

**В.В. ТРОШИН**

**ТЕОРИЯ, КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ  
ЭЛЕКТРОСТАРТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ПУСКА  
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

**Учебное пособие**

**Самара**  
**Самарский государственный технический университет**  
**2011**



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

Кафедра «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

В.В. ТРОШИН

ТЕОРИЯ, КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ  
ЭЛЕКТРОСТАРТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ПУСКА  
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

*Учебное пособие*

Самара  
Самарский государственный технический университет  
2011

Печатается по решению редакционно-издательского совета СамГТУ

УДК 621.314.322  
629.113.066(075 3)  
Т 76

**Трошин В.В.**

**Т 76 Теория, конструкция и расчет электростартерной системы пуска двигателей внутреннего сгорания:** Учеб. пособие / *В.В.Трошин.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – 101 с.: ил.

Рассмотрены вопросы конструкции и принцип работы электростартерной системы пуска. Изложена методика расчета главных размеров стартерного электродвигателя, магнитной цепи, обмоток якоря и возбуждения и рабочих характеристик, определения размеров коллекторно-щеточного узла. Приводятся примеры расчета стартерного электродвигателя с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов.

В приложении приведены справочные данные, необходимые для выполнения расчета стартерного электродвигателя.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Дисциплина «Теория, конструкция и расчет электрооборудования автомобилей с классическим и гибридным приводом».

Рецензент – канд. техн. наук Л.Я. Макаровский

УДК 621.314.322  
629.113.066(075 3)  
Т 76

© В.В.Трошин, 2011  
© Самарский государственный  
технический университет, 2011

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время для пуска автомобильных двигателей используется электростартерная система пуска, включающая в себя аккумуляторную батарею, электродвигатель постоянного тока, электромагнитное тяговое реле, дополнительные реле, привод и редуктор. Электростартерная система пуска надежна в работе, обеспечивает легкое дистанционное управление и возможность автоматизации процесса пуска. Конструкция, принцип работы, техническое обслуживание и ремонт системы пуска достаточно хорошо изложены в ряде учебников и учебных пособий. Однако в процессе выполнения курсовых проектов и выпускных квалификационных работ у студентов, обучающихся по направлению 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», возникают некоторые затруднения при определении основных размеров и электромагнитном расчете современных электростартеров с возбуждением от постоянных магнитов и с встроенным планетарным редуктором.

В учебном пособии приведены рекомендации по выбору электромагнитных нагрузок, современных магнитных, изоляционных и проводниковых материалов, определяющих качество, надежность и габариты проектируемого электродвигателя. Даны методики расчета электродвигателей с различными системами возбуждения, приведены примеры расчета.

## ВВЕДЕНИЕ

Электрооборудование современных автомобилей и тракторов является сложным комплексом систем электроснабжения, пуска двигателя внутреннего сгорания, зажигания, комфорта, освещения, безопасности и ряда других.

Система пуска двигателя внутреннего сгорания является одной из основных и должна надежно работать в любых условиях эксплуатации автомобиля.

В настоящее время на большинстве автомобилей и тракторов применяется электростартерная система пуска двигателя внутреннего сгорания, состоящая из источника электрической энергии – аккумуляторной батареи, электромагнитного тягового реле, стартерного электродвигателя, механизма привода, редуктора, дополнительных реле и устройств облегчения пуска.

В качестве стартерного электродвигателя применяется электродвигатель постоянного тока с последовательным или смешанным электромагнитным возбуждением. В последнее время в системах электростартерного пуска стали широко использовать двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и встроенным планетарным редуктором, что позволило значительно уменьшить габариты и вес электростартера.

В учебном пособии последовательно изложена методика определения основных размеров стартерного электродвигателя с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов, даны рекомендации по выбору электромагнитных нагрузок, определению основных размеров электродвигателя, расчету обмоток и рабочих характеристик.

Учебное пособие предназначено для студентов направления 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», изучающих дисциплину «Теория, конструкция и расчет электрооборудования автомобилей и тракторов» и выполняющих курсовые и выпускные квалификационные работы, а также будет полезно для специалистов.

# 1. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСТАРТЕРОВ

Электростартерная система пуска стала применяться на автомобилях с 1925 г. Современная электростартерная система состоит из источника электрической энергии (аккумуляторной батареи), электродвигателя постоянного тока, преобразующего электрическую энергию в механическую, механизма привода, обеспечивающего ввод и удержание шестерни стартера в зацеплении с маховиком двигателя, передачу вращающего момента коленчатому валу и предохранение якоря электродвигателя от разгона после успешного пуска двигателя. В схеме дистанционного и автоматического управления электростартером применяются дополнительные реле, а при эксплуатации в районах холодного климата – устройства для облегчения пуска.

Основным элементом системы пуска является электростартер. Согласно ГОСТ Р 52230-2004 «Электрооборудование автотракторное» изделия электрооборудования должны обеспечивать номинальные значения параметров при нормальных значениях климатических факторов внешней среды: температуре окружающего воздуха ( $25\pm 10$ ) °С, относительной влажности от 45 до 80% и атмосферном давлении от 84,0 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм рт.ст.). Номинальное напряжение системы электрооборудования следует выбирать из ряда 6, 12, 24 В. Номинальная мощность электростартеров – это наибольшая полезная мощность на валу. Электростартеры работают в кратковременном номинальном режиме. Это режим, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения. При этом периоды нагрузки не настолько длительны, чтобы превышение температуры всех его частей, при неизменной температуре окружающей среды, могло достичь установившихся значений, а периоды отключения достаточно длительны для охлаждения всех частей до практически холодного состояния. Длительность включения электростартера – до 10-15 с, а период отключения – не менее 30 с. Допускается не более трех циклов включения-выключения электростартера подряд.

Степень защиты электростартеров от проникновения посторонних тел и воды должна соответствовать ГОСТ 14254 «Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP)», и должна быть не ниже IP 04.

Автотракторное электрооборудование условно обозначается рядом цифр 0000.0000, где первые два знака обозначают порядковый номер модели, третий знак – модификацию изделия, четвертый – исполнение (для умеренной климатической зоны – 3). Четыре цифры после точки обозначают тип подгруппы (для стартеров и выключателей стартеров 3708).

На рис. 1.1 представлен электростартер с электромагнитным возбуждением СТ221. Механизм привода состоит из шестерни 1, муфты свободного хода 2, рычага включения привода 3 и тягового реле 5. Тяговое реле крепится болтами к крышке стартера со стороны привода 4. Крышка со стороны привода изготавливается методом литья из чугуна, сплавов алюминия или цинка. Крышка со стороны коллектора 7 может изготавливаться методом штамповки из стали. В крышках запрессованы бронзографитовые или порошковые вкладыши подшипников скольжения, в которых вращается вал якоря 8. Крышки соединяются с корпусом стартера 12 стяжными шпильками. Корпус стартера изготавливается из трубы или стальной полосы с последующей сваркой стыка. Сердечник якоря электродвигателя набирается из листов стали (08 КП или сталь 10) толщиной 1-1,2 мм. Для предохранения изоляции обмотки крайние листы пакета якоря изготавливаются из электроизоляционного картона. В пазы якоря укладывается обмотка якоря из круглого или прямоугольного обмоточного медного провода. Концы секций обмотки якоря укладывают в прорези петушков коллектора 6 и соединяют с коллекторными ламелями пайкой или чеканят. В стартерах применяются и цилиндрические, и торцовые коллекторы. Торцовые коллекторы имеют меньший осевой размер. Непосредственно к коллекторной крышке или к траверсе заклепками и винтами прикреплены щеткодержатели. Щеткодержатели изолированных щеток отделены от крышек прокладками из текстолита или другого изоляционного материала. В стартерах применяют меднографитовые щетки с добавлением олова и свинца.

Все автомобильные стартеры выполняются четырехполюсными. Полюсы  $11$  крепятся к корпусу стартера болтами. Полюсы изготавливаются из стали  $10$  штамповкой или из профиля соответствующего размера. На полюсах размещаются катушки обмотки возбуждения. На рис. 1.2 представлены схемы внутренних соединений электростартеров. Катушки последовательного возбуждения могут соединяться между собой последовательно ( $a_c=1$ ), попарно параллельно ( $a_c=2$ ) или параллельно ( $a_c=4$ ). Катушки последовательного возбуждения имеют несколько витков из медного прямоугольного провода, а катушки независимого возбуждения – большое количество витков из круглого обмоточного провода небольшого сечения.

В последние годы электростартеры мощностью до 2 кВт производятся с постоянными магнитами высокой энергии, изготовленными из порошка марки «неодим – железо – бор», и встроенным планетарным редуктором. Постоянные магниты необходимых размеров и формы изготавливаются методом спекания или прессования. Конструкция такого стартера представлена на рис. 1.3. Применение постоянных магнитов и планетарного редуктора позволило уменьшить размеры и вес стартера на 40-50% по сравнению со стартером обычной конструкции такой же мощности [2].

Стартерный электродвигатель получает питание от аккумуляторной батареи GB (рис. 1.4). При замыкании ключа зажигания  $S$  напряжение подается на втягивающую и удерживающую катушки тягового реле непосредственно (рис. 1.4, *а*) или через дополнительное реле (рис. 1.4, *б*). Якорь тягового реле притягивается к сердечнику электромагнита и с помощью рычага вводит шестерню электростартера в зацепление с зубчатым венцом маховика двигателя. В конце хода якоря замыкаются силовые контакты  $K$  тягового реле, электродвигатель получает питание и приводит во вращение коленчатый вал двигателя. После пуска двигателя муфта свободного хода  $2$  (см. рис. 1.1) предотвращает передачу вращающего момента от маховика двигателя к якорю электродвигателя стартера. При размыкании ключа  $S$  втягивающая и удерживающая катушки тягового реле оказываются включенными к аккумуляторной ба-



таре последовательно через силовые контакты К и создающими противоположно направленными магнитными потоками.

Сердечник тягового реле размагничивается, возвратная пружина тягового реле перемещает якорь в исходное состояние, шестерня электростартера выходит из зацепления с зубчатым венцом маховика, а силовые контакты К размыкаются.

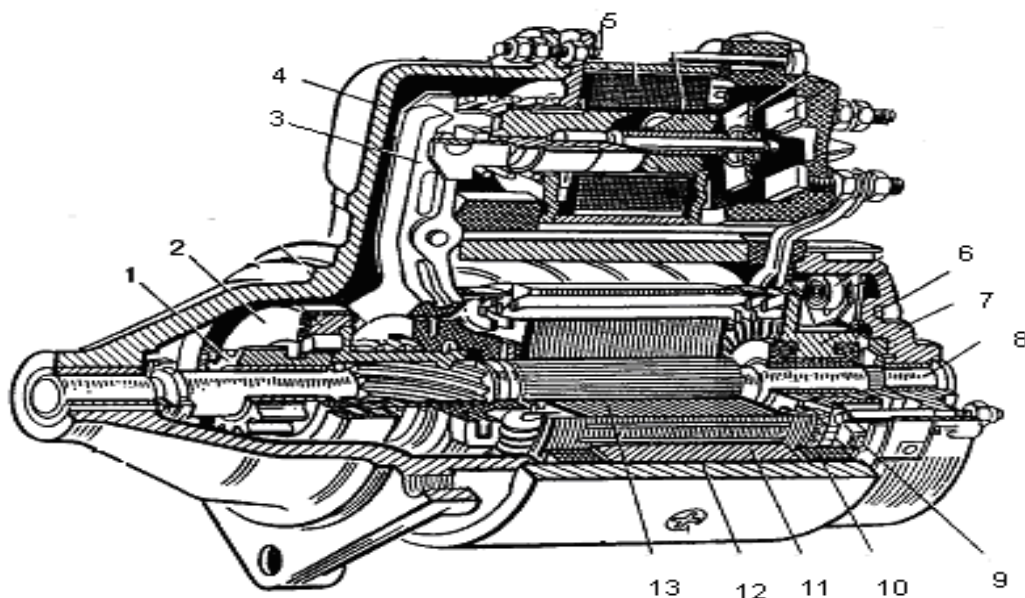


Рис. 1.1. Электростартер с электромагнитным возбуждением:

1 – шестерня привода; 2 – муфта свободного хода; 3 – рычаг включения привода; 4 – крышка со стороны привода; 5 – тяговое реле; 6 – коллектор; 7 – крышка со стороны коллектора; 8 – вал якоря; 9 – щетка; 10 – катушка обмотки возбуждения; 11 – полюс; 12 – корпус стартера; 13 – якорь электродвигателя

