}$$

где согласно кривой на рис. 2.1 $P_2 = 10$ Вт; $\eta \approx 0,38$.

Потребляемый из сети ток

$$I = \frac{P_a}{\eta U} = \frac{10}{0,38 \cdot 12} = 2,19 \text{ А.}$$

Ток якоря

$$I_a = I = 2,19 \text{ А.}$$

ЭДС якоря

$$E_a = \frac{P_a}{I_a} = \frac{15,44}{2,19} \approx 7,04 \text{ В.}$$

Машинная постоянная

$$C = \frac{6,1}{\alpha_{\delta} B \delta A} = \frac{6,1}{0,65 \cdot 0,26 \cdot 5000} \approx 7,22 \cdot 10^{-3},$$

здесь принято $\alpha = 0,65$ и согласно кривым (см. рис. 2.2.) $\frac{P_2}{n} = 1,67 \cdot 10^{-3}$:

$B_{\delta} = 0,26$ Тл; $A = 5\,000$ А/м.

Наружный диаметр и расчётная длина пакета якоря

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{CP_a}{\lambda n}} = \sqrt[3]{\frac{6,7 \cdot 10^{-3} \cdot 15,44}{1,3 \cdot 6000}} \approx 0,0243 \text{ м};$$

$l_{\delta} = \lambda D_a = 1,3 \cdot 0,0243 = 0,0315$ м, где $\lambda = 1,3$.

Окончательно значения D_a и l_{δ} и округляются до ближайших стандартных чисел (Приложение 1):

$$D_a = 0,025 \text{ м и } l_{\delta} = 0,032 \text{ м.}$$

Воздушный зазор: $\delta = 0,25 \frac{\pi D_a A}{2p B_{\delta}} \cdot 10^{-6} \approx 0,00019 \text{ м} = 0,2 \text{ мм}$

Внутренний диаметр полюсов

$$D_n = D_a + 2\delta = 0,025 + 2 \cdot 0,0002 = 0,0254 \text{ м.}$$

Материал пакета якоря – листовая электротехническая сталь марки 1212 (Приложение 4).

Полюсное деление и расчётная полюсная дуга

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,025}{2} \approx 0,039 \text{ м};$$

$$b_{\delta} = \alpha \tau = 0,65 \cdot 0,039 \approx 0,0255 \text{ м,}$$

где $2p = 2$.

Частота перемагничивания якоря

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{1 \cdot 6\,000}{60} = 100 \text{ Гц.}$$

3. Обмотка якоря

Полезный магнитный поток в воздушном зазоре при нагрузке двигателя

$$\Phi_{\delta} = B_{\delta} b_{\delta} l_{\delta} = 0,28 \cdot 0,0255 \cdot 0,032 = 2,124 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Число проводников обмотки якоря (предварительно)

$$N = \frac{60aE_a}{pn\Phi_{\delta}} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 7,04}{1 \cdot 6\,000 \cdot 2,124 \cdot 10^{-4}} \approx 331,$$

где a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря, $a = 1$.

Число пазов якоря

$$z = (3 \dots 4) D_a \cdot 10^2 = (3 \dots 4) \cdot 2,5 = 9.$$

Схема якорной обмотки аналогична двигателю параллельного возбуждения (см. рис. 4.1.)

Число коллекторных пластин

$$K = 2Z = 2 \cdot 9 = 18.$$

Число витков в секции обмотки якоря

$$W_c = \frac{N}{2K} = \frac{331}{2 \cdot 18} = 9,21 \approx 10.$$

Окончательное число проводников обмотки якоря

$$N = 2KW_c = 2 \cdot 18 \cdot 10 = 360.$$

Число проводников обмотки якоря в пазу

$$N_{\Pi} = \frac{N}{Z} = \frac{360}{9} = 40.$$

Уточнение линейной нагрузки

$$A = \frac{NI_a}{2\pi D_a} = \frac{360 \cdot 2,19}{2\pi \cdot 0,025} \approx 5026 \text{ А/м.}$$

Отклонение от первоначально принятого значения составляет $0,5\% < 10\%$.

Уточнение потока

$$\Phi_{\delta} = \frac{60aE_a}{pnN} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 7,04}{1 \cdot 6 \ 000 \cdot 360} \approx 1,96 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Шаги обмотки якоря по секциям и коллектору

$$y_1 = \frac{K}{2p} - \varepsilon = \frac{18}{2} - 0 = 9;$$

$$y_2 = y_1 - 1 = 9 - 1 = 8; y = 1; y_k = 1.$$

4. Пазово-зубцовая зона

Окружная скорость вращения якоря

$$v_a = \frac{\pi D_a n}{60} = \frac{\pi 0,025 \cdot 6000}{60} = 7,85 \text{ м/с.}$$

Удельная тепловая нагрузка

$$q = \alpha \theta_m = \alpha' \theta_m (1 + 0,1v_a) \approx 0,12(1 + 0,1 \cdot 7,85) = 0,241 \text{ Вт/см}^2.$$

Здесь $\theta_m = 90^\circ \text{C}$ – допускаемое превышение температуры обмотки якоря.

Допустимая плотность тока в обмотке якоря

$$j_a = \frac{Hq}{A} = \frac{14 \cdot 10^4 \cdot 0,241}{5026} \approx 6,7 \text{ А/мм}^2$$

где H – коэффициент, зависящий от частоты вращения.

Сечение и диаметр обмотки якоря (предварительно)

$$q_a = \frac{I_a}{2j_a} = \frac{2,19}{2 \cdot 6,7} \approx 0,1633 \text{ мм}^2.$$

Сечение q_a и соответствующие ему диаметры голого (d_a) и изолированного ($d_{\text{ан}}$) провода выбираются по соответствующему стандарту (Приложение 2):

$q_a = 0,159 \text{ мм}^2$; $d_{\text{ан}} = 0,51 \text{ мм}$; $d_a = 0,45 \text{ мм}$. Провод ПЭТВ-2.

Уточнение плотности тока в обмотке якоря

$$j_a = \frac{I_a}{2q_a} = \frac{2,19}{2 \cdot 0,159} \approx 6,9 \text{ А/мм}^2.$$

Площадь сечения паза якоря:

а) площадь паза, занимаемая изолированными проводниками

$$Q_{п.п} = \frac{N_{п.п} d_{аи}^2}{f_0} = \frac{40 \cdot 0,51^2}{0,72} \approx 14,45 \text{ мм}^2,$$

где f_0 – технологический коэффициент, учитывающий неточность и неплотность укладки проводников в пазу, $f_0 = 0,72 \dots 0,74$,

б) площадь паза, занимаемая пазовой изоляцией

$$Q_{пи} = \delta_{и} \Pi = 0,15 \cdot 17,5 \approx 2,62 \text{ мм}^2.$$

Здесь $\delta_{и} = 0,15$ мм – толщина пазовой изоляции; Π – периметр паза,

$$\Pi \approx 0,7 D_a = 0,7 \cdot 25 = 17,5 \text{ мм},$$

в) площадь паза, занимаемая клином

$$Q_{пк} = b_{к} l_{к} = 4 \cdot 0,8 = 3,2 \text{ мм}^2,$$

где принято $b_{к} = 4$ мм; $l_{к} = 0,8$ мм,

г) полная требуемая площадь сечения паза якоря

$$Q_{п} = Q_{п.п} + Q_{пи} + Q_{пк} = 14,45 + 3,2 + 2,62 = 20,275 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент заполнения паза изолированным проводом

$$k_{п.и} = \frac{N_{п.п} q_{аи}}{Q_{п}} = \frac{40 \cdot 0,2043}{20,275} \approx 0,4, \text{ что допустимо.}$$

При этом

$$q_{аи} = \frac{\pi d_{аи}^2}{4} = \frac{\pi 0,51^2}{4} \approx 0,2043 \text{ мм}^2.$$

Масштабный эскиз паза аналогичен двигателю параллельного возбуждения (см. рис. 3.2.).

Выбираем грушевидную форму паза с шириной зубца b_z , одинаковой по высоте паза, причём

$$b_z = \frac{B_{\delta} t_1}{k_c B_z} = \frac{0,26 \cdot 8,72}{0,93 \cdot 1,4} \approx 1,74 \text{ мм},$$

где t_1 – зубцовое деление якоря,

$$t_1 = \frac{\pi D_a}{Z} = \frac{\pi \cdot 0,025}{9} \cdot 10^3 \approx 8,72 \text{ мм};$$

k_c – коэффициент заполнения паза якоря сталью, $k_c = 0,93$;

B_z – индукция в зубце, $B_z = 1,4$ Тл.