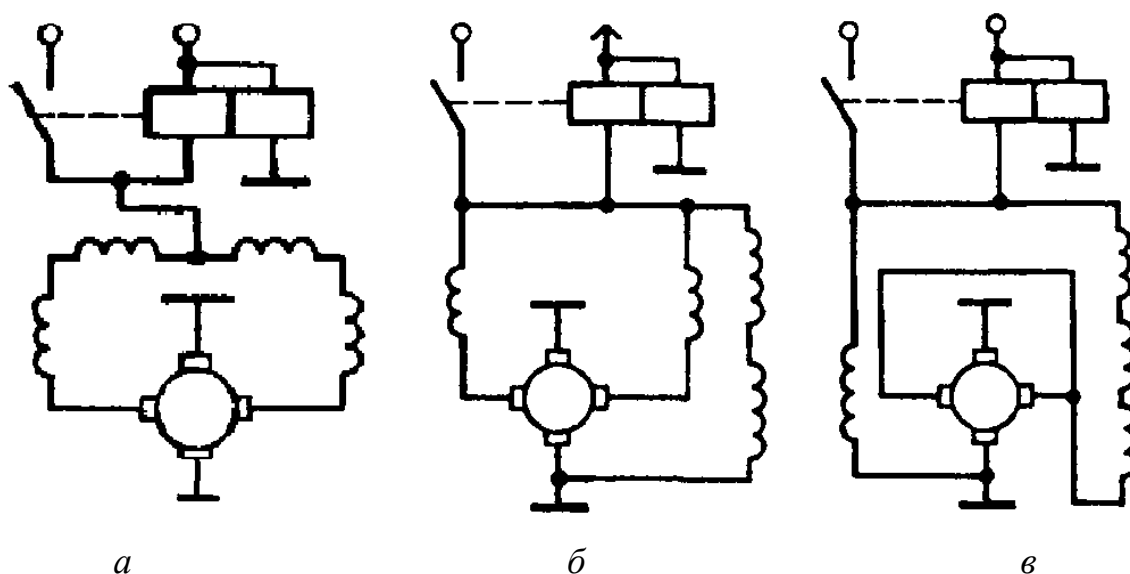
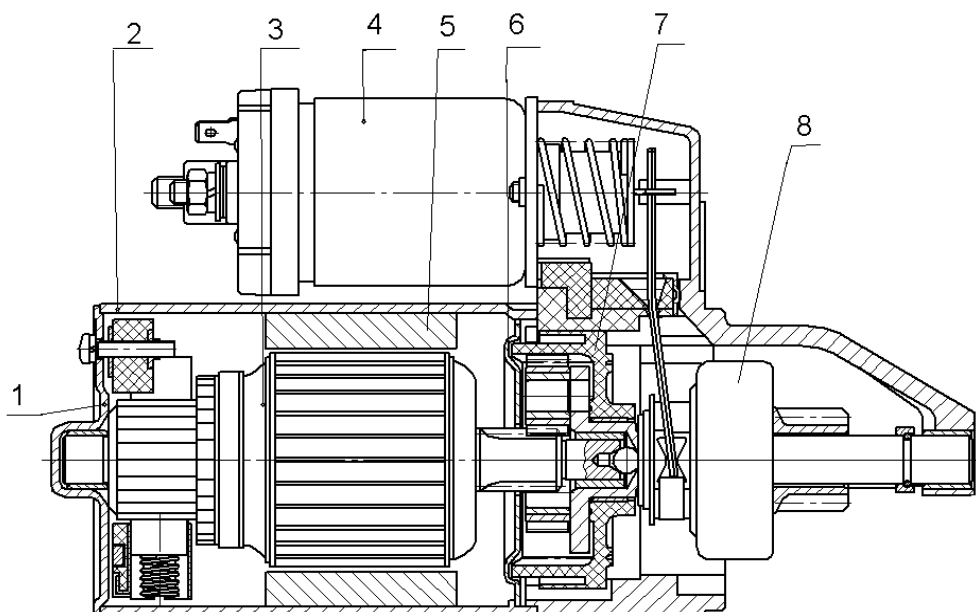


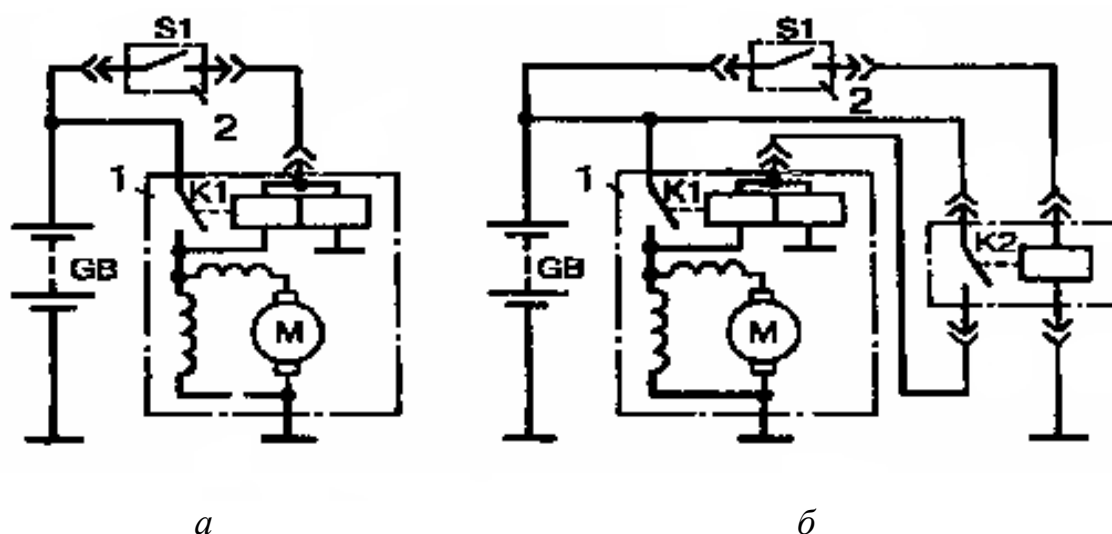
Рис. 1.2. Схемы внутренних соединений электростартеров:

1 – с последовательным возбуждением; 2, 3 – со смешанным возбуждением



*Рис. 1.3.* Электростартер с планетарным редуктором и возбуждением от постоянных магнитов:

- 1 – крышка со стороны коллектора; 2 – корпус стартера; 3 – якорь электродвигателя;  
 4 – тяговое реле; 5 – постоянные магниты; 6 – промежуточная опора;  
 7 – планетарный редуктор; 8 – муфта свободного хода



*Рис. 1.4.* Схемы управления электростартерами:  
 1 – без дополнительного реле; 2 – с дополнительным реле

В настоящее время большое применение получают совмещенные электромеханические преобразователи – стартер-генераторы (СТГ). Применение СТГ на автомобилях позволяет улучшить ряд характеристик [4].

Замена двух электрических машин, стартера и генератора, одной СТГ снижает массу и габариты установки и ее стоимость. За счет меньшего числа составляющих элементов СТГ и сохранения работо-

способности при отказе электрической машины или двигателя внутреннего сгорания повышается надежность и безопасность автомобиля.

Для снижения выброса в атмосферу вредных веществ при частых остановках в городских условиях движения современные автомобили оснащаются системой «СТОП-СТАРТ». Эта система автоматически отключает двигатель внутреннего сгорания при остановке автомобиля и включает его при трогании с места. Эксплуатация автомобиля в режиме «СТОП-СТАРТ» снижает и расход топлива.

В зависимости от места установки и способа сочленения с коленчатым валом СТГ можно разделить на безредукторные и редукторные.

За рубежом одним из первых разработан безредукторный СТГ с асинхронной машиной и транзисторным инвертором напряжения (фирма «БОШ»). За счет применения двух сцеплений и маховика удалось уменьшить габариты электрической машины и ток в стартерном режиме работы, но наличие двух сцеплений снижает надежность установки.

Отечественный безредукторный СТГ для автомобиля «Москвич» имеет большие габаритные размеры и значительный вес, что затрудняет его размещение в картере сцепления.

С целью уменьшения габаритов и массы СТГ сочленяют с коленчатым валом двигателя внутреннего сгорания через редуктор. В большинстве разработанных конструкций применяется планетарный редуктор с изменением коэффициента передачи при переходе в генераторный режим работы. Однако конструкция таких редукторов сложна.

Уменьшение габаритов электрической машины и величины тока в стартерном режиме работы достигается применением СТГ с напряжением выше напряжения бортовой сети автомобиля. В этом случае предусматривается два напряжения бортовой сети. Связь между двумя накопителями электрической энергии и управление СТГ осуществляются электронной системой.

Безредукторный СТГ напряжением 42 В с асинхронной электрической машиной и управляющим полупроводниковым модулем, проект которого разработан фирмами Continental и BMW AG, развивает максимальный пусковой момент 200 Нм в стартерном режиме работы

и максимальную мощность в генераторном режиме работы 2 кВт на 14 В и 2,2 кВт на 42 В.

В безредукторных СТГ могут применяться синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов. Возможны две конструкции синхронных СТГ – с внутренним ротором и с внешним ротором. Синхронный СТГ с внешним ротором имеет преимущества – более простое и надежное крепление магнитов на роторе и хорошее охлаждение.

Все выше описанные СТГ предназначены для автомобилей с обычным приводом колес от двигателя внутреннего сгорания. Для таких автомобилей мощности двух электрических машин – стартера и генератора – почти одинаковы по величине.

Габаритные размеры, массу магнитных и проводниковых материалов и мощность СТГ в этом случае определяют исходя из условия надежного пуска двигателя внутреннего сгорания. Частота вращения СТГ в стартерном режиме работы во много раз ниже частоты вращения в режиме генератора. Следовательно, мощность СТГ в генераторном режиме работы будет в несколько раз больше мощности, на которую он рассчитан для работы в режиме стартера.

Все более жесткие экологические и экономические требования к автомобилям, а также требования повышения безопасности и комфорта привели к созданию электромобилей и автомобилей с гибридным приводом.

В электромобиле СТГ рассчитывается на основной режим работы – режим тягового двигателя, питаемого от аккумуляторной батареи. При торможении автомобиля СТГ переводится в генераторный режим и рекуперирует электрическую энергию в аккумуляторную батарею. На автомобиле может быть установлено несколько СТГ суммарной мощностью до 100 кВт и больше.

Основной недостаток электромобилей – это необходимость длительного заряда аккумуляторной батареи и отсутствие сети зарядных станций для них.

В последнее десятилетие многими фирмами созданы и серийно выпускаются автомобили с гибридным приводом, которые могут

приводиться в движение от электродвигателя или от двигателя внутреннего сгорания или от обоих одновременно. Мощность электрических машин, установленных на автомобиле с гибридным приводом, составляет сотни кВт.

В качестве тяговых электродвигателей и стартер-генераторов в автомобилях с гибридным приводом используются бесконтактные асинхронные или синхронные машины с постоянными магнитами, работающие от инверторов. С целью уменьшения габаритов они могут выполняться со встроенным редуктором и иметь водяное охлаждение.

Серийно выпускаемый автомобиль Lexus RX 400h оснащен двигателем внутреннего сгорания мощностью 155 кВт, передним электродвигателем мощностью 123 кВт, задним электродвигателем мощностью 50 кВт и генераторной установкой мощностью 109 кВт. Напряжение генераторной установки и электродвигателей достигает 650 В, а напряжение аккумуляторной батареи мощностью 45 кВт равно 288 В.

В обычных условиях автомобиль трогается с места и движется с малой скоростью за счет электродвигателей, используя энергию аккумуляторной батареи. При разгоне включается бензиновый двигатель и могут включаться вместе с ним электродвигатели, повышая общую мощность. При движении с крейсерской скоростью работает двигатель внутреннего сгорания, при этом часть мощности двигателя расходуется на привод генератора, питающего аккумуляторную батарею. При торможении электродвигатели переводятся в генераторный режим работы и возвращают электроэнергию в аккумуляторную батарею. Совместная работа двигателя внутреннего сгорания двух электродвигателей регулируется интеллектуальной системой Hybrid Synergy Drive.

Проектирование электрических машин автомобилей с гибридным приводом ведется по условиям их эксплуатации в основном режиме работы. С целью уменьшения габаритов электрических машин и снижения потерь электроэнергии в обмотках и преобразователях напряжение силовой сети необходимо увеличивать до сотен вольт.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каковы основные этапы развития автомобильной системы пуска?
2. Какие технические требования предъявляются к системе пуска?
3. Какие электрические схемные решения системы возбуждения электродвигателя применяются в настоящее время?
4. Из каких основных узлов состоит стартерный электродвигатель и каково их функциональное назначение?
6. Применяется ли в электростартерах система возбуждения от постоянных магнитов?
7. Каковы перспективы применения совмещенных электромеханических преобразователей – стартер-генераторных установок?

## 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА СТАРТЕРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Исходными данными для проектирования стартерного электродвигателя являются номинальная мощность  $P_{2н}$  и номинальная частота вращения шестерни привода стартера  $n_n$ .

### 2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МОЩНОСТИ СТАРТЕРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И НОМИНАЛЬНОЙ ЕМКОСТИ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

Расчетная электромагнитная мощность, Вт,

$$P_э = \frac{P_{2н}}{\eta_{эм}}, \quad (2.1)$$

где  $\eta_{эм}$  – *электромагнитный* КПД, учитывающий наличие магнитных и механических потерь в электродвигателе (рис. 2.1).

Расчетная величина ЭДС в обмотке якоря, В,

$$E_a = (U_n - \Delta U_{щ})(1 - k), \quad (2.2)$$

где  $\Delta U_{щ} = (1 - 2)В$  – падение напряжения в щеточном контакте;  $k$  – отношение тока якоря в режиме номинальной мощности к току якоря в режиме полного торможения.

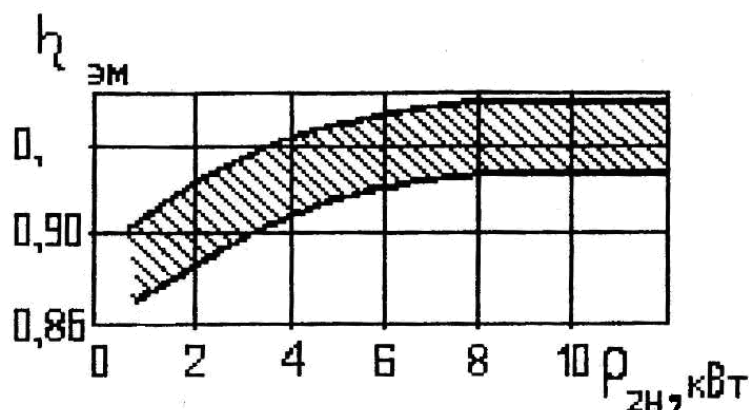


Рис. 2.1. Зависимость электромагнитного КПД стартерных электродвигателей от номинальной мощности  $P_{2н}$

Ток в расчетном режиме работы, А

$$I_a = P_э / E_a = P_э / [(U_n - \Delta U_{ц}) (1 - k)]. \quad (2.3)$$

Суммарное сопротивление цепи якоря, Ом,

$$\Sigma R_a = (U_n - \Delta U_{ц})^2 (1 - k) k / P_э. \quad (2.4)$$

Максимальная электромагнитная мощность, Вт,

$$P_{эм} = P_{2н} / [4k(1 - k)\eta_{эм}]. \quad (2.5)$$

Расчетные величины в режиме максимальной электромагнитной мощности:

– ЭДС

$$E_{ам} = 0,5(U_n - \Delta U_{ц}), \text{ В}; \quad (2.6)$$

– ток якоря

$$I_{ам} = I_a / (2k), \text{ А}; \quad (2.7)$$

– суммарное сопротивление цепи якоря

$$\Sigma R_{ам} = (U_n - \Delta U_{ц})^2 / (4P_{эм}), \text{ Ом}. \quad (2.8)$$

При насыщенной магнитной системе частота вращения якоря в режиме максимальной мощности, об/мин,

$$n_m = 0,5n_n / (1 - k). \quad (2.9)$$

Номинальную емкость аккумуляторной батареи определяют по рис. 2.2 и округляют до ближайшего большего значения по ГОСТ 959.0-84, а ее тип выбирают по табл. П1.