Для определения геометрии пазово-зубцовой зоны использован графический метод, предусматривающий построение масштабного эскиза паза с учётом полученных выше значений $Q_{п}$, B_z , t_1 и высоты паза $h_{п} = (0,25 \dots 0,35) D_a$.

Высота шлица паза

$$h_{ш} = (0,2 \dots 0,8) \text{ мм} = 0,5 \text{ мм}.$$

Ширина шлица паза

$$b_{ш} = d_{аи} + 2\delta_{и} + 0,2 = 0,51 + 2 \cdot 0,15 + 0,2 \approx 1,0 \text{ мм}.$$

Уточнённое значение высоты и размеров паза (из масштабного эскиза)

$$h_{\text{п}} = 7,7 \text{ мм}, d_1 = 4,4 \text{ мм}, d_2 = 1,4 \text{ мм}, h_1 = 4,3 \text{ мм}.$$

Высота спинки якоря

$$h_a = \frac{D_a \cdot 10^3 - 2h_{\text{п}} - d_g}{2} = \frac{0,025 \cdot 10^3 - 15,4 - 8}{2} = 2,8 \text{ мм},$$

где d_g – диаметр вала, $d_g = (0,16 \dots 0,25)D_a \cdot 10^3 = 0,16D_a \cdot 10^3 \approx 4 \text{ мм}$.

Индукция в спинке якоря

$$B_a = \frac{\Phi_{\delta}}{2k_c h_a l_{\delta}} = \frac{1,96 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,93 \cdot 0,0028 \cdot 0,032} \approx 1,17 \text{ Тл}.$$

Ширина зубца у его вершины

$$b_z' = t_1 - b_{\text{ш}} = 8,72 - 1 = 7,72 \text{ мм}.$$

Непосредственно из масштабного эскиза паза определяются $b_{\text{п}}'$ и $b_{\text{п}}''$.

Средняя длина одного проводника обмотки якоря

$$l_{\text{ср.а}} = l_{\delta} + 1,2D_a = 0,032 + 1,2 \cdot 0,025 = 0,062 \text{ м}.$$

Сопротивление обмотки якоря

$$r_a = k_{\theta} \frac{N l_{\text{ср.а}}}{228 q_a} = \frac{360 \cdot 0,062}{228 \cdot 0,159} \approx 0,788 \text{ Ом}.$$

Падение напряжения в обмотке якоря

$$\Delta U_a = I_a r_a = 2,19 \cdot 0,788 = 1,73 \text{ В}.$$

5. Коллектор и щётки

Предварительное значение диаметра коллектора

$$D_k' = (0,5 \dots 0,9)D_a = 0,6 \cdot 0,025 = 0,015 \text{ м}.$$

Ширина коллекторной пластины

$$t_k' = \frac{\pi D_k'}{K} = \frac{\pi \cdot 0,015}{18} = 0,0026 \text{ м}.$$

Примем ширину коллекторной пластины $b_k = 0,002 \text{ м}$ и толщину изоляции между коллекторными пластинами $\beta_{\text{и}} = 0,0006 \text{ м}$; тогда $t_k = 0,002 + 0,0006 = 0,0026 \text{ м}$.

Окончательный диаметр якоря

$$D_k = \frac{K t_k}{\pi} = \frac{18 \cdot 0,0026}{\pi} \approx 0,015 \text{ м}.$$

Сорт щёток и плотность тока под щётками.

Принимаем щётки марки М-1 (Приложение 3, таблица 3.1)

$$j'_{\text{щ}} = 0,15 \text{ А/мм}^2; \Delta U_{\text{щ}} = 1,5 \text{ В}; \mu = 0,25; p_{\text{щ}} = (1,47 \dots 1,96) \text{ Н/см}^2.$$

Площадь сечения щётки

$$S'_{\text{щ}} = \frac{I_a}{p j'_{\text{щ}}} = \frac{2,19}{1 \cdot 0,15} = 0,146 \text{ см}^2 = 14,6 \text{ мм}^2.$$

Причём: $b_{щ} = (1 \dots 3)b_k = 1,5 \cdot 2 = 3$ мм; $a_{щ} = \frac{S'_{щ}}{b_{щ}} = \frac{14,6}{3} = 4,9$ мм.

Окончательно: $b_{щ} = 3,2$ мм; $a_{щ} = 5$ мм; $h_{щ} = 8$ мм.

Действительная плотность тока под щётками

$$j_{щ} = \frac{I_2}{b_{щ} a_{щ}} = \frac{2,19}{3,2 \cdot 5} = 0,137 \text{ А/мм}^2.$$

Длина коллектора

$$l'_k = (1,5 \dots 2)a_{щ} = 2 \cdot 5 = 10 \text{ мм}; l_k = l'_k + (3 \dots 5)d_a = 10 + 5 \cdot 0,45 = 12,3 \text{ мм}.$$

Окружная скорость коллектора: $v_k = \frac{\pi D_k n}{60} = \frac{\pi 0,015 \cdot 6000}{60} \approx 4,7$ м/с

Проверка коммутации:

а) ширина зоны коммутации

$$b_{зк} = b'_{щ} + \left(U_n + \left| \frac{K}{2p} - y_1 \right| - \frac{a}{p} \right) t_k = 0,0053 + (2 - 1) \cdot 0,0043 = 0,00973 \text{ м},$$

где

$$b'_{щ} = b_{щ} \frac{D_a}{D_k} = 0,0032 \cdot \frac{0,025}{0,015} = 0,0053 \text{ м}; t'_k = t_k \frac{D_a}{D_k} = 0,0026 \cdot \frac{0,025}{0,015} = 0,0043 \text{ м};$$

$$b_{зк} < 0,8(\tau - b_\delta) = 0,8 \cdot (0,039 - 0,0025) = 0,0112 \text{ м}.$$

б) удельная проводимость для полей рассеяния обмотки якоря

$$\begin{aligned} \xi &= \left[0,6 \frac{h_n}{b_n} + \frac{l_a}{l_\delta} + 0,92 \lg \left(\frac{\pi t_1}{b_{щ}} \right) \right] = \\ &= \left[0,6 \cdot \frac{6,8 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} + \frac{3 \cdot 10^{-2}}{3,2 \cdot 10^{-2}} + 0,92 \lg \left(\frac{\pi 8,72 \cdot 10^{-3}}{3,2 \cdot 10^{-3}} \right) \right] = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}, \end{aligned}$$

в) среднее значение реактивной ЭДС

$$e_r = 2W_c \xi l_\delta A v_a = 2 \cdot 10 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,032 \cdot 5026 \cdot 7,85 \approx 0,027 \text{ В}.$$

г) ЭДС в короткозамкнутой секции, индуцируемая полем якоря

$$\begin{aligned} e_a &= \frac{8\pi W_c A \tau l_\delta v_a \cdot 10^{-7}}{\tau - b_\delta} = \\ &= \frac{8\pi \cdot 10 \cdot 5026 \cdot 0,039 \cdot 0,032 \cdot 7,85 \cdot 10^{-7}}{0,039 - 0,025} = 0,091 \text{ В}, \end{aligned}$$

д) среднее значение результирующей ЭДС в короткозамкнутой секции якоря

$$e = e_r + e_a = 0,027 + 0,091 = 0,118 \text{ В} < 0,5 \text{ В}.$$

Коммутацию можно считать удовлетворительной.

6. Расчёт магнитной цепи и характеристики холостого хода

Высота спинки якоря: $h_a = 0,0028$ м.

Индукция в спинке якоря: $B_a = 1,17$ Тл.

Осевая длина полюса: $l_m = l_\delta = 0,032$ м.

Высота сердечника полюса: $h_m = (0,25 \dots 0,4)D_a = 0,35 \cdot 0,025 = 0,00875$ м.

Поток сердечника полюса: $\Phi_m = k_\sigma \Phi_\delta = 1,1 \cdot 1,96 \cdot 10^{-4} = 2,15 \cdot 10^{-4}$ Вб,
где k_σ – коэффициент магнитного рассеяния, $k_\sigma = 1,08 \dots 1,15$.

Поперечное сечение сердечника полюса

$$Q_m = \frac{\Phi_m}{B_m} = \frac{2,15 \cdot 10^{-4}}{1,3} = 1,65 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

где $B_m = 1,0 \dots 1,5$ Тл – индукция в сердечнике полюса.

Ширина сердечника полюса

$$b_m = \frac{Q_m}{k'_c l'_m} = \frac{1,65 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4}} = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

где $k'_c = 1$.

Поперечное сечение станины

$$Q_j = \frac{\Phi_m}{2B_j} = \frac{2,15 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1,3} = 1,65 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

где $B_j = 1,0 \dots 1,5$ Тл – индукция в станине.

Осевая длина станины:

а) с отъёмными полюсами: $l_j = l_\delta + (3 \dots 5) \cdot 10^{-2} = 0,032 + 3 \cdot 10^{-2} = 0,062$ м;

б) шихтованная: $l_j = l_\delta = 0,032$ м.

Высота станины

$$h_j = \frac{Q_j}{k'_c l'_j} = \frac{1,65 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 0,062} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Средние, значения длин путей магнитного потока определяются из масштабного эскиза:

а) в станине – $L_j = 0,0715$ м;

б) в сердечнике полюсов – $L_m = 2h_m = 2 \cdot 0,00875 = 0,0175$ м;

в) в воздушном зазоре между полюсами и якорем –

$$L_\delta = 2\delta = 2 \cdot 0,0002 = 0,0004 \text{ м};$$

г) в зубцах якоря – $L_z = 2h_z = 2 \cdot 0,0077 = 0,0154$ м;

д) в спинке якоря –

$$L_a = \frac{\pi(D_a - 2h_z - h_a)}{2p} = \frac{\pi(0,025 - 2 \cdot 0,0077 - 0,0028)}{2} = 0,0107 \text{ м};$$

е) в воздушном зазоре между полюсами и станиной

$$L_{jm} = 2\delta_c = 2 \cdot 0,03 \cdot 10^{-4} = 0,06 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Коэффициент воздушного зазора

$$k_{\delta} = \frac{t_1 + 10\delta}{b'_z + 2\delta} = \frac{8,72 + 10 \cdot 0,2}{7,72 + 10 \cdot 0,2} = 1,1$$

Коэффициенты пропорциональности, потоки и индукции на отдельных участках цепи

$$A_1 = \frac{60a}{pnN} = \frac{60 \cdot 1}{1 \cdot 6000 \cdot 360} = 2,77 \cdot 10^{-5}; \quad A_2 = k_{\sigma} A_1 = 1,1 \cdot 2,77 \cdot 10^{-5} = 3,05 \cdot 10^{-5};$$

$$B_1 = \frac{A_1}{l_{\delta} b_{\delta}} = \frac{2,77 \cdot 10^{-5}}{0,032 \cdot 0,0255} = 0,034; \quad B_2 = \frac{t_1 B_1}{k_c b_z} = \frac{8,72 \cdot 0,034}{0,93 \cdot 1,74 \cdot 10^{-3}} = 0,1834;$$

$$B_3 = \frac{A_1}{2k_c l_{\delta} h_a} = \frac{2,77 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 0,93 \cdot 0,032 \cdot 0,0028} = 0,1667;$$

$$B_4 = \frac{A_2}{k'_c b_m l_m} = \frac{3,05 \cdot 10^{-5}}{1 \cdot 0,0052 \cdot 0,032} = 0,1847;$$

$$B_5 = \frac{A_2}{2k_c l_j h_j} = \frac{3,05 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 1 \cdot 0,062 \cdot 0,0027} = 0,0993;$$

$$\Phi_{\delta} = A_1 E_a = 2,77 \cdot 10^{-5} \cdot 7,04 = 1,96 \cdot 10^{-4} \text{ Вб};$$

$$\Phi_m = A_2 E_a = 3,05 \cdot 10^{-5} \cdot 7,04 = 2,15 \cdot 10^{-4} \text{ Вб};$$

$$B_{\delta} = B_1 E_a = 0,034 \cdot 7,04 = 0,239 \text{ Тл}; \quad B_z = B_2 E_a = 0,1834 \cdot 7,04 = 1,29 \text{ Тл};$$

$$B_a = B_3 E_a = 0,1667 \cdot 7,04 = 1,17 \text{ Тл}; \quad B_m = B_4 E_a = 0,1482 \cdot 7,04 = 1,3 \text{ Тл};$$

$$B_j = B_5 E_a = 0,1847 \cdot 7,04 = 1,3 \text{ Тл};$$

$$C_1 = 1,6k_{\delta} \delta B_1 \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 1,1 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,034 \cdot 10^6 = 11,35;$$

$$C_2 = 1,6\delta_c B_4 \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 0,3 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1847 \cdot 10^6 = 8,86;$$

$$C_3 = 2h_z = 0,0154 \text{ м}; \quad C_4 = L_a = 0,01 \text{ м}; \quad C_5 = 2h_m = 0,0175 \text{ м}; \quad C_6 = 2L_j = 0,0715 \text{ м};$$

МДС участков магнитной цепи.

МДС воздушного зазора: $F_{\delta} = C_1 E_a = 11,35 \cdot 7,04 = 79,9 \text{ А}$.

МДС стыка между станиной и отъёмными полюсами:

$$F_{jm} = C_2 E_a = 8,86 \cdot 7,04 = 62,4 \text{ А}.$$

МДС зубцовой зоны: $F_z = C_3 H_z = 0,0154 \cdot 1100 = 16,9 \text{ А}$.

МДС спинки якоря: $F_a = C_4 H_a = 0,01 \cdot 779 = 8,3 \text{ А}$.

МДС сердечника полюсов: $F_m = C_5 H_m = 0,0175 \cdot 1080 = 18,9 \text{ А}$.

МДС станины: $F_j = C_6 H_j = 0,0715 \cdot 1590 = 114 \text{ А}$.

Здесь H_z , H_m , H_a , H_j – напряжённости в соответствующих участках магнитной цепи, значения которых определяют по кривым намагничивания материалов, из которых выполнены эти участки.

Результирующая МДС на пару полюсов

$$F_{\epsilon} = F_{\delta} + F_z + F_a + F_m + F_j + F_{jm} = 79,9 + 16,9 + 8,3 + 18,9 + 114 + 62,4 = 300 \text{ А}.$$

Порядок расчёта и построения характеристики холостого хода и магнитной характеристики изложен в разделе 2.7. настоящего пособия (см. табл. 2.2).

МДС якоря.

По данным таблицы 2.2 строится переходная характеристика, т.е. зависимость

$B_\delta = \left(\frac{F_\delta + F_z}{2} \right)$, согласно которой определяется размагничивающая МДС реакции

якоря. Для проектируемого двигателя

$$F_q \approx 35 \text{ А.}$$

Продольная МДС якоря

$$F_d = 2b_d A = 2 \cdot 0,02 \cdot 10^{-2} \cdot 5025,9 = 1,51 \text{ А.}$$

Коммутационная МДС якоря (см. п. 2.8)

$$F_k = 0,53 \text{ А.}$$

Суммарная МДС якоря

$$F_r = F_q - F_d - F_k = 35 - 1,51 - 0,54 = 33 \text{ А.}$$

Полная МДС обмотки возбуждения (на пару полюсов)

$$F'_\epsilon = F_\epsilon + F_r = 300 + 33 = 333 \text{ А.}$$

7. Расчёт обмотки возбуждения

Сечение провода обмотки

$$q_B = \frac{I_a}{j_c} = \frac{2,19}{4} = 0,5482 \text{ мм}^2.$$

Здесь $l_{\text{ср.}\epsilon}$ – средняя длина витка обмотки возбуждения,

$l_{\text{ср.}\epsilon} = 2(l_m + b_m) + \pi b_k = 2(0,032 + 0,0052) + \pi 0,015 = 0,1058 \text{ м};$

$b_k = (1,0 \dots 2,0) \cdot 10^{-2} \text{ м}$ – ширина катушки. Выбираем стандартный провод:

$$q_B = 0,503; \quad d_B = 0,8 \text{ мм}; \quad d_{\text{ви}} = 0,89 \text{ мм.}$$

Уточним плотность тока в обмотке возбуждения

$$j_c = \frac{I_a}{q_B} = \frac{2,19}{0,503} = 4,36 \text{ А/мм}^2.$$

Число витков обмотки возбуждения на полюс

$$W_c = \frac{F'_\epsilon}{2I_a} = \frac{333}{2 \cdot 2,19} = 76.$$

Фактическая площадь окна для размещения обмотки возбуждения

$$Q'_\epsilon = 1,15 \frac{W_c d_{\text{ви}}^2}{f'_0} = 1,15 \frac{76 \cdot 0,79^2}{0,85} = 81 \text{ мм}^2.$$

Здесь $f'_0 = 0,82 \dots 0,88$ – коэффициент, учитывающий возможные неточности намотки рядов провода в катушке.