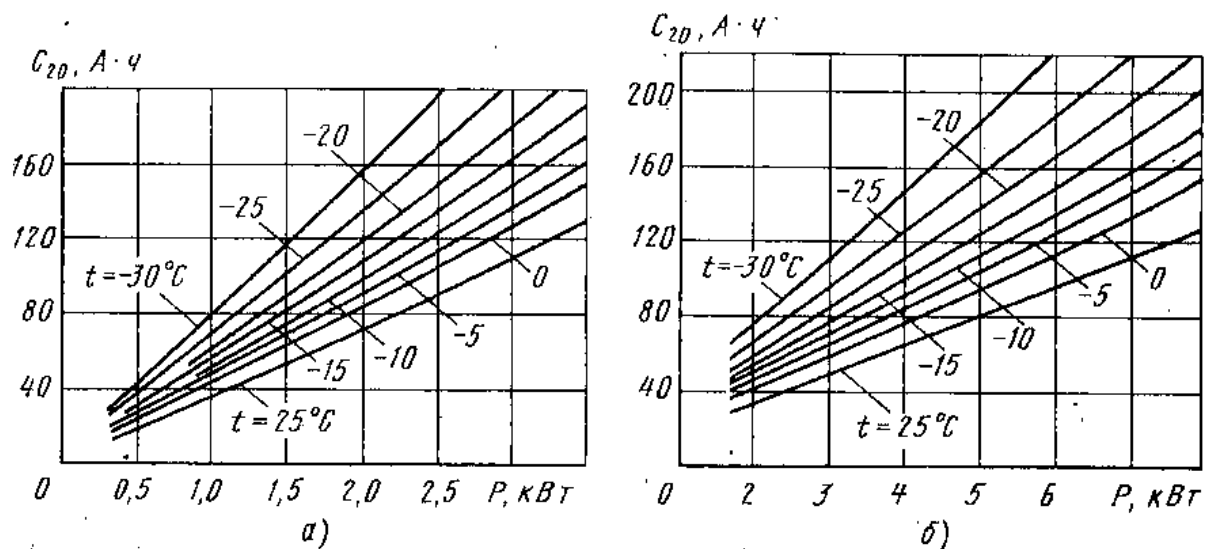


Рис. 2.2. Зависимость номинальной емкости аккумуляторных батарей от расчетной электромагнитной мощности для систем электростартерного пуска минимальной массы при различных условиях пуска:  
 а – номинальное напряжение 12 В; б – номинальное напряжение 24 В

Сопротивление батареи  $R_{\delta}$  рассчитывают с учетом температуры электролита, степени заряженности и порядкового номера попытки пуска. При расчете стартерного электродвигателя на заданную номинальную мощность (при температуре 25 °С) сопротивление аккумуляторной батареи принимают равным

$$R_{\delta} = \frac{a_{\delta} U_n}{C_{20}}, \quad (2.10)$$

где  $a_{\delta}$  – коэффициент аппроксимации вольтамперной характеристики батареи, определяется из табл. П2.

## 2.2. ГЛАВНЫЕ РАЗМЕРЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Совершенство конструкции электродвигателя зависит от правильного выбора диаметра  $D_a$  и длины  $l_a$  пакета якоря.

Для расчета  $D_a$  и  $l_a$  используют уравнение

$$D_a^2 l_a = 6,1 P_s / (B_{\delta} A \alpha_{\delta} n), \quad (2.11)$$

где  $B_{\delta}$  – расчетная индукция в воздушном зазоре, Тл;

$A$  – линейная нагрузка якоря, А/м;

$\alpha_{\delta}$  – коэффициент полюсного перекрытия.



Найденные из рис. 2.4 значения  $A$  и  $B_8$  следует рассматривать как предварительные. В дальнейшем расчете при необходимости их можно изменить. При этом следует иметь в виду, что в зависимости от выбора  $A$  и  $B_8$  изменяется активный объем  $D_a^2 l_8$  проектируемой машины. Чем больше произведение  $AB_8$ , тем меньший объем будет иметь машина. Однако как  $A$ , так и  $B_8$  имеют свои верхние пределы.

Основным фактором, ограничивающим линейную нагрузку, является нагрев обмотки, так как с возрастанием  $A$  в ней увеличиваются электрические потери. Допустимое значение линейной нагрузки зависит от класса нагревостойкости применяемой изоляции, а также от конструктивного выполнения машины и, прежде всего, от способов ее охлаждения.

Диаметры якорей стартерных электродвигателей в зависимости от  $Q = 0,5P_3 / kn_n$  приведены на рис. 2.3. Если  $Q$  превышает графические значения, то рекомендуется изменить напряжение в исходных данных.

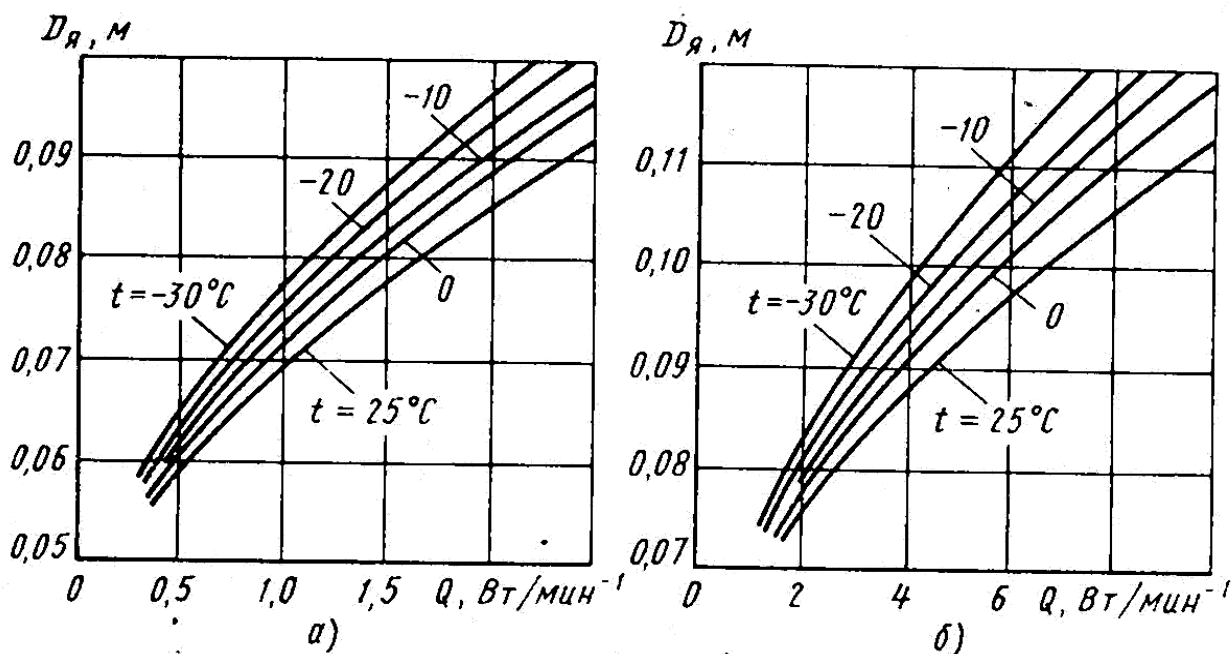


Рис. 2.3. Зависимости диаметра якоря стартерных электродвигателей от  $Q$  при различных температурах:

$a$  – номинальное напряжение 12В;  $b$  – номинальное напряжение 24В

Рекомендуемые для стартерных электродвигателей значения  $A$ ,  $B_\delta$ ,  $\alpha_\delta$  представлены на рис. 2.4, а, б и в.

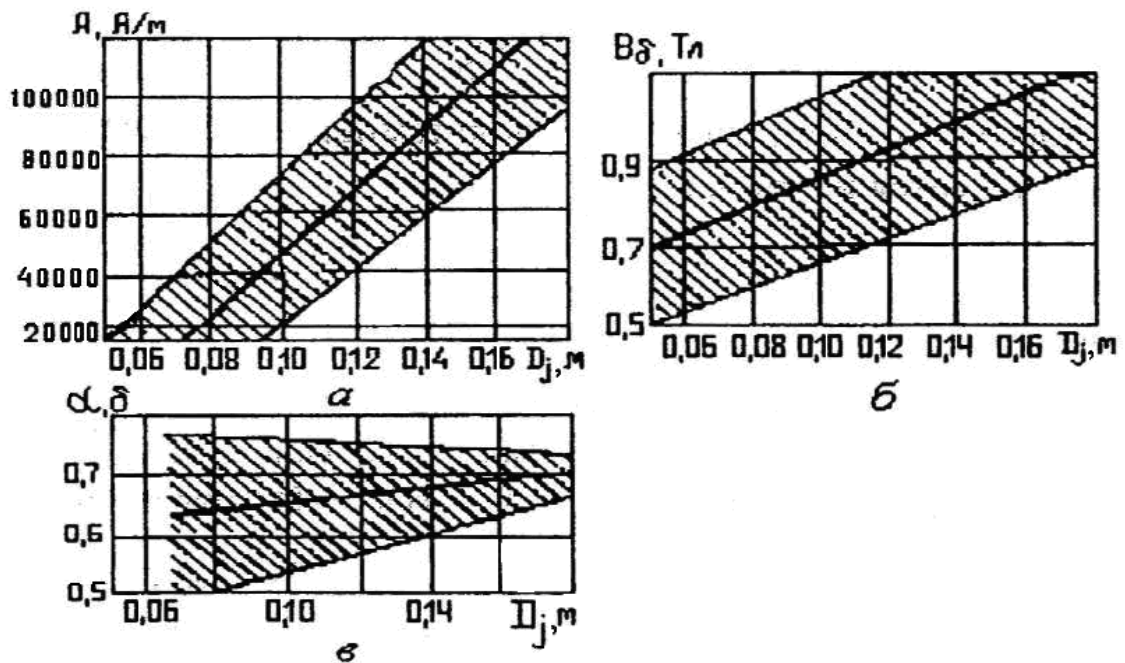


Рис. 2.4. Зависимость электромагнитных нагрузок стартерных электродвигателей от диаметра корпуса

Наружный диаметр корпуса  $D_j$  определяется из соотношения

$$D_j = (1,45 \dots 1,65) D_a.$$

Рекомендованные значения  $D_j$  выбираются в соответствии с табл. П14.

Из уравнения (2.11) определяем длину пакета якоря, м:

$$l_a = \frac{6,1 P_s}{B_\delta A \alpha_\delta n D_a^2}. \quad (2.12)$$

### 2.3. ОБМОТОЧНЫЕ ДАННЫЕ ЯКОРЯ

Основной магнитный поток, Вб,

$$\Phi = \alpha_\delta \tau l_a B_\delta, \quad (2.13)$$

где  $\tau = \pi D_a / (2p)$  – полюсное деление, м;

$p$  – число пар полюсов ( $p=2$ ).

Число проводников обмотки якоря предварительно

$$N' = 60aE_a / (pn\Phi), \quad (2.14)$$

где  $a$  – число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

Число пазов якоря  $Z$  в четырехполюсных стартерных электродвигателях должно быть нечетным (в пределах 19...31).

Число витков в секции обмотки якоря предварительно

$$W_c = 0,5N' / Z. \quad (2.15)$$

Принимая число витков в секции 1 или 2, уточняют число проводников, линейную нагрузку, длину пакета якоря и величину магнитного потока по формулам:

$$N_{ym} = 2w_{c,ym} Z;$$

$$A_{ym} = \frac{N_{ym} I_a}{2a\pi D_a};$$

$$l_{a,ym} = \frac{6,1P_s}{B_\delta A_{ym} \alpha_\delta n D_a^2}$$

$$\Phi_{ym} = \alpha_\delta \tau l_{a,ym} B_\delta.$$

Поскольку расчетное число витков в секции может существенно отличаться от чисел 1 или 2, то разность между ранее выбранным и уточненным значениями линейной нагрузки оказывается довольно значительной. Поэтому после окончательного выбора величины  $l_a$  необходимо проверить отношение длины к диаметру  $l_a / D_a$ , которое для стартерных электродвигателей составляет 0,75... 1,25. Если отношение  $l_a / D_a$  выходит за рекомендуемые пределы, меняют величину магнитной индукции  $B_\delta$  или диаметр пакета якоря.

Обмотка якоря стартерных электродвигателей выполняется простой волновой с числом параллельных пар  $a = 1$ .

При этом принимается, что

$$Z = K = S,$$

где  $K$  – число коллекторных пластин;

$S$  – число секций обмотки.

Для простой волновой обмотки результирующий шаг по якорю и коллектору

$$y = y_k = \frac{K \pm 1}{p}.$$

Для неперекрещенной обмотки в числителе следует ставить знак «-».

Первый частичный шаг обмотки по якорю

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon$$

должен быть равен целому числу, где  $\varepsilon$  – правильная дробь, которую необходимо вычесть или добавить к числу  $Z/2p$ , чтобы выполнялось условие целочисленности  $y_1$  (желательно выполнять шаг сокращенным).

Второй частичный шаг обмотки по якорю

$$y_2 = y - y_1.$$

Суммарное сопротивление обмотки якоря и последовательной обмотки возбуждения, Ом,

$$R_{cm} = R_a + R_c = \Sigma R_a - R_\delta - R_{np}. \quad (2.16)$$

Сопротивление соединительных проводов от аккумуляторной батареи до электродвигателя  $R_{np} = 0,002$  Ом.

Сопротивление обмотки якоря

$$R_a = (0,45 \dots 0,65) R_{cm}, \text{ Ом.}$$

Сечение проводников обмотки якоря,  $\text{м}^2$ ,

$$S_a = \frac{k_t \rho L_{a\text{cp}} N}{2a R_a^*} = \frac{k_t \rho L_{a\text{cp}} N}{(2a)^2 R_a}, \quad (2.17)$$

где  $k_t$  – коэффициент, учитывающий изменение сопротивления обмотки якоря при изменении температуры, равный  $1 + 0,004 (t_a - 20 \text{ }^\circ\text{C})$ ;

$t_a$  – температура проводников обмотки якоря,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

$\rho = 0,0178 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$  – удельное сопротивление материала проводов при температуре  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

$L_{a\text{cp}}$  – средняя длина проводника, равная  $l_a + (1,2 \dots 1,4)\tau$ , м;

$R_a^*$  – сопротивление одной параллельной ветви обмотки якоря, равное  $2aR_a$ , Ом.

По расчетной площади сечения проводников обмотки якоря для одновитковых секций выбирают круглый провод марки ПЭТВ (табл. П3) или прямоугольный провод марки ПММ размером проволоки по большей стороне  $b$  и по меньшей стороне  $a$  (табл. П4) с учетом рекомендуемого соотношения

$$a/b = 0,05 + 10,4/Z + 14 / Z^2. \quad (2.18)$$

По технологическим требованиям отношение  $a/b$  должно находиться в пределах 0,33...0,73.