Сопrotивление обмотки возбуждения в нагретом состоянии

$$r_c = k_\theta \frac{2p W_c l_{\text{ср.}\epsilon}}{57 q_B} = 1,22 \frac{2 \cdot 76 \cdot 0,1058}{57 \cdot 0,62} = 0,72 \text{ Ом.}$$

Падение напряжения обмотки возбуждения

$$\Delta U_c = I_a r_c = 2,19 \cdot 0,72 = 1,58.$$

Величина ЭДС при нагрузке

$$E = U - \Delta U_a - \Delta U_c - \Delta U_{щ} = 12 - 1,58 - 1,9 - 1,5 \approx 7,19 \text{ В.}$$

Отличие от первоначально принятого составляет 2,2 %.

Если полученная ЭДС превышает $\pm 5\%$, то необходимо пересчитать обмотку приняв (по характеристике холостого хода) новое значение результирующей МДС цепи.

8. Потери и коэффициент полезного действия

Электрические потери:

а) электрические потери в обмотке якоря

$$P_{эл.1} = I_a^2 r_a = 2,19^2 \cdot 0,79 = 3,8 \text{ Вт};$$

б) электрические потери в обмотке возбуждения

$$P_{эл.2} = P_g = I_g^2 r_g = 2,19^2 \cdot 0,72 = 3,5 \text{ Вт};$$

в) электрические потери в переходном контакте щёток

$$P_{щк} = I_a \Delta U_{щ} = 2,19 \cdot 1,5 = 3,3 \text{ Вт};$$

Магнитные потери на гистерезис и вихревые токи в стали якоря:

а) масса стали зубцов

$$G_z = 7800 Z b_z h_n l_{\delta} k_c = 7800 \cdot 9 \cdot 1,87 \cdot 10^{-3} \cdot 7,7 \cdot 10^{-3} \cdot 32 \cdot 10^{-3} \cdot 0,93 = 0,028 \text{ кг};$$

б) масса стали спинки якоря

$$\begin{aligned} G_a &= 1950 \pi \left[(D_a - 2h_n)^2 - d_g^2 \right] l_{\delta} k_c = \\ &= 1950 \pi \left[(25 \cdot 10^{-3} - 7,7 \cdot 10^{-3})^2 - 4 \cdot 10^{-6} \right] \cdot 32 \cdot 10^{-3} \cdot 0,93 = 0,0044 \text{ кг}; \end{aligned}$$

в) магнитные потери в стали якоря

$$\begin{aligned} P_{мт} &= 2,3 p_{1,0/50} \left(\frac{pn}{3000} \right)^{\beta} (B_z^2 G_z + B_a^2 G_a) = \\ &= 2,3 \cdot 3,3 \left(\frac{1 \cdot 6000}{3000} \right)^{1,4} (1,29^2 \cdot 0,028 + 1,17^2 \cdot 0,044) = 0,99 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Механические потери:

а) механические потери на трение в подшипниках

$$\begin{aligned} P_{тп} &= k_m m'_{an} \cdot 10^{-3} = k_m \pi / 4 (D_a^2 l_{\delta} \gamma_a + D_k^2 l_k \gamma_k)^n \cdot 10^{-3} = 1,3 (D_a^2 l_{\delta} + D_k^2 l_k) n \cdot 10^{-3} = \\ &= 1,3 (0,025^2 \cdot 0,032 + 0,015^2 \cdot 0,0123) \cdot 6 \cdot 10^4 = 1,77 \text{ Вт}; \end{aligned}$$

б) потери на трение щёток о коллектор

$$P_{тщ} = k_{тщ} p_{щ} S_{щ} v_k = k_{тщ} p_{щ} 2a_{щ} b_{щ} v_k = 0,25 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot 4,71 = 1,12 \text{ Вт.}$$

Здесь $k_{тщ} = 0,25$ – коэффициент трения щёток о коллектор; $p_{щ} = 2 \cdot 10^4$ Па – удельное давление щёток на коллектор;

$S_m = 2a_{щ} b_{щ}$ – суммарная площадь контакта всех щёток;

в) потери на трение якоря о воздух

$$p_{\text{тв}} = 2D_a^2 l_{\delta} n^3 \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 0,025^3 \cdot 0,032 \cdot 6000^3 \cdot 10^{-6} = 0,216 \text{ Вт};$$

г) суммарные механические потери

$$p_{\text{мх}} = p_{\text{тп}} + p_{\text{тщ}} + p_{\text{тв}} = 1,77 + 1,12 + 0,216 = 3,1 \text{ Вт.}$$

Полезная мощность двигателя

$$P_2 = P_1 - \Sigma p = UI - \Sigma p = 26,32 - 16,2 = 10,07 \text{ Вт},$$

что совпадает с заданным значением этой мощности.

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} \cdot 100 \% = \frac{26,32 - 16,2}{26,32} \cdot 100 \% = 38,3.$$

Рабочие характеристики двигателя.

Расчёт и построение рабочих характеристик электродвигателя выполняются согласно рекомендациям, изложенным в разделе 2.11. настоящего пособия (см. табл. 2.3).

В заключение выполняется тепловой расчёт машины.

Глава 5

Алгоритм расчета универсального коллекторного двигателя

5.1. Исходные данные расчета

При расчете универсального коллекторного двигателя (УКД) обязательными исходными данными являются:

- а) полезная мощность P_2 , Вт;
- б) частота вращения n , об/мин;
- в) число пар полюсов $2p$;
- г) частота сети f_1 , Гц;
- д) напряжение питающей сети на переменном и постоянном токе $U_{пр}$, $U_{пс}$, В;
- е) режим работы: продолжительный или кратковременный до 5 мин;
- ж) исполнение двигателя: закрытое без вентилятора или защищенное с вентилятором;
- з) марка щетки;
- к) марка стали;
- л) марка провода.

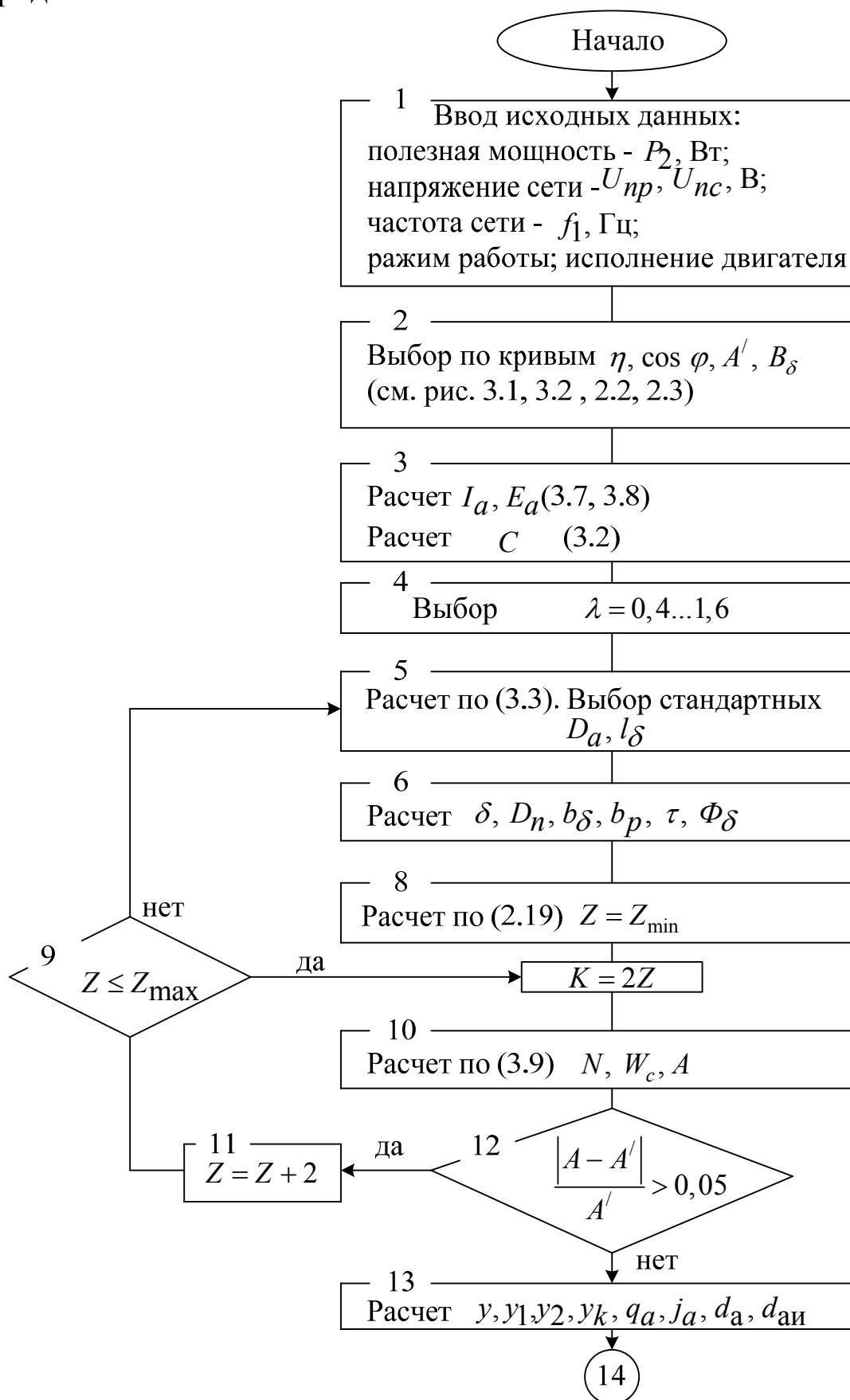
Дополнительными исходными параметрами могут являться:

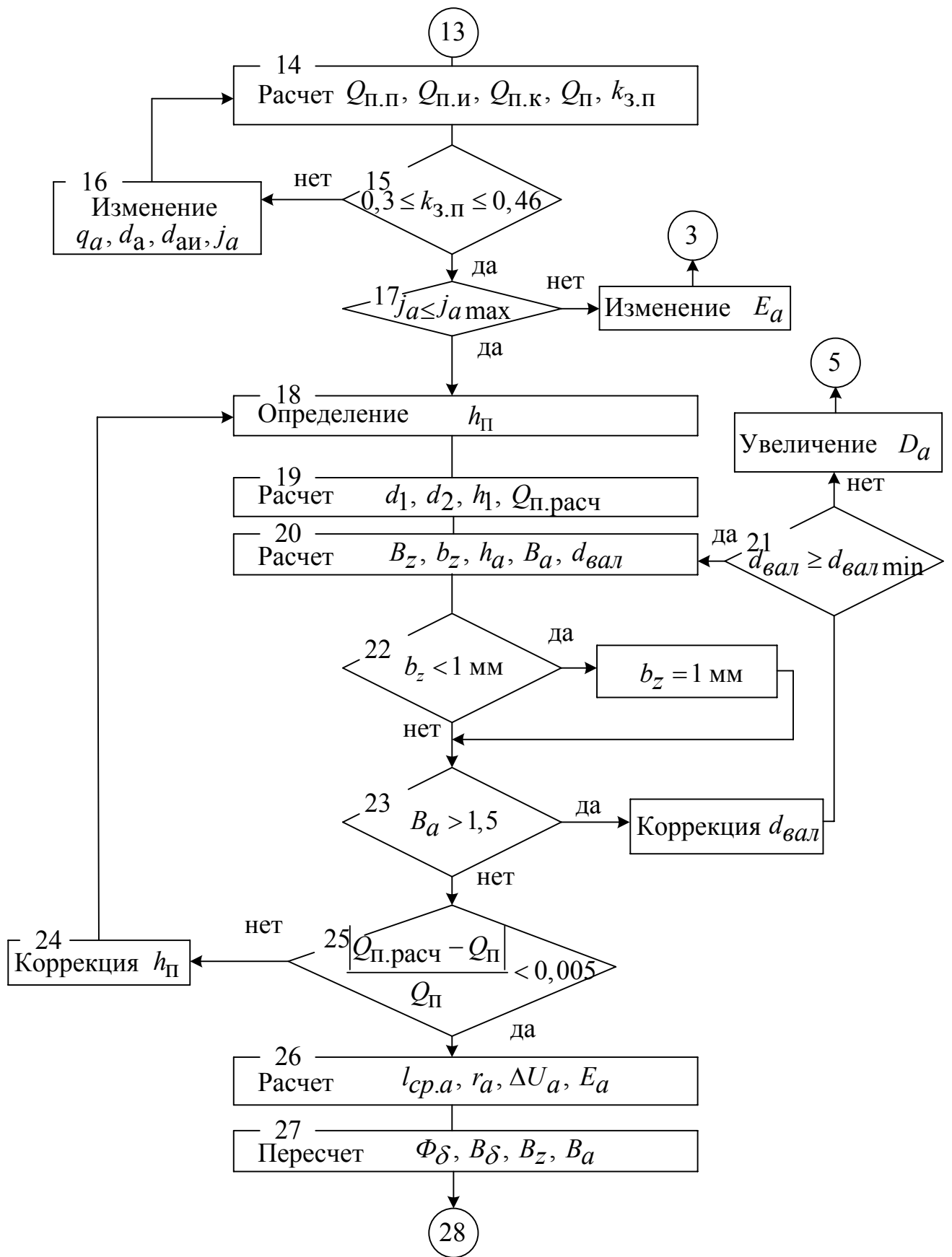
- а) линейная нагрузка A , А/м;
- б) коэффициент мощности при нагрузке;
- в) предварительный КПД при работе от сети переменного или постоянного тока;
- г) отношение длины пакета якоря к его диаметру λ ;
- д) ток якоря при нагрузке на переменном или постоянном токе;
- е) предварительная плотность тока в обмотке якоря и обмотке возбуждения;
- ж) величина воздушного зазора под полюсом δ ;
- з) коэффициент полюсного перекрытия α ;
- л) число пазов Z ;
- м) высота паза якоря h_n ;
- н) толщина пазовой изоляции $\delta_{и}$;
- п) значения индукций в воздушном зазоре, сердечнике полюса, спинке и зубце якоря, станине.

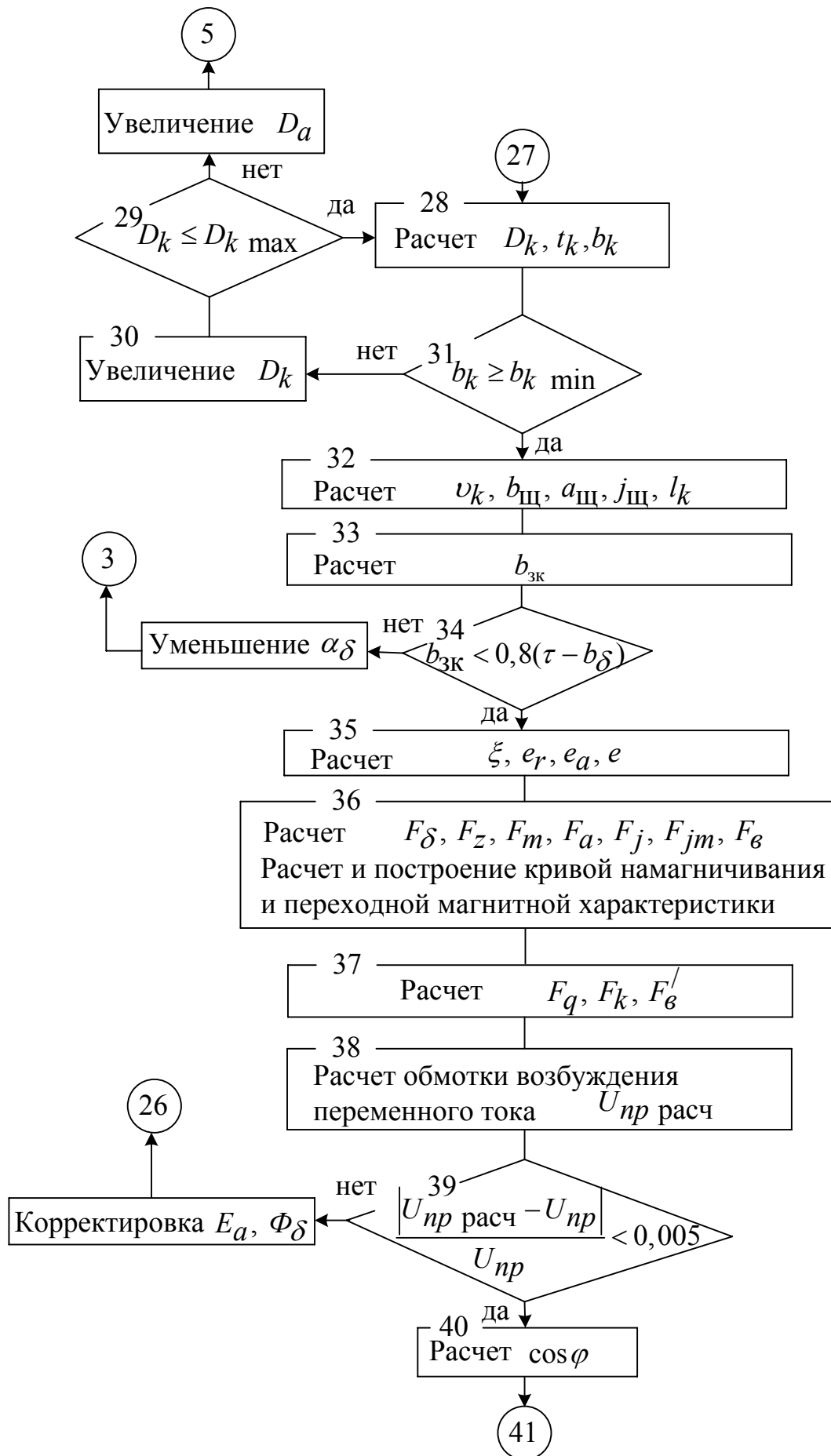
При использовании дополнительных параметров необходимо учитывать это обстоятельство при разработке программы.