Для двухвитковых секций по табл. П3 определяют диаметр круглого обмоточного провода.

Плотность тока в проводниках обмотки якоря

$$j_a = I_a / (2aS_a) \quad (2.19)$$

не должна превышать 30 А /мм<sup>2</sup> (табл. 2.1).

Таблица 2.1

**Плотность тона в обмотке якоря**

$P_{2н}$ , кВт	до 0,7	1...1,8	1,8...4,5	4,5...6	6...8	10
$j_a$ , А/мм <sup>2</sup>	12...18	16...18	18...22	19...26	22...26	24...28

## 2.4. РАЗМЕРЫ ЗУБЦОВО-ПАЗОВОЙ ЗОНЫ ЯКОРЯ

Форму и размеры паза выбирают из условия максимального заполнения, при этом магнитная индукция в минимальном сечении зубца должна быть 1,8...3,0 Тл (большие значения магнитной индукции относятся к стартерам большей мощности).

Радиус закругления провода

$$r_{нрс} = \sqrt{ab - S_a}, \text{ м.} \quad (2.20)$$

В пазах якоря укладывают одно- или двухвитковые секции простой волновой обмотки (рис. 2.5). Двухвитковые секции применяются в стартерных электродвигателях небольшой мощности. Проводники одновитковых секций изолируют друг от друга и от пакета якоря, а

двухвитковых секций – от пакета якоря изоляционным картоном толщиной  $\Delta_a = (0,2...0,4)$  мм.

Ширина паза  $b_{пз} = a + 2(\Delta_a + 0,0003)$ , м.

Ширина шлица (прорези) паза

$$a_{ш} = 0,6a, \text{ м.}$$

Максимальный диаметр среднего (второго) участка зубцовой зоны

$$D_{2\max} = D_a - 2(h_{ш} + 0,5\sqrt{b_{пз}^2 - a_{ш}^2}), \text{ м,} \quad (2.21)$$

где высота шлица  $h_{ш} = 0,001$  м.

Высота второго участка зубцовой зоны

$$h_2 = b_{пз} + 2b - 4r_{пр} - 0,0003 - 0,0566\sqrt{b_{пз} - 2r_{пр} - 0,001}, \text{ м.} \quad (2.22)$$

Минимальный диаметр второго участка зубцовой зоны

$$D_{2\min} = D_{2\max} - 2h_2, \text{ м.} \quad (2.23)$$

Расстояние между проводниками в пазу

$$l = h_2 - 2(b - OX), \text{ м,} \quad (2.24)$$

где  $OX = KN + KF = KN + r_{пр}$ , м;

$$KN = \sqrt{OK^2 - ON^2}, \text{ м;}$$

$$OK = 0,5b_{пз} - \Delta_a - r_{пр} - 0,0001, \text{ м;}$$

$$ON = 0,5a - r_{пр}, \text{ м.}$$

Минимальный диаметр зубцовой зоны

$$D_{a\min} = D_{2\min} - b_{пз}, \text{ м.} \quad (2.25)$$

Грушевидные пазы якоря выбираются при числе витков якоря больше двух и проводе круглого сечения. Зубцы при грушевидной форме паза выполняются с одинаковым по высоте сечением (рис. 2.5, б).

Ширина шлица  $b_{ш}$  принимается больше суммы максимального диаметра изолированного проводника и двусторонней толщины изоляции паза.

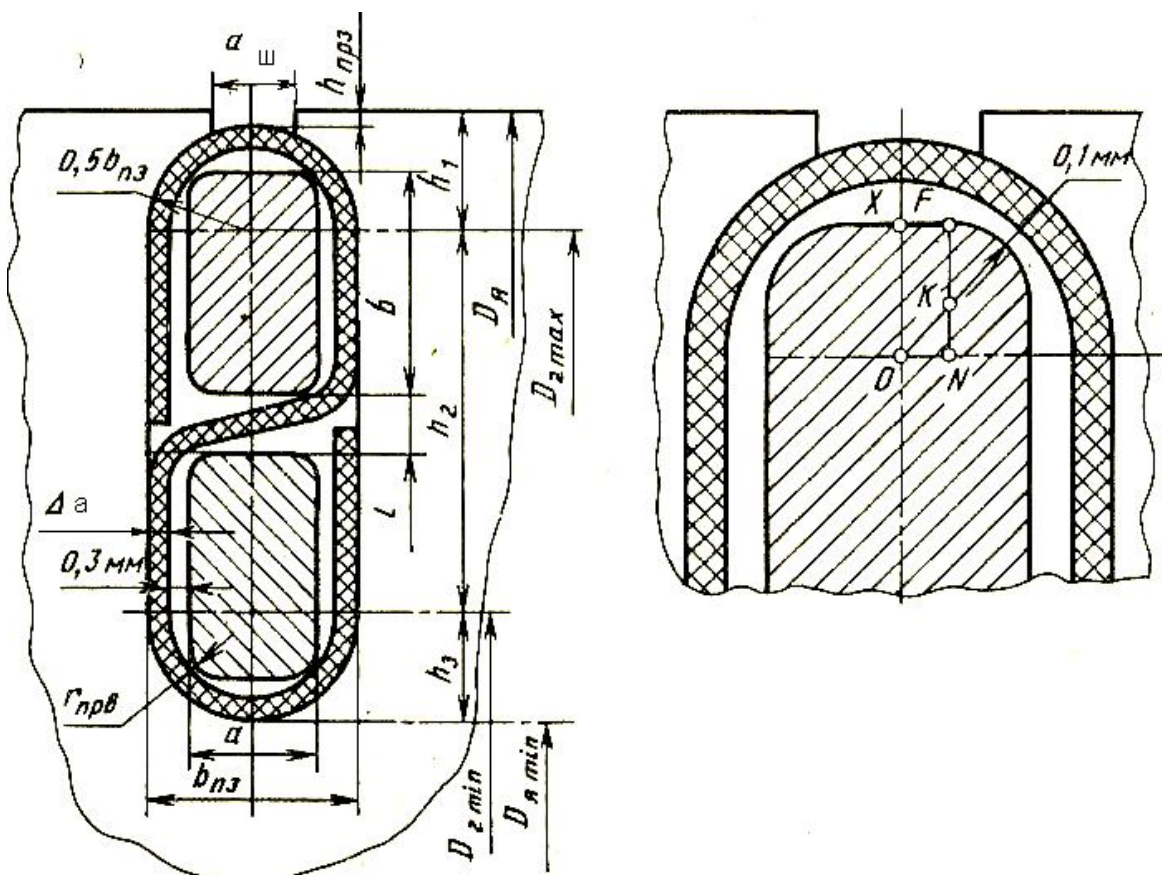
Ширина зубца предварительно равна

$$b_z = \frac{B_{\delta z} t_z}{k_c B_z}, \quad (2.26)$$

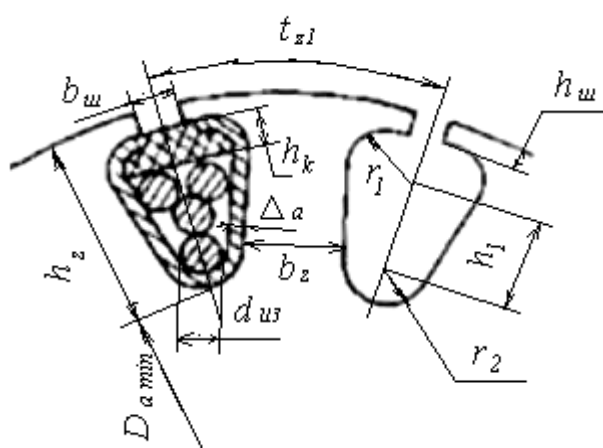
где  $B_z$  – допустимая величина индукции в зубцах, принимаемая по табл. 2.3;

$k_c$  – коэффициент заполнения пакета якоря сталью, равный 0,95 при изолировке листов якоря лаком и 0,98 при изолировке листов оксидированием;

$t_z$  – зубцовое деление  $t_z = \pi D_a / Z$ .



*a*



*б*

*Рис. 2.5.* Некоторые конфигурации зубцово-пазовой зоны якоря стартерного электродвигателя:

- a* – полузакрытый паз и его размеры с учетом технологических требований;
- б* – полузакрытый паз грушевидной формы с параллельными стенками зуба

Больший радиус

$$r_1 = \frac{\pi(D_a - 2h_u) - Zb_z}{2(Z + \pi)}. \quad (2.27)$$

Расстояние  $h_1$  для двухвитковых секций  $h_1 = 2,5d_{из}$ .

Глубина паза для двухвитковых секций

$$h_{п} = h_{ш} + h_{к} + 2\Delta_a + 3d_{из} + 0,0003, \text{ м}, \quad (2.28)$$

где  $h_{к} = (1,5-2)$  мм – толщина клина;

$d_{из}$  – диаметр изолированного провода.

Меньший радиус

$$r_2 = \frac{\pi(D - 2h_n) - Zb_z}{2(Z - \pi)}. \quad (2.29)$$

По рассчитанным размерам необходимо выполнить в масштабе чертеж зубцово-пазовой зоны, проверить возможность размещения проводников обмотки якоря в пазах и при необходимости скорректировать размеры паза.

## 2.5. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ СТАРТЕРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Общий поток полюса

$$\Phi_m = \sigma\Phi, \text{ Вб}, \quad (2.30)$$

где  $\sigma = 1,1 \dots 1,25$  – коэффициент, учитывающий рассеяние потока.

Основной магнитный поток  $\Phi$  составляет только часть потока, проходящего через полюс. Другая часть  $\Phi_{\sigma}$ , называемая потоком рассеяния, ответвляется в междуполюсное пространство. Эта часть потока не проходит через воздушный зазор и якорь, и поэтому в преобразовании электрической энергии в механическую не участвует.

Требуемую для создания расчетного магнитного потока магнитодвижущую силу (МДС) на пару полюсов обмоток возбуждения  $F_{\Sigma}$  определяют суммированием падений магнитного потенциала на отдельных участках магнитной цепи. В стартерных электродвигателях выделяются шесть участков (рис. 2.6):

- воздушный зазор  $\delta$ ;
- зубцовая зона  $h_z$ ;



- спинка якоря  $L_a$ ;
- полюс  $h_m$ ;
- корпус  $L_j$ ;
- зазор в стыке полюса с корпусом  $\delta_{стк}=0,1$  мм.

Величина воздушного зазора  $\delta$  у стартерных электродвигателей равна (0,4...1,2) мм. При малых значениях  $\delta$  размеры индуктора уменьшаются, технология производства электростартера усложняется.

Величина воздушного зазора определяется в соответствии с табл. 2.2.

Таблица 2.2

### Величина воздушного зазора

$P_{2н}$ , кВт	<2,6	4,4...5,9	6...11,0	>11,0
$\delta$ , мм	0,5	0,5...0,65	0,65...0,8	0,8...1,2

Магнитная индукция в зубцах якоря  $B_z$ , полюсе  $B_m$ , сердечнике якоря  $B_a$  и в корпусе  $B_j$  для стартерных электродвигателей должна соответствовать рекомендованным значениям (табл. 2.3).

Таблица 2.3

### Рекомендованные значения индукции, Тл

	Полезная номинальная мощность электростартера, кВт				
	до 0,8	до 1,8	до 2,5	до 6	до 15
Зубцовая зона якоря	1,9-2,0	2,2-2,5	2,2-2,6	2,6-3,0	2,7-3,0
Сердечник якоря	1,3-1,4	1,35-1,4	1,4-1,55	1,55-1,6	1,55-1,6
Полюс и полюсный наконечник	1,4-1,5	1,4-1,5	1,55-1,6	1,55-1,6	1,6-1,7
Корпус	1,0...1,1		1,2...1,3		

2.5.1. Размеры зубцовой зоны с полузакрытыми пазами определяются в соответствии с рис. 2.7, м:

$$t_z = \pi D_a / Z;$$

$$b_z = t_z - a_u;$$

$$D_1 = 0,5 (D_a + D_{2\max});$$

$$D_{2\max} = D_a - 2(h_{ш} + 0,5 \sqrt{b_{нз}^2 - a_u^2});$$

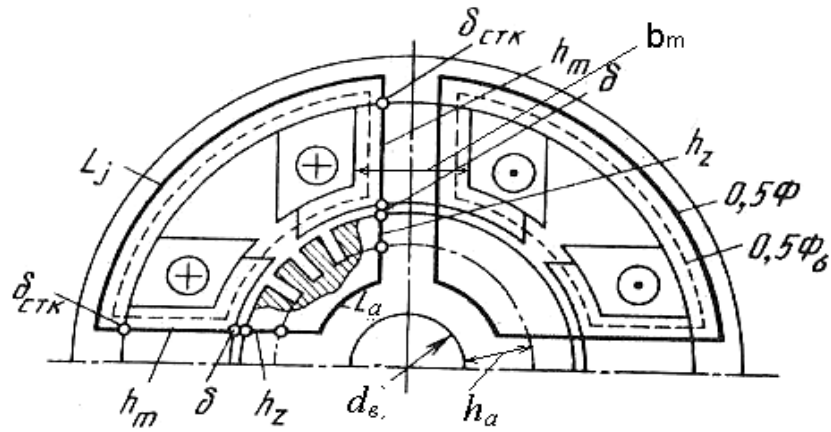


Рис. 2.6. Магнитная цепь стартерного электродвигателя:

----- силовые линии потока рассеяния  $\Phi_0$ ;

\_\_\_\_\_ силовые линии основного магнитного потока  $\Phi$

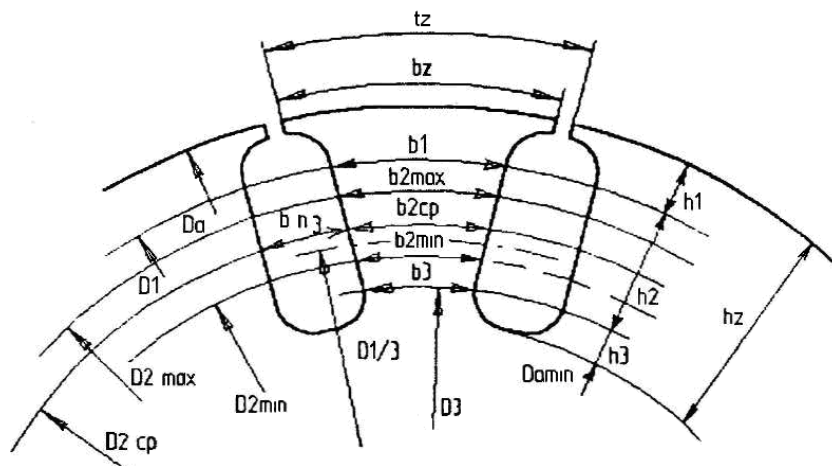


Рис. 2.7. К расчету размеров зубцовой зоны с полузакрытыми пазами

$$D_{2 \text{ cp}} = 0,5(D_{2 \text{ max}} + D_{2 \text{ min}});$$

$$D_{2 \text{ min}} = D_{2 \text{ max}} - 2h_2;$$

$$D_3 = D_{2 \text{ min}} - 0,5 b_{\text{пз}};$$

$$b_1 = t_1 - \sqrt{b_{\text{нз}}^2 - h_1^2};$$

$$t_1 = \pi D_1 / Z;$$

$$t_{2 \max} = \pi D_{2 \max} / Z;$$

$$b_{2 \max} = t_{2 \max} - b_{n3};$$

$$t_{2cp} = \pi D_{2cp} / Z;$$

$$b_{2cp} = t_{2cp} - b_{n3};$$

$$t_{2 \min} = \pi D_{2 \min} / Z;$$

$$b_{2 \min} = t_{2 \min} - b_{n3};$$

$$b_3 = t_3 - 0,866b_{n3};$$

$$t_3 = \pi D_3 / Z;$$

$$h_1 = 0,5(D_a - D_{2 \max});$$

$h_2$  – в соответствии с п. 2.4;

$$h_3 = 0,5b_{n3};$$

$$h_z = h_1 + h_2 + h_3.$$

2.5.2. Размеры паза грушевидной формы с параллельными стенками зубца определяются в соответствии с рис. 2.5, б.