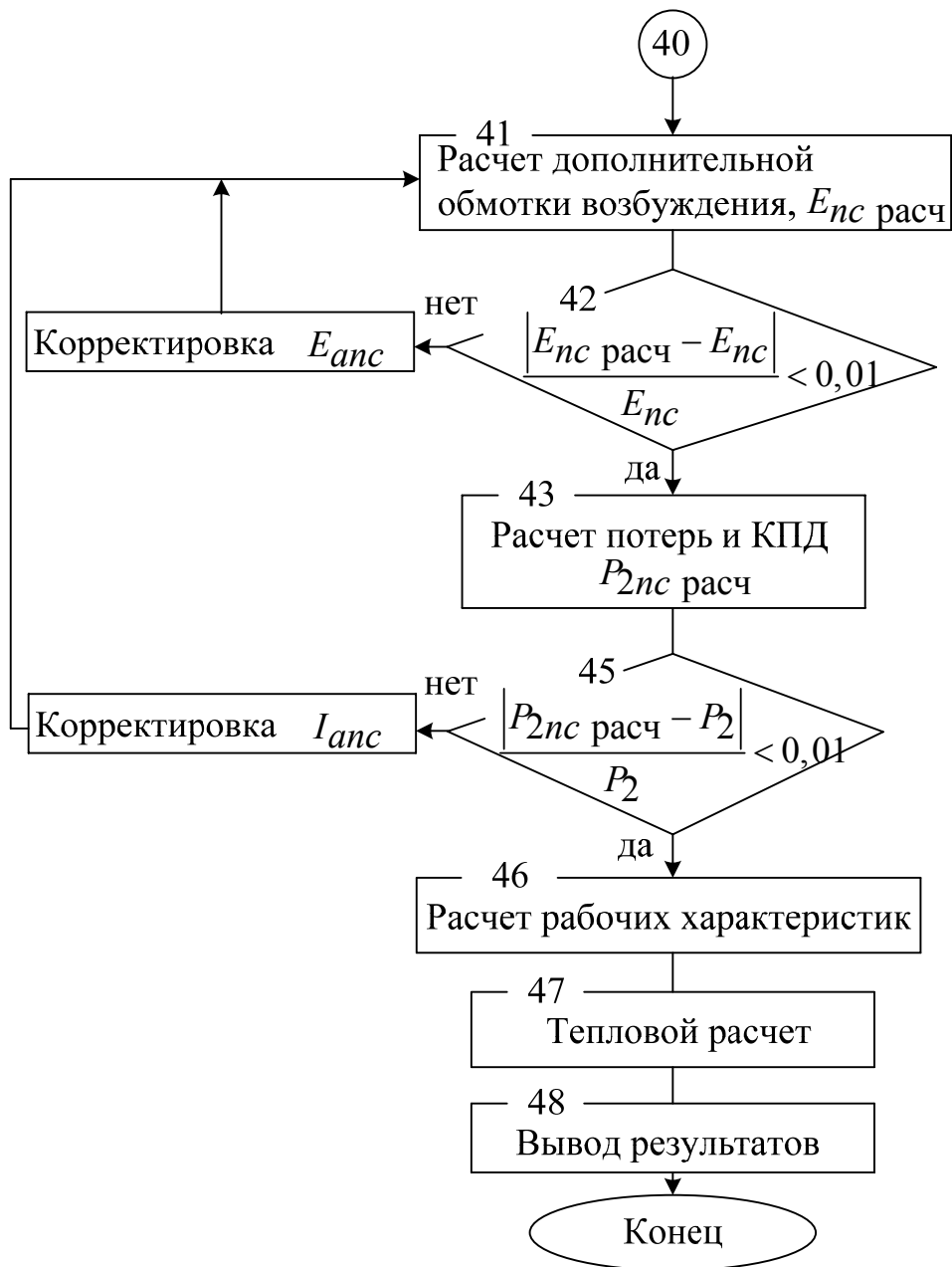
Блок-схема алгоритма УКД при использовании основных исходных данных представлена ниже.

5.2. Блок-схема алгоритма универсального коллекторного электродвигателя









Все параметры блок-схемы рассмотрены в предыдущих главах.

5.3. Блок-схема алгоритма определения поперечной составляющей МДС реакции якоря

В основу вычисления поперечной составляющей МДС якоря использован метод половинного деления. Искомая функция ограничена отрезком аргумента и находится в пределах $[x_1, x_3]$. Значение аргумента x_n определяется пересечением прямой соответствующей $B_{\delta n}$ и характеристики холостого хода (рис. 5.1). Далее определяются соответственно x_1, x_2, x_3 . Где

$$x_1 = x_n - \frac{b_\delta A}{2}, \quad x_3 = x_n + \frac{b_\delta A}{2}, \quad x_2 = \frac{x_1 + x_3}{2} = x_n.$$

Далее рассчитываются площади S_1 и S_2 (см. рис. 5.1). Если при текущем аргументе x_2 площади не равны, то соответствующая граница x_1 или x_3 переходит на значение аргумента x_2 и т.д. Расчет производится до тех пор, пока площади S_1 и S_2 не станут равными с точностью до 0,0001. Площади S_1 и S_2 можно вычислять любым существующим способом.

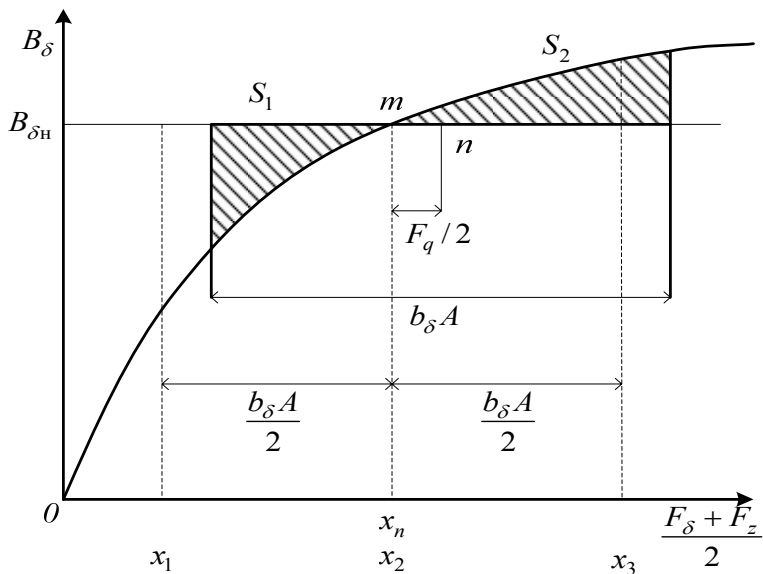
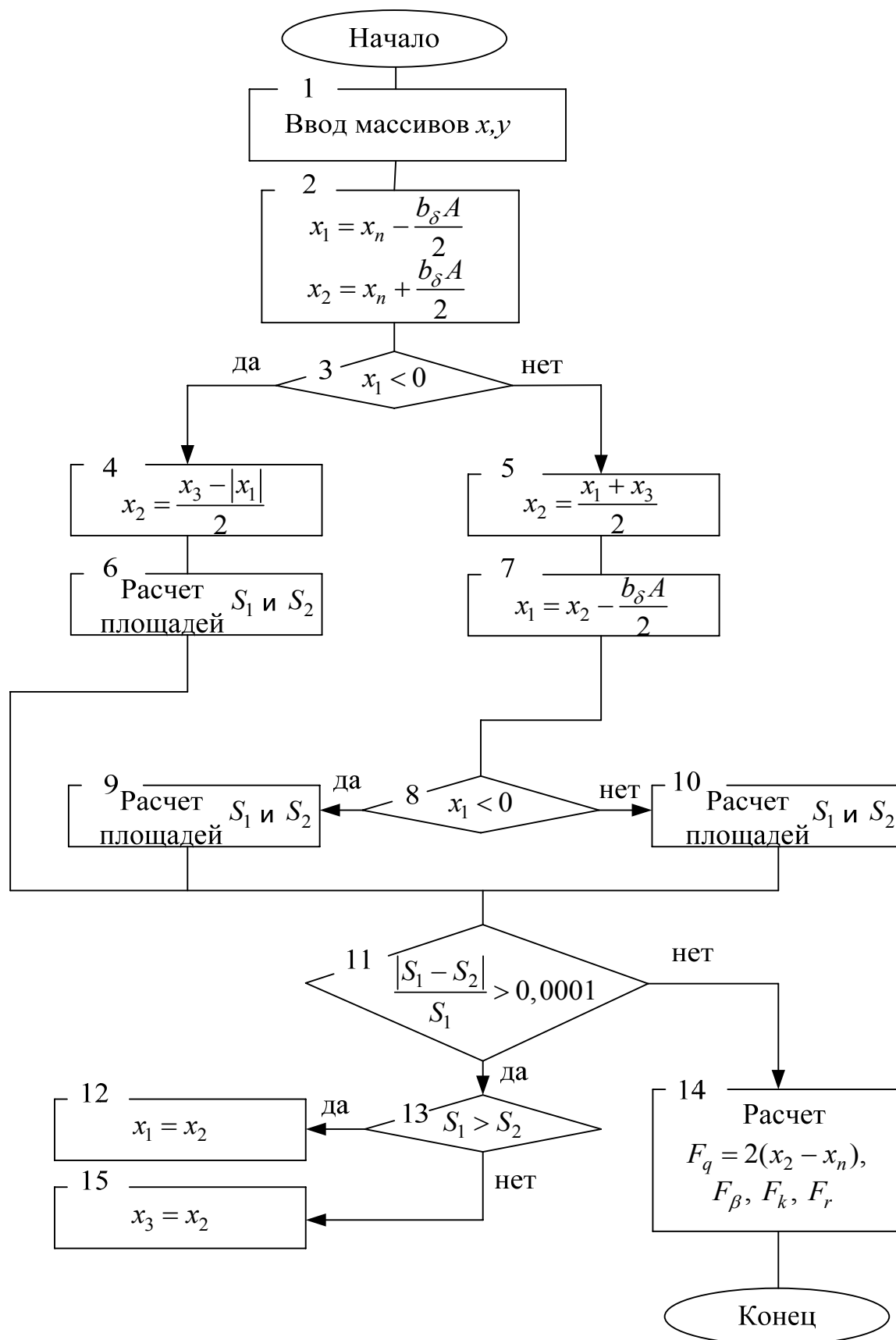