Расчетную высоту паза можно принять равной  $h_z = h_n - 0,2r_1$ .

2.5.3. Размеры сердечника якоря с полузакрытыми пазами определяются в соответствии с рис. 2.7, м:

$$D_{a \min} = D_{2 \min} - b_{n3};$$

высота сердечника якоря

$$h_a = 0,5(D_a - 2h_z - d_e).$$

Размеры сердечника якоря с пазами грушевидной формы определяются в соответствии с рис. 2.5, б:

$$D_{a \min} = D_a - 2h_n;$$

$$h_a = 0,5(D_{a \min} - d_e).$$

Диаметр вала принимается равным  $d_b = (0,2 \dots 0,4)D_a$ .

2.5.4. Размеры полюса и полюсного наконечника, м:

– диаметр расточки полюсов

$$D_n = D_a + 2\delta;$$

– длина полюсной дуги

$$b_n = \alpha_\delta \tau + 2\delta;$$

– длина полюса

$$l_n = l_m = l_a;$$

– высота полюса

$$h_m = 0,5(D_j - D_n);$$

– высота наконечника полюса

$$h_{нк} = (0,25 \dots 0,3)h_m;$$

– площадь сечения сердечника полюса, м<sup>2</sup>

$$S_m = \frac{\Phi_m}{B_m};$$

– ширина сердечника полюса, м

$$b_m = S_m / l_m.$$

### 2.5.5. Размеры корпуса:

– длина корпуса, м

$$l_j = (1,6 \dots 2,0)l_a;$$

– площадь расчетного сечения корпуса

$$S_j = \frac{\Phi_m}{2B_j}, \text{ м}^2;$$

– толщина корпуса, м

$$h_j = \frac{S_j}{l_j}.$$

2.5.6. Расчет характеристики намагничивания сводится к определению магнитной индукции, напряженности магнитного поля, падения магнитного потенциала на отдельных участках магнитной цепи и суммарной МДС для фиксированных значений магнитной индукции в воздушном зазоре:  $0,5B_\delta$ ;  $0,85B_\delta$ ;  $1,0B_\delta$ ;  $1,1B_\delta$  и  $1,2 B_\delta$ .

Расчет МДС зубцов проводят на один зубцовый шаг  $t_z$ .

Магнитная индукция в  $i$ -том сечении зубца, Тл,

$$B_{zi} = t_z B_\delta / (K_{cm} b_{zi}). \quad (2.31)$$

Если наибольшая индукция в зубцах не превышает 1,8 Тл, то напряженность магнитного поля определяется по основной кривой намагничивания (рис. 2.8).

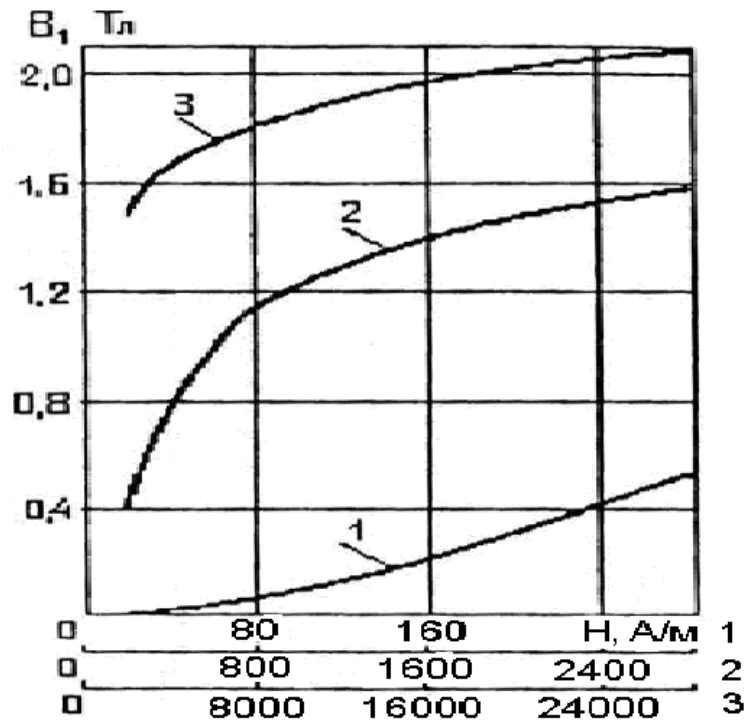


Рис. 2.8. Характеристика намагничивания стали 10:

1, 2, 3 – номера кривых, соответствующие номерам осей абсцисс

При индукции в зубцах больше 1,8 Тл напряженность магнитного поля определяется с учетом вытеснения магнитного потока в паз по характеристике намагничивания зубцов для соответствующего зубцового коэффициента (рис. 2.9):

$$K_{zi} = \frac{t_{zi}}{K_{cm} \cdot b_{zi}} - 1. \quad (2.32)$$

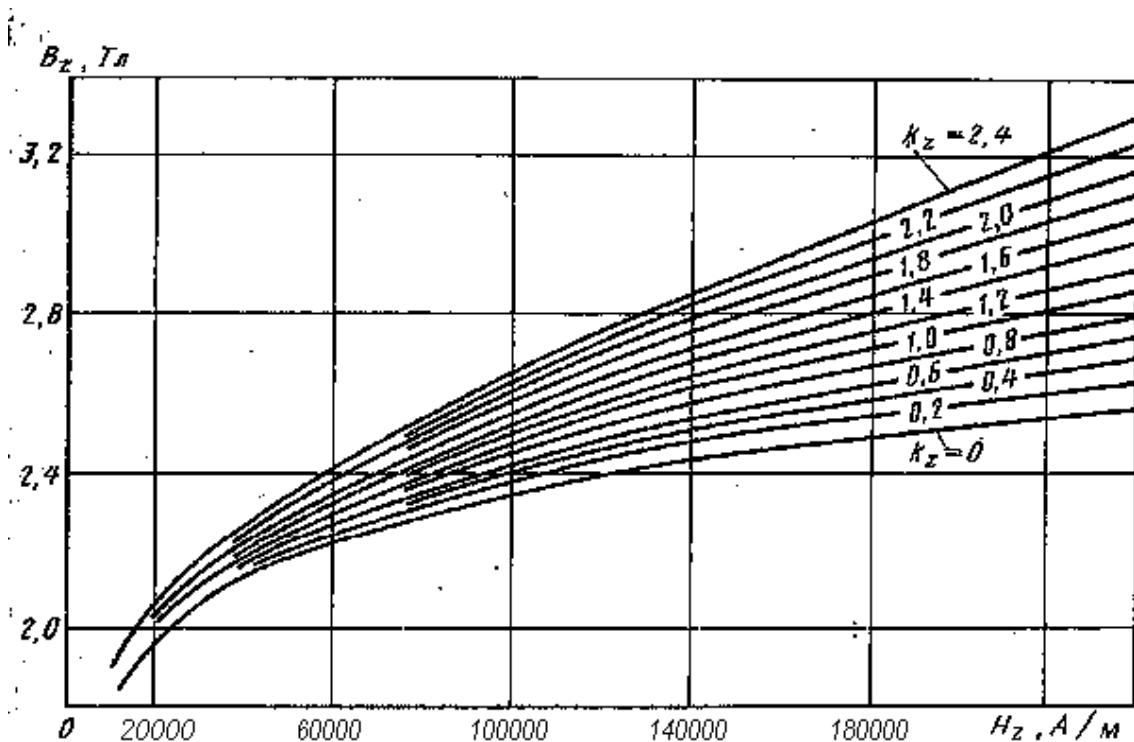


Рис. 2.9. Зависимость  $B_z = f(H_z)$  при различных зубцовых коэффициентах для стали 10

При трапецеидальной форме зубца на втором участке достаточно определить напряженность магнитного поля  $H_{2max}$ ,  $H_{2cp}$  и  $H_{2min}$  соответственно в максимальном, среднем и минимальном сечениях зубца. Тогда расчетная напряженность магнитного поля в зубце

$$H_2 = (H_{2max} + 4H_{2cp} + H_{2min}) / 6 \quad (2.33)$$

и МДС зубцовой зоны

$$F_{z2} = 2h_2H_2, \quad (2.34)$$

где  $h_2$  – высота трапецеидальной части зубца.

Результирующая магнитодвижущая сила на пару полюсов

$$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_z + F_a + F_m + F_j + F_{стк}. \quad (2.35)$$

Аналогичным образом рассчитывают МДС на два полюса и для других значений магнитной индукции  $B_{\delta}$  в диапазоне 0,5...1,2 Тл в соответствии с табл. 2.4 и табл. 2.5.

По результатам расчетов строим кривую намагничивания – характеристику  $B_{\delta} = f(F_{\Sigma})$  и характеристику намагничивания переходной зоны  $B_{\delta} = f(F_{\delta+z+a})$ .

## 2.6. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения

$$F_g = F_\Sigma + \Delta F_a, \quad (2.36)$$

где  $\Delta F_a$  – величина МДС, учитывающая размагничивающее действие реакции якоря, определяется по рис. 2.10.

Число витков катушки возбуждения стартерного электродвигателя с последовательным возбуждением

$$w_{к.с.} = a_c F_g / (2I_a), \quad (2.37)$$

где  $a_c$  – число параллельных ветвей в обмотке возбуждения.

Сопротивление последовательной обмотки возбуждения

$$R_c = R_{ст} - R_a. \quad (2.38)$$

Средняя длина витка катушки

$$L_{к.ср} = 2l_m + 2b_m + \pi b_k^*, \quad (2.39)$$

где  $l_m$  – длина полюса;

$b_m$  – ширина полюса;

$b_k^*$  – максимально возможная ширина катушки, определяемая по эскизу магнитной цепи электродвигателя.

Сечение провода обмотки возбуждения

$$S_c = k_t \rho L_{к.ср} w_{к.с.} / R_{к.с.}, \quad (2.40)$$

где  $R_{к.с.} = a_c^2 R_c / z_c$  – сопротивление катушки, Ом;

$z_c$  – число катушек последовательной обмотки возбуждения.

Высота катушки возбуждения

$$h_k = h_m - h_{н.к.}, \quad (2.41)$$

где  $h_m$  – высота полюса;

$h_{н.к.} = (0,25 \dots 0,3) h_m$  – высота наконечника полюса.

### Характеристика намагничивания

Участок магнитной цепи	Средняя длина пути магнитного потока, м	Расчетные коэффициенты	Расчетные формулы
			$B, Тл$

Воздуш- ный зазор		$\delta$	$K_{\delta} \frac{t_z + 10\delta}{b_z + 10\delta}$	$B_{\delta}$
Зубцовая зона якоря	1-й участок	$h_1$	$K_{ст} = (0,95 \dots 0,98)$ $K_{z1} = \frac{t_1}{K_{cm} \cdot b_1} - 1$	$B_1 = t_z B_{\delta} / (K_{cm} b_1)$
	2-й участок	$h_2$	$K_{z2 \min} = \frac{t_{2 \max}}{K_{cm} \cdot b_{z \max}} - 1$ $K_{z2cp} = \frac{t_{2cp}}{K_{cm} b_{2cp}} - 1$ $K_{z2 \max} = \frac{t_{2 \min}}{K_{cm} \cdot b_{z \min}} - 1$	$B_{z \min} = t_z B_{\delta} / (K_{cm} b_{2 \max})$ $B_{zcc} = t_z B_{\delta} / (K_{cm} b_{2cp})$ $B_{2 \max} = t_z B_{\delta} / (K_{cm} b_{2 \min})$
	3-й участок	$h_3$	$K_{z3} = \frac{t_z}{K_{cm} \cdot b_3} - 1$	$B_3 = t_z B_{\delta} / (K_{cm} b_3)$
Сердечник якоря		$L_a = \frac{\pi(d_b + h_a)}{4p} + h_a$		$B_a = \alpha_{\delta} \tau B_{\delta} / (2K_{cm} h_a)$
Полюс		$L_m = h_m$	$\sigma = 1,15 \dots 1,25$	$B_m = \sigma \alpha_{\delta} \tau l_a B_{\delta} / (b_m l_m)$
Стык		$\delta_{стт}$		$B_{cmк} = \sigma \alpha_{\delta} \tau l_a B_{\delta} / (b_m l_m)$
Корпус		$L_a = \frac{\pi(D_j + h_j)}{4p} + h_j$		$B_j = \sigma \alpha_{\delta} \tau l_a B_{\delta} / (2L_j h_j)$
Зубцовая зона с груше- видными пазами		$h_z = h_n - 0,2r_1$	$K_z = \frac{t_z}{K_{cm} \cdot b_z} - 1$	$B_z = t_z B_{\delta} / (K_{cm} b_z)$



## стартерного электродвигателя

Расчетные формулы		0,5 $B_{\delta}$			$B_{\delta}0,85B_{\delta}$			1,0 $B_{\delta}$			1,1 $B_{\delta}$			1,2 $B_{\delta}$		
$H$ , А/м	$F$ , А	$B$	$H$	$F$	$B$	$H$	$F$	$B$	$H$	$F$	$B$	$H$	$F$	$B$	$H$	$F$
$B_{\delta}/\mu_0$	$F_{\delta} = 2K_{\delta}\delta B_{\delta} / \mu_0$															
По кривым рис. 2.8, рис. 2.9, $H_1(B_1)$	$F_z = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3}$ $F_{z1} = 2h_1 H_1$															
$H_{2\min}(B_{2\min})$ $H_{2\text{cp}}(B_{2\text{cp}})$ $H_{2\max}(B_{2\max})$ $H_2 = \frac{1}{6}(H_{2\min} +$ $+ 4H_{2\text{cp}} + H_{2\max})$	$F_{z2} = 2h_2 H_2$															
$H_3(B_3)$	$F_{z3} = 2h_3 H_3$															
$H_a(B_a)$ (рис.2.8)	$F_a = L_a H_a$															
$H_m(B_m)$ (рис.2.8)	$F_m = 2L_m H_m$															
	$F_{\delta\text{стк}} = 2\delta_{\text{стк}} B_m / \mu_0$															
$H_j(B_j)$ по кривым рис. 2.8	$F_j = L_j H_j$															
$H_z(B_z)$ по кривым рис. 2.8, 2.9	$F_z = 2h_z H_z$															
$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_z + F_a + F_m + F_{\delta\text{стк}} + F_j$																
$F_{z+a+\delta} = F_z + F_a + F_{\delta}$																

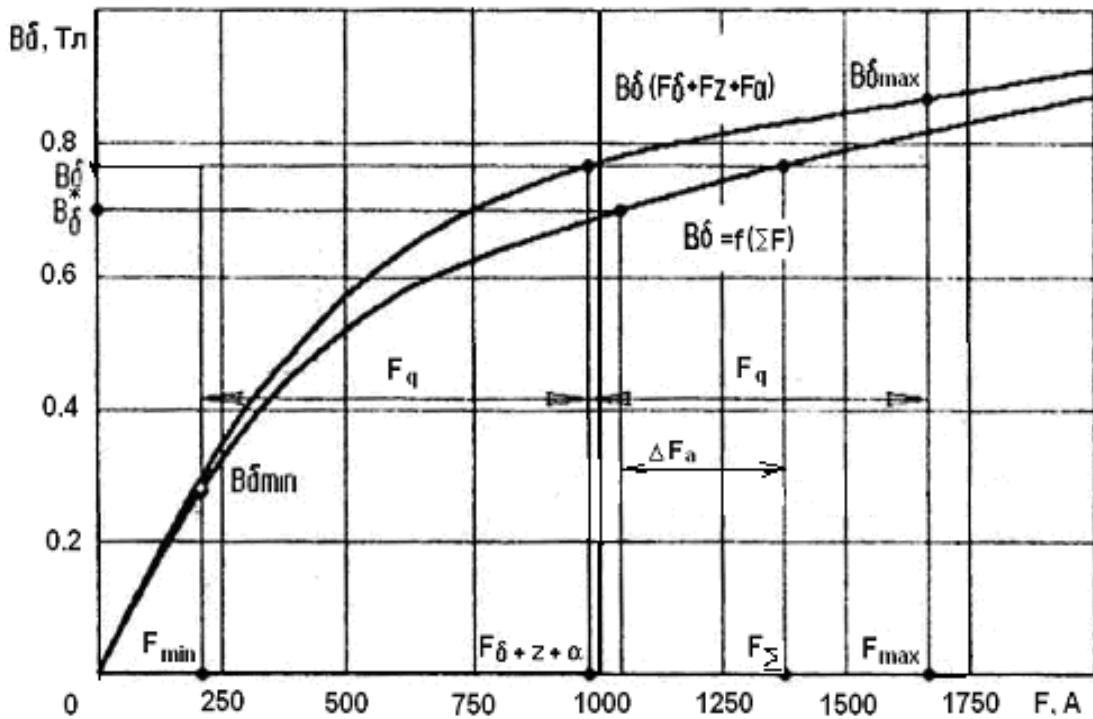


Рис. 2.10. Определение размагничивающего действия реакции якоря по характеристике намагничивания

Ширина провода катушки возбуждения

$$b = h_k - 2\Delta_{вн}, \quad (2.42)$$

где  $\Delta_{вн}$  – толщина внешней изоляции катушки.

По сечению  $S_c$  и ширине  $b$  подбирается прямоугольный провод марки ПММ. Рекомендуемое соотношение ширины провода к толщине  $b/a = 1,2 \dots 1,3$ .

После выбора сечения провода и толщины  $\Delta_{из}$  межвитковой изоляции необходимо уточнить ширину катушки по формуле

$$b_k = aw_{к.с.} + \Delta_{из}(w_{к.с.} - 1) + 2\Delta_{вн}, \quad (2.43)$$

а также среднюю длину витка, сопротивление катушки, сопротивление обмотки возбуждения и суммарное сопротивление обмотки возбуждения и якоря.

Во всех случаях, когда катушки возбуждения не размещаются в пространстве между полюсами, расчет стартерного электродвигателя повторяют, увеличив объем пакета якоря.

## 2.7. РАСЧЕТ КОЛЛЕКТОРА И ВЫБОР ЩЕТОК

На рис. 2.11 представлены конструкции коллектора, применяемые в стартерных электродвигателях.

При расчете цилиндрического коллектора прежде всего задаются диаметром коллектора

$$D_k = (0,6 \dots 0,7) D_a. \quad (2.44)$$

При этом необходимо, чтобы  $D_k \leq D_{a \text{ min}}$ .

Длина коллектора в соответствии с рис. 2.12

$$l_k = q + l_{щ} \cdot N_{щб} + (N_{щб} - 1)b + a + c, \quad (2.45)$$

где  $N_{щб}$  – число щеток на щеточный болт;

$a = c = (5 \dots 8) \cdot 10^{-3}$ , м – припуски по краям коллектора;

$b = (1,5 \dots 2) \cdot 10^{-3}$ , м – расстояние между щетками (на 1...2 мм больше двойной толщины стенок обоймы щеткодержателя).

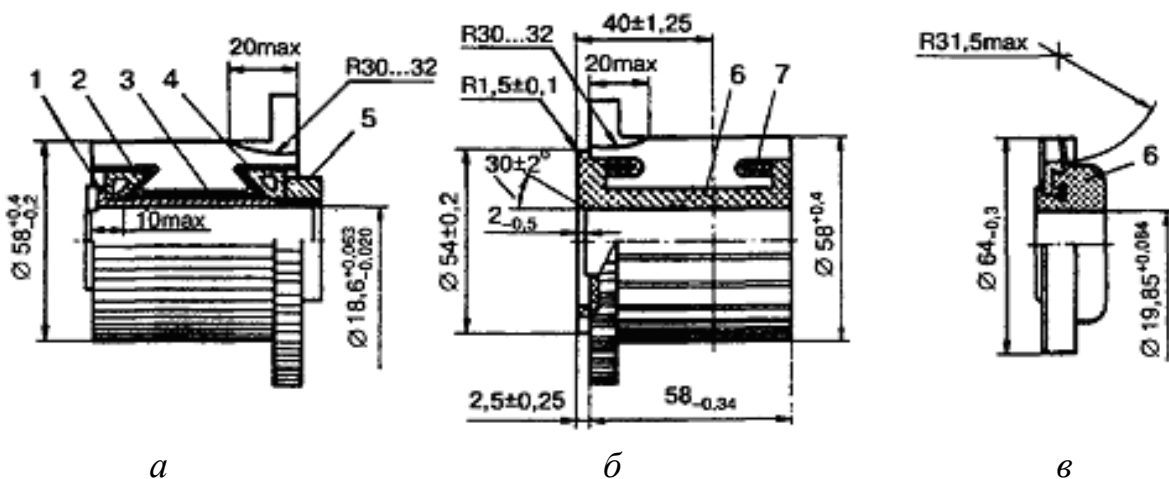


Рис. 2.11. Коллекторы электростартеров:

*a* – цилиндрический на металлической втулке (СТ142);

*б* – цилиндрический с пластмассовым корпусом; *в* – торцовый (29.3708);

1 – металлическая втулка; 2 – нажимное кольцо;

3 – изоляционный материал втулки; 4 – изоляционный корпус; 5 – гайка;

6 – пластмассовый корпус; 7 – армировочное кольцо

Активная длина коллектора

$$l_{ka} = l_{щ} \cdot N_{щб} + (N_{щб} - 1)b + a + c. \quad (2.46)$$

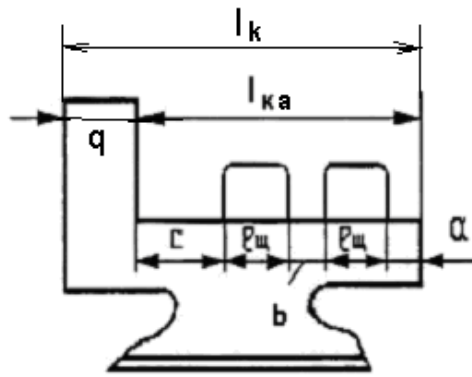


Рис. 2.12. Коллекторная пластина

Ширина коллекторной пластины

$$b_k = \beta_k - \Delta_{из.к}, \quad (2.47)$$

где  $\beta_k = \pi D_k / K$  – коллекторное деление;

$\Delta_{из.к} = (0,4 \dots 0,9) \cdot 10^{-3}$ , м – толщина межламельной изоляции.

Ширина щетки

$$b_{щ} = 2\beta_k. \quad (2.48)$$

Длина щетки

$$l_{щ} = I_a / (P_{щб} j_{щ} b_{щ}) < 30 \cdot 10^{-3}, \text{ м}, \quad (2.49)$$

где  $P_{щб}$  – число пар щеточных болтов (принимается 2);

$j_{щ}$  – плотность тока в щетках, выбирается в соответствии с табл. П10 и обычно в 4...5 раз больше, чем для продолжительного режима работы.

Если  $l_{щ} > 30 \cdot 10^{-3}$  м при  $N_{щб} = 1$ , следует брать большее число щеток на болт.

По табл. П15 выбираем щетки стандартного размера.

Высота щетки обычно не превышает  $20 \cdot 10^{-3}$  м.

Ширина петушка для выпускаемых стартерных двигателей

$$q = (1,4 \dots 1,8)b, \quad (2.50)$$

где  $b$  – размер прямоугольного провода обмотки якоря.

Толщина нижней части пластины должна быть более 0,5 мм.

Общая площадь всех щеток

$$\Sigma S_{щ} = 2P_{щб} N_{щб} b_{щ} l_{щ}. \quad (2.51)$$

## 2.8. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

На первом этапе расчета рабочих характеристик стартерного электродвигателя используют характеристики намагничивания машины  $B_\delta, \Phi = f(F_\Sigma)$  и  $B_\delta, \Phi = f(F_\delta + F_z + F_a)$ . Они представляют собой зависимости магнитной индукции в воздушном зазоре или основного магнитного потока  $\Phi$  от МДС  $F_B$  обмотки возбуждения (см рис. 2.10) и МДС  $(F_\delta + F_z + F_a)$ ,  $F_e = 2w_{к.с.} I_a / a_c$ .

Рабочие характеристики для стартерного электродвигателя  $n$ ,  $M_2$ ,  $\eta_{ст}$ ,  $P_2$ ,  $U_{ст}(I_a)$  строят с учетом размагничивающего действия реакции якоря (рис. 2.13). Если щетки установлены по линии геометрической нейтрали, то МДС реакции якоря на половину полюса  $F_q = \alpha_\delta(\tau/2)A$ .

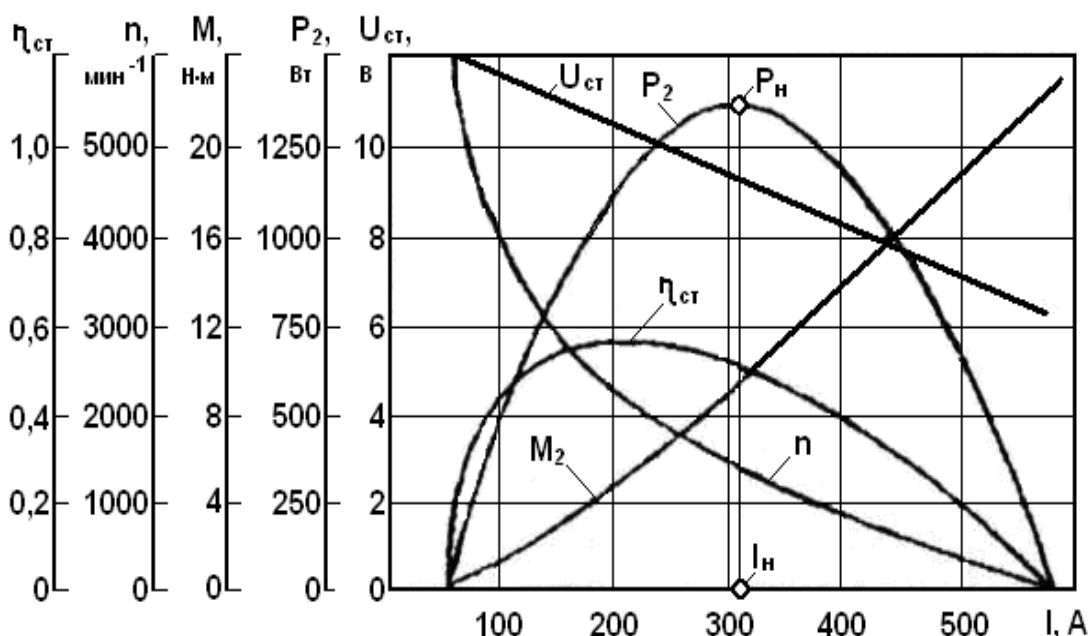


Рис. 2.13. Рабочие характеристики стартерного электродвигателя

При насыщенной магнитной системе электродвигателя ослабление магнитного поля на сбегающем крае полюса не компенсируется его усилением на набегающем крае. Поэтому для заданной МДС на паре полюсов магнитная индукция  $B_\delta$  и основной магнитный поток  $\Phi$  в режиме нагрузки будут меньше, чем их значения, определенные по кривой намагничивания. Рабочие характеристики рассчитывают, принимая  $i$  значений тока: 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 от

тока полного торможения (короткого замыкания) стартерного электродвигателя  $I_{к.ст.} = I_a/k$ , обязательно включая в расчет точку  $I_a$ , соответствующую номинальной мощности, и точку  $I_{ам}$ , соответствующую максимальной электромагнитной мощности.