Рис. 5.1 Переходная характеристика

Блок-схема алгоритма определения поперечной составляющей МДС реакции якоря приведена ниже.



Приложения

Приложение 1

Нормальные линейные размеры (ГОСТ 8032–84)

Ряд *R5*: 1; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16 и т.д.

Ряд *R10*: 1; 1,2; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12 и т.д.

Ряд *R20*: 1; 1,1; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2; 2,2; 2,5; 2,8; 3,2; 3,6; 4; 4,5; 5; 5,6; 6,3; 7,1; 8; 9; 10; 11 и т.д.

Ряд *R40*: 1; 1,05; 1,1; 1,15; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2; 2,1; 2,2; 2,4; 2,5; 2,6; 2,8; 3; 3,2; 3,4; 3,6; 3,8; 4; 4,2; 4,5; 4,8; 5; 5,3; 5,6; 6; 6,3; 6,7; 7,1; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5 и т.д.

Приложение 2

Расчётные размеры круглых эмалированных проводов марок ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭМ-1, ПЭМ-2, ПЭВТЛ-1, ПЭВТЛ-2, ПЭТВ, ПЭТВ-ТС, ПЭТ-155

Таблица 2.1

Диаметр голого провода, мм	Максим. диаметр изолирован. провода, мм	Сечение голого провода, мм ²	Диаметр голого провода, мм	Максим. диаметр изолирован. провода, мм	Сечение голого провода, мм ²
0,1	0,13	0,00785	0,5	0,56	0,1963
0,112	0,14	0,00985	0,56	0,68	0,246
0,125	0,155	0,01227	0,6	0,69	0,283
0,14	0,17	0,01539	0,63	0,7	0,312
0,15	0,19	0,01767	0,71	0,79	0,396
0,16	0,2	0,0201	0,75	0,84	0,442
0,17	0,21	0,0227	0,8	0,89	0,503
0,18	0,22	0,0255	0,85	0,94	0,567
0,2	0,24	0,0314	0,9	0,99	0,636
0,224	0,28	0,0394	0,95	1,04	0,709
0,25	0,3	0,0491	1	1,11	0,785
0,28	0,33	0,0616	1,06	1,17	0,883
0,315	0,37	0,0779	1,12	1,23	0,985
0,335	0,4	0,0881	1,18	1,29	1,094
0,355	0,42	0,099	1,25	1,36	1,227
0,375	0,44	0,1104	1,32	1,43	1,368
0,4	0,46	0,1257	1,4	1,51	1,539
0,425	0,48	0,1419	1,5	1,61	1,767
0,45	0,51	0,159	1,6	1,71	2,011

Приложение 3

Рекомендуемые параметры и размеры щёток электрических машин

Таблица 3.1

Ширина по окоужн. коллектора $b_{щ}$, мм	Длина по оси коллектора $a_{щ}$, мм	Высота $h_{щ}$, мм	Ширина по окоужн. коллектора $b_{щ}$, мм	Длина по оси коллектора $a_{щ}$, мм	Высота $h_{щ}$, мм
1	1,6	6,3	4	5; 6,3	12,5
1,6	2,0	5; 6,3; 8; 10		5	10
	2,5	6,3 8; 10	10		6,3
2	3,2	6,3; 10		6,3	8
	4	10	10		16; 20; 25
2,5	3,2	8; 10	8	10	20; 25; 32
	4			12,5; 16; 20	25; 32
	5	12,5	10	12,5	25; 32
	6,3	12,5; 16		25	32; 40; 50
	10	32		40	40; 50
3,2	4	6,3; 8; 10; 12,5; 16			
	5	10; 12,5; 16			
	6,3	10; 12,5; 16; 20			

Рекомендуемые параметры щёток

Группа щёток	Марка щёток	Допустимая плотность тока $I_{щ}$, А/см ²	Падение напряжения на пару щёток $\Delta U_{щ}$, В	Максимальная окружная скорость v_k , м/с	Максимальный коэффициент трения	Удельное нажатие $P_{щ}$, Н/см ²
Угольно-графитовые	Т-6	6	2±0,5	10	0,3	1,96... 2,35
	Г-2	8	2 ±0,4	15	0,25	
Графитовые	Г-1	7	2,2±0,5	12	0,3	1,96...2,35
	Г-3	10	1,9±0,4	25	0,25	
	Г-8	11	1,9 ±0,4	25	0,25	
Электрографитные	ЭГ-2	10	2,7±0,6	25	0,25	1,96...3,92
	ЭГ-8	10	2,4±0,5	40	0,25	
	ЭГ-14	10	2,5±0,5	40	0,75	
Медно-графитовые	М-1	15	1,5±0,5	25	0,25	1,47... 1,96
	М-3	12	1,8±0,4	20	0,25	
	М-6	15	1,5±0,5	25	0,2	
	МГ	20	0,2 ±0,1	20	0,2	1,96... 2, 35
	МГ-4	15	1,1±0,5	20	0,2	
Бронзо-графитовые	БГ	20	0,3±0,1	20	0,25	1,68... 2,16

Кривые намагничивания сталей

B, Тл	H для сталей марок, А/м						Литая сталь, Ст.3, поковки
	1211, 1212, 1311	1411, 1412, 1413	1511, 1512, 1513	2013	2211, 2312	2411	
0,2	70	44	48	28	34	33	160
0,3	105	56	72	42	51	49	240
0,4	140	67	96	56	68	67	320
0,5	171	77	114	63	76	77	400
0,55	191	83	129	67	81	83	443
0,60	211	90	148	70	86	90	488
0,65	236	99	168	74	91	99	535
0,70	261	109	192	78	96	109	584
0,75	287	119	220	83	118	119	632
0,80	318	133	254	88	140	133	682
0,85	352	147	289	93	165	147	745
0,90	397	166	325	99	190	166	798
0,95	447	189	367	104	215	187	850
1,00	502	217	414	110	240	217	924
1,05	570	252	470	117	270	252	1004
1,10	647	298	538	125	300	295	1090
1,15	739	359	623	132	350	344	1187
1,20	843	444	730	141	400	399	1290
1,25	976	562	870	170	460	460	1430
1,30	1140	722	1080	200	550	585	1590
1,35	1340	960	1410	250	730	860	1810
1,40	1580	1410	1940	300	1000	1230	2090
1,45	1950	2140	2700	430	1300	1750	2440
1,50	2500	3140	3850	620	1600	2500	2890
1,55	3280	4420	5000	1130	2350	3540	3430
1,60	4370	5980	6700	1700	3400	5000	4100
1,65	5880	7930	9300	2500	4700	7120	4870
1,70	7780	10100	13000	3400	7700	10000	5700
1,75	10100	13700	18000	5000	10600	12500	–
1,80	12800	18100	23000	7000	13400	15600	–