Значения магнитной индукции при нагрузке находят непосредственно для каждого  $i$ -того значения тока якоря следующим образом (см. рис. 2.10):

– для рассчитанной при  $i$ -том токе МДС возбуждения  $F_{\delta i}$  по основной характеристике намагничивания находят индукцию  $B_{\delta i}$ ;

– по переходной характеристике находят значения МДС  $F_{(\delta+z+a)i}$ , соответствующие этой индукции;

– находят значения МДС под набегавшим краем полюсов:

$$\begin{aligned} F_{\min i} &= F_{сб.i} = F_{(\delta+z+a)i} - F_{qi}; \\ F_{\max i} &= F_{нб.i} = F_{(\delta+z+a)i} + F_{qi}, \end{aligned} \quad (2.52)$$

где  $F_{qi}$  – поперечная МДС на половине полюса для  $i$ -того тока якоря, А,

$$F_{qi} = \alpha_{\delta} \cdot \tau / 2 \cdot N / 2a\pi D_a \cdot I_{ai}. \quad (2.53)$$

По переходной характеристике находят значения  $B_{\delta \max i}$  и  $B_{\delta \min i}$ , соответствующие найденным МДС.

Магнитная индукция  $B_{\delta}^*$  в воздушном зазоре при нагрузке с учетом размагничивающего действия реакции якоря определяется по выражению

$$B = (B_{\delta \max i} + 4B_{\delta i} + B_{\delta \min i}) / 6. \quad (2.54)$$

Величины, необходимые для построения рабочих и механических характеристик стартерного электродвигателя, рассчитывают при различных фиксированных значениях  $i$ -того тока якоря. Обратную ЭДС находят путем расчета электрической цепи якоря, а необходимый для определения частоты вращения якоря и электромагнитного вращающего момента магнитный поток  $\Phi_{нагр i}$  – по индукции  $B_{\delta i}^*$ . Полезную мощность, вращающий момент на валу яко-

ря и КПД стартерного электродвигателя определяют с учетом магнитных и механических потерь по приведенным в табл. 2.5 формулам.

Для расчета магнитных потерь определяется масса зубцового слоя и сердечника якоря, кг:

$$M_z = \gamma_{cm} K_c l_a [0,25\pi(D_a^2 - D_{a\min}^2) - Z(b_{nz}h_2 + 0,25\pi b_{nz}^2 + h_{uz}a_{uz})];$$

$$M_a = 0,25\gamma_{cm} K_c l_a \pi(D_{a\min}^2 - d_g^2), \quad (2.55)$$

где  $\gamma_{cm} = 7850 \text{ кг/м}^3$  – удельный вес стали.

Таблица 2.5

### Расчет рабочих характеристик

№ п/п	Расчетные формулы	0,1 $I_{Кст}$	0,25 $I_{Кст}$	$I_{ам}$	$I_a$	0,75 $I_{Кст}$	$I_{Кст}$	Ед. изм.
1	$E_{ai} = U_n - \Delta U_{uz} - I_{ai} \Sigma R_a$							В
2	$F_{\delta i} = 2w_{к.с.} I_{ai} / a_c$							А
3	$B_{\delta i} = f(F_{\delta i})$ по характ. $B_{\delta} = f(F_{\Sigma})$							Тл
4	$F_{(z+a+\delta)_i}$ по характ. $B_{\delta} = f(F_{z+a+\delta})$							А
5	$F_{qi} = \alpha \frac{\tau}{2} \cdot \frac{N}{2a\pi D_a} \cdot I_{ai}$							А
6	$F_{\min i} = F_{(z+a+\delta)_i} - F_{qi}$							А
7	$F_{\max i} = F_{(z+a+\delta)_i} + F_{qi}$							А
8	$B_{\delta \max i}$ по характеристике $B_{\delta} = f(F_{z+a+\delta})$							Тл
9	$B_{\delta \min i}$ по характеристике $B_{\delta} = f(F_{z+a+\delta})$							Тл
10	$B_{\delta i}^* = (B_{\delta \max i} + 4B_{\delta i} + B_{\delta \min i}) / 6$							Тл
11	$\Phi_{нагр.i} = \alpha_{\delta} \tau l_a B_{\delta i}^*$							Вб
12	$n = aE_{ai} / (pN\Phi_{нагр.i})$							об/мин
13	$U_{см.} = U_n - R_{\delta} I_{ai}$							В
14	$P_1 = U_{см.} I_{ai}$							Вт
15	$P_{\vartheta} = E_a I_{ai}$							Вт
16	$\Delta p_{подш.} = 0,03(n / n_m) P_{\vartheta \max}$							Вт
17	$\Delta p_{uz} = 7,5 \Sigma S_{uz} \left( \frac{\pi D_k n}{60} \right) 10^3$							Вт
18	$f = pn / 60$							Hz

19	$B_{\frac{z_1}{3}} = t_z B_{\delta}^* / (K_{cm} b_{\frac{1}{3}})$								Тл
20	$B_a = \alpha_{\delta} \tau B_{\delta}^* (2K_{cm} h_a)$								Тл
21	$\Delta p_a = 2B_a^2 M_a (0,044f + 2240\Delta^2 f^2)$								Вт
22	$\Delta p_z = 2B_{\frac{z_1}{3}}^2 M_z (0,044f + 2240\Delta^2 f^2)$								Вт
23	$\Delta p_M = \Delta p_{подш} + \Delta p_{щ} + \Delta p_a + \Delta p_z$								Вт
24	$P_2 = P_9 - \Delta P_M$								Вт
25	$\eta = P_2 / P_1$								о. е.
26	$M = 9,55 P_9 / n$								нм
27	$M_2 = 9,55 P_2 / n$								нм

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как выбирается линейная нагрузка при поверочном расчете электродвигателя?
2. Каков порядок выбора и расчета относительной геометрии электродвигателя и числа полюсов?
3. По каким параметрам выбирается тип обмотки якоря?
4. Какие виды пазов применяются в стартерных электродвигателях, какова их геометрия?
5. Как зависят геометрические размеры двигателя от его электромагнитных нагрузок?
6. К каким последствиям приводит увеличение  $B_{\delta}$  в воздушном зазоре?
7. Как зависит тепловая напряженность от линейной нагрузки?
8. Как для заданных условий пуска двигателя выбирается емкость аккумуляторной батареи и мощность стартера?
9. По каким параметрам выбираются электрощетки и определяются размеры коллектора?
10. Какие потери определяются при расчете рабочих характеристик стартера?



### 3. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СТАРТЕРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И ПЛАНЕТАРНЫМ РЕДУКТОРОМ

Заданная частота вращения электродвигателя  $n$  умножается на передаточное число планетарного редуктора  $i$ , которое принимается равным от 2,5 до 3,5.

Наружный диаметр корпуса  $D_j$  определяется из соотношения  $D_j = (1,4 \dots 1,5) D_a$ . Рекомендованные значения  $D_j$  выбираются в соответствии с табл. П14.

Расчетная индукция в воздушном зазоре  $B_\delta$  определяется по кривой размагничивания постоянного магнита. На рис. 3.1 представлена кривая размагничивания постоянного магнита.

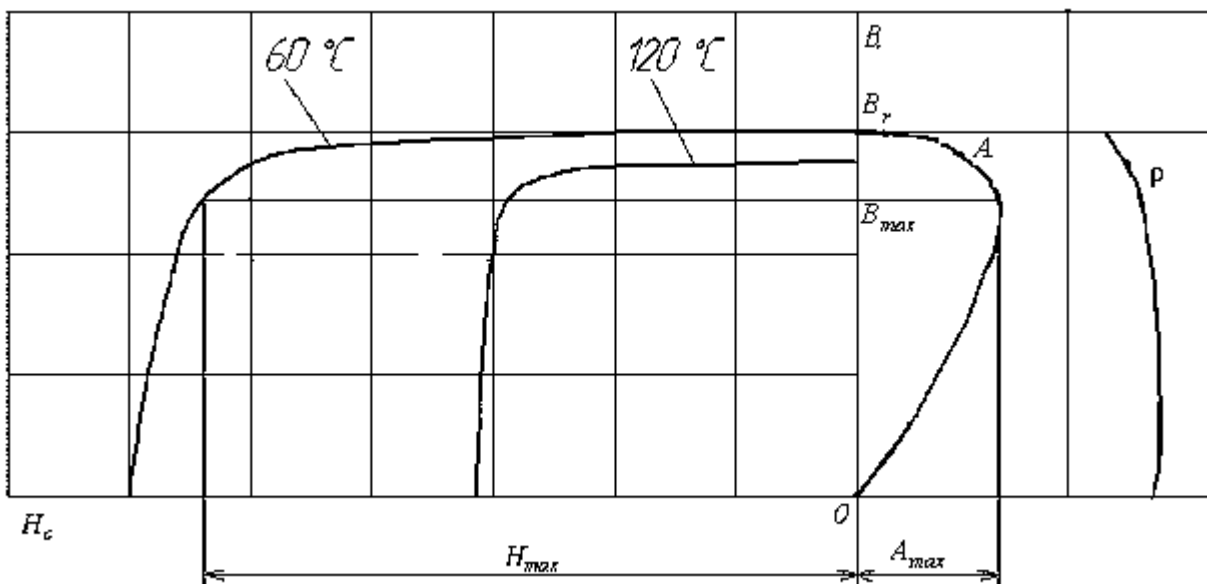


Рис. 3.1. Кривая размагничивания постоянного магнита

Постоянный магнит характеризуется рядом параметров, которые необходимы при проектировании машины.

1. Остаточная индукция  $B_r$ .
2. Коэрцитивная сила  $H_c$  – напряженность поля, которую необходимо приложить, чтобы довести до нуля индукцию в данном материале.

3. Коэффициент возврата  $\rho$ . Обычно магниты всегда работают в частичных циклах петли гистерезиса, и для простоты кривые возврата заменяются прямыми возврата. Тогда коэффициент возврата

$$\rho = \operatorname{tg}\beta = \frac{\Delta B}{\Delta H}, \quad (3.1)$$

где  $\beta$  – угол между прямой возврата и осью абсцисс.

4. Максимальная удельная магнитная энергия, развиваемая магнитом во внешнем пространстве. Магнитная энергия, отнесенная к единице объема магнита, равняется

$$A = \frac{BH}{2}, \text{ Дж/м}^3. \quad (3.2)$$

Кривая  $A$  имеет максимум

$$A_{\max} = \frac{(BH)_{\max}}{2}. \quad (3.3)$$

Для многих магнитов максимум энергии получается при соотношениях

$$\frac{B_{\max}}{B_r} = 0,656 \text{ и } \frac{H_{\max}}{H_c} = 0,656, \quad (3.4)$$

где  $B_{\max}$  и  $H_{\max}$  – координаты точки на кривой размагничивания, соответствующей максимуму энергии.

5. Коэффициент формы кривой размагничивания (коэффициент выпуклости)

$$\gamma = \frac{(BH)_{\max}}{B_r H_c}. \quad (3.5)$$

Чем больше коэффициент формы, тем лучше материал магнита.

Индукцию  $B_\delta$  при одинаковом сечении магнита по его высоте (рис. 3.2) можно принять равной

$$B_\delta = (0,8 \dots 1,0) B_r \sqrt{\gamma}. \quad (3.6)$$

Длина постоянного магнита принимается равной длине якоря:

$$l_m = l_a. \quad (3.7)$$

Ширина полюсной дуги

$$b_m = \alpha_\delta \tau. \quad (3.8)$$

В электродвигателе с постоянными магнитами обмотки возбуждения на полюсах нет, сопротивление обмотки якоря равно

$$R_{cm} = R_a = \Sigma R_a - R_\delta - R_{np}. \quad (3.9)$$

При расчете магнитной цепи магнитодвижущая сила полюса не определяется.

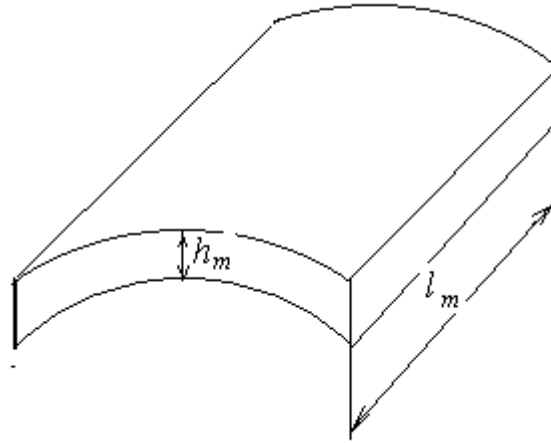


Рис. 3.2. Форма постоянного магнита:

$l_m$  – длина магнита;  $h_m$  – высота магнита

Напряженность магнитного поля в постоянном магните при расчете можно принять равной  $H_m = 0,4H_c$ , тогда магнитодвижущая сила постоянного магнита

$$F_m = 0,4H_c h_m. \quad (3.10)$$

МДС постоянного магнита должна быть равна результирующей магнитодвижущей силе на полюс

$$F_m = 0,5F_\Sigma = F_\delta + F_z + F_a + F_j + F_{cmk}, \quad (3.11)$$

где  $F_\Sigma$  – результирующая магнитодвижущая сила на пару полюсов.

Высоту постоянного магнита предварительно можно принять равной

$$h_m = F_m / 0,4H_c. \quad (3.12)$$

Магнитодвижущая сила постоянного магнита высотой  $h_m$  в рабочей точке должна быть больше магнитодвижущей силы реакции якоря в режиме торможения

$$F_m = 0,4H_c h_m > F_k = 0,5\alpha_\delta \cdot \tau \cdot I_k N / 2\pi D_a. \quad (3.13)$$

Если магнитодвижущая сила постоянного магнита меньше магнитодвижущей силы реакции якоря в режиме торможения, то постоянный магнит может быть размагничен. В этом случае необходимо увеличить высоту постоянного магнита.

Для электродвигателей с постоянными магнитами расчет обмоточных данных обмотки возбуждения не выполняется.