Приложение 5

Удельные потери в листовой электротехнической стали
при $B = 1$ Тл и $f = 50$ Гц

Таблица 5.1

Марка стали	Толщина, мм	Потери, Вт/кг	Марка стали	Толщина, мм	Потери, Вт/кг
1211	1	5,8	1522	0,35	1,2
	0,5	5,3		0,5	1,4
1212	1	5,4	1513	0,5	1,25
	0,5	3,1	2011	0,5	3,5
1311	0,5	2,5	2012	0,5	2,9
1411	0,35	1,6	2013	0,5	2,5
	0,5	2	2211	0,5	2,5
1412	0,5	1,8	2312	0,5	1,75
1413	0,5	1,55	2411	0,5	1,6
1511	0,35	1,35			
	0,5	1,6			

Библиографический список

1. Метцлер, К. Расчет универсальных коллекторных двигателей / К. Метцлер. – М.; Л. : Госэнергоиздат, 1932. – 100 с.
2. Ермолин, Н.П. Электрические машины малой мощности / Н.П. Ермолин. – М.: Высшая школа, 1967. – 504 с.
3. Хрущёв, В.В. Электрические микромашины переменного тока для устройств автоматики / Н.П. Хрущев. – Л.: Энергия, 1969. – 286 с.
4. Столов, Л.И. О выборе геометрии микродвигателя постоянного тока / Л.И. Столов // Электричество. – 1968, №6.
5. Каасик, П.Ю. Расчет управляемых короткозамкнутых микродвигателей / П.Ю. Каасик, Е.Д. Несговорова, А.П. Борисов. – Л.: Энергоатомиздат, 1972.
6. Ермолин, Н.П. Расчёт коллекторных машин малой мощности / Н.П. Ермолин. – Л.: Энергия, 1973. – 214 с.
7. Хрущёв, В.В. Электрические машины систем автоматики / Н.П. Хрущев. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 364 с.
8. Лифанов, В.А. Расчёт исполнительных и моментных двигателей постоянного тока: учебное пособие / В.А. Лифанов, Г.Н. Мармелёв. – Челябинск: Изд-во ЧПИ. 1987. – 72 с.
9. Юферов, Ф.М. Электрические машины автоматических устройств / Ф.М. Юферов. – М.: Высшая школа, 1988. – 480 с.
10. Лопухина, Е.М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматики / Е.М. Лопухина. – М.: Высшая школа, 2002.
11. Тазов, Г.В. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности / Г.В. Тазов, В.В. Хрущёв. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 334 с.
12. Осин, И.Л. Электрические машины систем автоматики / И.Л. Осин, В.И. Юферов. – М.: Энергия, 2002.
13. Лопухина, Е.М. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности / Е.М. Лопухина, Г.А. Семенчуков. – М.: Высшая школа, 2002. – 512 с.
14. Лифанов, В.А. Электрические машины систем автоматики и бытовой технике/ В.А. Лифанов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 238 с.
15. Вольдек, А.И. Электрические машины: учебник для вузов / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
16. Копылов, И.П. Электрические машины: учебник для вузов / И.П. Копылов. – М.: Логос, 2000. – 608 с.

Оглавление

Глава 1

Общие вопросы проектирования электрических машин малой мощности

1.1. Роль электрических машин малой мощности (ЭМММ) в народном хозяйстве и предъявляемые к ним требования.....	3
1.2. Конструктивные особенности. Стандартизация и унификация.....	4
1.3. Роль технологии.....	7
1.4. Оценка качества и надежности ЭМММ	
1.4.1. Показатели качества.....	9
1.4.2. Оценка уровня качества.....	10
1.4.3. Основные понятия надежности.....	10
1.4.4. Показатели надежности ЭМММ.....	12
1.4.5. Причины и характер отказов ЭМММ.....	14
1.4.6. Сертификация.....	16
1.5. Общие сведения по расчёту ЭМММ	
1.5.1. Задачи и этапы проектирования ЭМММ.....	16
1.5.2. Содержание технического задания.....	17
1.6. Методы проектирования ЭМММ	
1.6.1. Энергетический метод проектирования.....	22
1.6.2. Параметрический метод проектирования ЭМММ.....	23
1.6.3. Особенности математического моделирования ЭМММ.....	24
1.7. Пазово-зубцовая зона микромашин переменного тока	
1.7.1. Выбор числа пазов статора и ротора неявнополюсных машин.....	25
1.7.2. Формы и размеры пазов статора и ротора.....	27
1.7.3. Оптимальные размеры активного слоя статора и ротора.....	30
1.8. Обмотки статора машин переменного тока малой мощности	
1.8.1. Виды обмоток статора.....	33
1.8.2. Частично двухслойная и синусная двухфазные обмотки.....	35

Глава 2

Расчёт микродвигателей постоянного тока с электромагнитным возбуждением

2.1. Определение основных размеров.....	41
2.2. Предварительные значения токов и ЭДС якоря микродвигателя...	45
2.3. Обмотка якоря.....	45
2.4. Пазово-зубцовая зона.....	47
2.5. Коллектор и щётки.....	52
2.6. Проверка коммутации.....	55
2.7. Расчёт магнитной цепи и характеристики холостого хода.....	56
2.8. Полная МДС возбуждения при нагрузке.....	59
2.9. Расчёт обмотки возбуждения.....	62
2.10. Потери и коэффициент полезного действия.....	64

2.11. Рабочие характеристики электродвигателя.....	65
2.12. Особенности расчёта исполнительных двигателей постоянного тока с зубчатым якорем	
2.12.1. Электромагнитные нагрузки и расчётно-конструктивные константы.....	67
2.12.2. Выбор основных размеров.....	68
2.13. Тепловой расчёт микродвигателя постоянного тока	
2.13.1. Общие замечания.....	71
2.13.2. Тепловая схема замещения якоря.....	72
2.13.3. Расчёт тепловых сопротивлений якоря.....	72
2.13.4. Превышение температуры обмотки якоря.....	74
2.13.5. Тепловая схема замещения катушки обмотки возбуждения...	74
2.13.6. Расчёт тепловых сопротивлений обмотки возбуждения.....	76
2.13.7. Превышение температуры обмотки возбуждения.....	77
2.13.8. Превышение температуры коллектора.....	77
Глава 3	
Расчет универсальных коллекторных микродвигателей	
3.1. Общие сведения.....	78
3.2. Определение основных размеров.....	78
3.3. Предварительные значения тока и ЭДС якоря при нагрузке.....	80
3.4. Якорь двигателя.....	80
3.5. Магнитопровод универсального коллекторного двигателя.....	82
3.6. Расчет обмотки возбуждения переменного тока.....	82
3.7. Векторная диаграмма и коэффициент мощности УКД.....	85
3.8. Расчет дополнительной обмотки возбуждения постоянного тока...	86
3.9. Потери и коэффициент полезного действия УКД.....	87
Глава 4	
Примеры расчёта электродвигателей постоянного тока	
4.1. Расчёт электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения	89
4.2. Расчёт электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения	100
Глава 5	
Алгоритм расчета универсального коллекторного двигателя	
5.1. Исходные данные расчета.....	111
5.2. Блок-схема алгоритма универсального коллекторного электродвигателя.....	112
5.3. Блок-схема алгоритма определения поперечной составляющей МДС реакции якоря.....	116
Приложения	
Приложение 1	
Нормальные линейные размеры (ГОСТ 8032–84).....	118

Приложение 2	
Расчётные размеры круглых эмалированных проводов марок ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭМ-1, ПЭМ-2, ПЭВТЛ-1, ПЭВТЛ-2, ПЭТВ, ПЭТВ-ТС, ПЭТ-155.....	119
Приложение 3	
Рекомендуемые параметры и размеры щеток электрических машин....	120
Приложение 4	
Кривые намагничивания сталей.....	122
Приложение 5	
Удельные потери в листовой электротехнической стали при $B = 1$ Тл и $f = 50$ Гц.....	123
Библиографический список.....	124