В случае применения стабилизированных высококоэрцитивных магнитов представленной на рис. 3.2 формы влиянием магнитного потока якоря на основной магнитный поток в воздушном зазоре при расчете рабочих характеристик можно пренебречь; из табл. 2.5 исключаются пп. 2-10, а вместо  $B_{\delta i}^*$  в последующем расчете ставится значение  $B_{\delta}$ , определенное по формуле (3.6).

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем заключается преимущество возбуждения от постоянных магнитов?
2. Как осуществляется намагничивание постоянных магнитов?
2. Какие факторы влияют на размагничивание постоянных магнитов?
3. Из каких материалов изготавливаются постоянные магниты?
4. Какие параметры характеризуют качество постоянных магнитов?
5. По каким критериям определяются размеры постоянных магнитов?
6. Как влияет величина передаточного числа планетарного редуктора на основные размеры стартерного электродвигателя?

## 4. ПРИМЕР РАСЧЕТА СТАРТЕРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Исходные данные:

- $P_{2H} = 1,55 \text{ кВт}$ ;
- $n_H = 1400 \text{ об/мин}$ ;
- $U_H = 12 \text{ В}$ ;
- $k = 0,6$ .

## 4.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОЩНОСТИ СТАРТЕРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И НОМИНАЛЬНОЙ ЕМКОСТИ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

4.1.1. Расчетная электромагнитная мощность, Вт,

$$P_{\text{э}} = \frac{P_2}{\eta_{\text{эм}}} = \frac{1550}{0,88} = 1760,$$

где  $\eta_{\text{эм}}$  – электромагнитный КПД, учитывающий наличие магнитных и механических потерь в электродвигателе (см. рис. 2.1).

4.1.2. Расчетная величина ЭДС в обмотках якоря

$$E_a = (U_n - \Delta U_{\text{щ}})(1 - \kappa) = (12 - 1,5)(1 - 0,6) = 4,2 \text{ В},$$

где  $\Delta U_{\text{щ}} = 1,5 \text{ В}$  – падение напряжения в щеточном контакте.

4.1.3. Ток в расчетном режиме работы

$$I_a = \frac{P_{\text{э}}}{E_a} = \frac{1760}{4,2} = 419 \text{ А}.$$

4.1.4. Суммарное сопротивление цепи якоря, Ом,

$$\Sigma R_a = (U_n - \Delta U_{\text{щ}})^2 * \frac{(1 - \kappa)\kappa}{P_{\text{э}}} = (12 - 1,5)^2 * \frac{(1 - 0,6)0,6}{1760} = 0,015.$$

4.1.5. Максимальная электромагнитная мощность, кВт,

$$P_{\text{эмmax}} = \frac{P_{2н}}{4\kappa(1 - \kappa)\eta_{\text{эм}}} = 2,0182.$$

4.1.6. В режиме максимальной электромагнитной мощности

$$E_{\text{ам}} = 0,5(U_n - \Delta U_{\text{щ}}) = 5,25 \text{ В};$$

$$I_{\text{ам}} = \frac{I_a}{2\kappa} = \frac{419}{(2 * 0,6)} = 349,166 \text{ А}.$$

4.1.7. При насыщенной магнитной системе частота вращения якоря в режиме максимальной мощности

$$n_m = 0,5 * \frac{n_n}{(1 - \kappa)} = 0,5 * \frac{1400}{1 - 0,6} = 1750 \text{ об/мин.}$$

Номинальную емкость аккумуляторной батареи определяют по рис. 2.2 и округляют до ближайшего большего по ГОСТ 959.0-84, а ее тип выбирают по табл. П1. Выбираем аккумуляторную батарею 6СТ-60ЭМ.

4.1.8. Сопротивление батареи  $R_{\delta}$  рассчитывают с учетом температуры электролита, степени заряженности и порядкового номера попытки пуска. При расчете стартерного электродвигателя на заданную номинальную мощность (при температуре 25 °С) сопротивление аккумуляторной батареи принимают равным

$$R_{\delta} = \frac{(a_{\delta} * U_n)}{C_{20}} = \frac{0,05 * 12}{60} = 0,01, \text{ Ом},$$

где  $a_{\delta}$  – коэффициент аппроксимации вольтамперной характеристики батареи (определяется по табл. П2).

## 4.2. ГЛАВНЫЕ РАЗМЕРЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Совершенство конструкции электродвигателя зависит от правильного выбора диаметра  $D_a$  и длины  $l_a$  пакета якоря.

4.2.1. Для расчета  $D_a$  и  $l_a$  используют уравнение

$$D_a^2 l_a = \frac{6,1 P_{\delta}}{B_{\delta} * A * \alpha_{\delta} * n},$$

где  $B_{\delta}$  – расчетная индукция в воздушном зазоре, Тл;

$A$  – линейная нагрузка якоря, А/м;

$\alpha_{\delta}$  – коэффициент полюсного перекрытия.

4.2.2. Диаметры якорей стартерных электродвигателей в зависимости от  $Q$  определяют по рис. 2.3.

$$Q = \frac{0,5 P_{\delta}}{k n_n} = \frac{0,5 * 1,76}{(0,6 * 1400)} = 1,04.$$

Для  $Q = 1,04$   $D_a = 0,068$  м.

Рекомендуемые для стартерных электродвигателей значения  $B_{\delta}, A, \alpha_{\delta}$  приведены на рис. 2.4 а, б, в.

$$B_{\delta} = 0,86 \text{ Тл}, A = 48000 \text{ А/м}, \alpha_{\delta} = 0,65.$$

4.2.3. Наружный диаметр корпуса  $D_j$  определяется из соотношения

$$D_j = (1,45 \dots 1,65) D_a = 1,5 * 0,068 = 0,102 \text{ м}.$$

Рекомендованные значения  $D_j$  выбираются в соответствии с табл. П14.

#### 4.2.4. Длина пакета якоря

$$l_a = \frac{6,1P_s}{B_\delta * A * D_a^2 * \alpha_\delta * n} = \frac{6,1 * 1,76 * 10^3}{(0,65 * 0,86 * 48000 * 1400 * 0,068^2)} = 0,061 \text{ м.}$$

### 4.3. ОБМОТОЧНЫЕ ДАННЫЕ ЯКОРЯ

#### 4.3.1. Основной магнитный поток, Вб,

$$\Phi = a_\delta * \tau * l_a * B_\delta = 0,65 * 0,0533 * 0,061 * 0,86 = 0,00181 \text{ Вб};$$

Где  $\tau = \pi D_a / 2p = 3,14 * 0,068 / 2 * 2 = 0,0533$  – полюсное деление, м;  
 $p$  – число пар полюсов,  $p=2$ .

#### 4.3.2. Число проводников обмотки якоря, предварительно

$$N' = 60 a E_a / (pn\Phi) = 60 * 1 * 4,2 / 2 * 1400 * 0,00124 = 72,5.$$

Принимаем  $N' = 72$ .

4.3.3. Число пазов якоря  $Z$  в четырехполюсных стартерных электродвигателях должно быть нечетным (в пределах 19.. 31).

Принимаем  $Z=23$ .

#### 4.3.4. Число витков в секции обмотки якоря, предварительно

$$W_c = (0,5 * N) / z = 0,5 * 72 / 23 = 1,56.$$

Принимаем  $W_c=1$ .

Уточненные число проводников, линейная нагрузка, длина пакета якоря и величина магнитного потока равны:

$$N_{ym} = 2 * W_c * z = 2 * 1 * 23 = 46;$$

$$A_{ym} = (N_{ym} * I_a) / 2a\pi * D_a = 46 * 419 / 2 * 1 * 3,14 * 0,068 = 45134 \text{ А/м.}$$

$$l_a = \frac{6,1P_s}{B_\delta * A * D_a^2 * \alpha_\delta * n} = \frac{6,1 * 1,76 * 10^3}{(0,65 * 0,86 * 45134 * 1400 * 0,068^2)} = 0,065 \text{ м.}$$

$$\Phi = a_\delta * \tau * l_a * B_\delta = 0,65 * 0,0533 * 0,065 * 0,86 = 0,00195 \text{ Вб.}$$

Обмотка якоря стартерных электродвигателей выполняется простой волновой с числом пар параллельных ветвей  $a = 1$ .

При этом принимается, что  $Z=K=S$ , где  $K$  – число коллекторных пластин,  $S$  – число секций обмотки.

Для простой волновой обмотки результирующий шаг по якорю и коллектору

$$y = y_k = \frac{K \mp 1}{p} = \frac{23 - 1}{2} = 11.$$

4.3.5. Первый частичный шаг обмотки по якорю должен быть равен целому числу

$$y_1 = \frac{z}{2p} = \frac{23}{4} = 5,75 = 6.$$

4.3.6. Второй частичный шаг

$$y_2 = y - y_1 = 11 - 6 = 5.$$

4.3.7. Суммарное сопротивление обмотки якоря и последовательной обмотки возбуждения, Ом,

$$R_{CT} = R_a + R_c = \Sigma R_a - R_\delta - R_{np} = 0,015 - 0,01 - 0,002 = 0,003.$$

4.3.8. Сопротивление обмотки якоря

$$R_a = (0,45 \dots 0,65) R_{CT} = 0,55 * 0,003 = 0,00165, \text{ Ом};$$

$$R_{np} = 0,002, \text{ Ом}.$$

4.3.9. Сечение проводников обмотки якоря,  $\text{м}^2$ ,

$$S_a = \frac{k_t * \rho * L_{acp} * N}{(2a)^2 * R_a} = \frac{1,02 * 0,0178 * 10^{-6} * 0,134 * 46}{4 * 0,00165} = 16,7 * 10^{-6} \text{ м}^2,$$

где  $k_t$  – коэффициент, учитывающий изменение сопротивления обмотки якоря при изменении температуры, равный  $1 + 0,004(t_a - 20^\circ)$ ;

$t_a = 25^\circ\text{C}$  – температура проводников обмотки якоря;

$\rho = 0,0178 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – удельное сопротивление материала проводов при температуре  $20^\circ\text{C}$ ;

$L_{acp}$  – средняя длина проводника, равная

$$L_{acp} = l_a + 1,3\tau = 0,065 + 1,3 * 0,053 = 0,134 \text{ м}.$$

По расчетной площади сечения проводников обмотки якоря для одновитковых секций выбирают по табл. П4 провод марки ПММ шириной  $b = 4,5$  и высотой  $a = 2,24$  с учетом рекомендуемого соотношения  $a/b$ .  $S_a = 9,72 \text{ мм}^2$ .

4.3.10. Плотность тока в проводниках обмотки якоря

$$j_a = I_a / (2a S_a) = 419 / 2 * 1 * 9,72 = 21,55 \text{ А/мм}^2$$

не превышает максимальную, равную  $30 \text{ А/мм}^2$  (см. табл. 2.1).



#### 4.4. РАЗМЕРЫ ЗУБЦОВО-ПАЗОВОЙ ЗОНЫ ЯКОРЯ

Форму и размеры паза выбирают из условия максимального заполнения, при этом магнитная индукция в минимальном сечении зубца должна быть 1,8...3,0 Тл (большие значения магнитной индукции относятся к стартерам большей мощности).

##### 4.4.1. Радиус закругления провода

$$r_{np\phi} = \sqrt{ab - Sa} = \sqrt{2,2 * 4,5 - 9,72} = 0,0002 \text{ м.}$$

Толщина изоляции паза  $\Delta a$  выбирается в соответствии с рекомендациями, содержащимися в приложении. В пазах якоря укладывают одновитковые секции простой волновой обмотки. Проводники одновитковых секций изолируют друг от друга и от пакета якоря изоляционным картоном толщиной 0,3 мм.

Ширина паза

$$b_{пз} = a + 2(\Delta a + 0,0003) = 0,00224 + 2 * (0,0002 + 0,0003) = 0,0032 \text{ м.}$$

Ширина шлица (прорези) паза

$$a_{ш} = 0,6 * a = 0,6 * 2,24 = 1,32 \text{ мм.}$$

4.4.2. Максимальный диаметр среднего (второго) участка зубцовой зоны, м,

$$D_{2max} = D_a - 2 * \left( h_{ш} + 0,5 \sqrt{b_{пз}^2 - a_{ш}^2} \right) = \\ 0,068 - 2 \left( 0,001 + 0,5 \sqrt{0,0032^2 - 0,00132^2} \right) = 0,0636.$$

##### 4.4.3. Высота второго участка зубцовой зоны

$$h_2 = b_{пз} + 2b - 4r_{np\phi} - 0,0003 - 0,0566 \sqrt{b_{пз} - 2r_{np\phi} - 0,001} = 0,0032 + 2 * 0,0045 - \\ - 4 * 0,0002 - 0,0003 - 0,0566 \sqrt{0,0032 - 2 * 0,0002 - 0,001} = 0,0087 \text{ м.}$$

##### 4.4.4. Минимальный диаметр второго участка зубцовой зоны

$$D_{2min} = D_{2max} - 2h_2 = 0,0636 - 2 * 0,0087 = 0,0462 \text{ м.}$$

##### 4.4.5. Расстояние между проводниками в пазу

$$l = h_2 - 2 * (b - OX) = 0,0087 - 2 * (0,0045 - 0,000832) = 0,0013 \text{ м,}$$

где

$$OX = KN + KF = KN + r_{np\phi} = 0,000632 + 0,0002 = 0,000832;$$

$$KN = \sqrt{OK^2 - ON^2} = \sqrt{0,0011^2 - 0,00092^2} = 0,000632 \text{ м;}$$

$$OK = 0,5b_{пз} - \Delta a - r_{np\phi} - 0,0001 = 0,5 * 0,0032 - 0,0002 - 0,0002 - 0,0001 = 0,0011 \text{ м;}$$

$$ON = 0,5a - r_{np\phi} = 0,5 * 0,00224 - 0,0002 = 0,00092 \text{ м.}$$

#### 4.4.6. Минимальный диаметр зубцовой зоны

$$D_{amin} = D_{2min} - b_{nz} = 0,0462 - 0,0032 = 0,043м.$$

### 4.5. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ СТАРТЕРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

#### 4.5.1. Общий поток полюса

$$\Phi_m = \sigma\Phi = 1,2 * 0,00195 = 0,00234Вб,$$

где  $\sigma = 1,1...1,25$  – коэффициент, учитывающий рассеяние потока.

Требуемую для создания расчетного магнитного потока МДС обмоток возбуждения определяют суммированием падений магнитного потенциала на отдельных участках магнитной цепи (см. рис. 2.6). В стартерных электродвигателях выделяют шесть участков: воздушный зазор  $\delta$ ; зубцовая зона; спинка якоря; полюс; корпус; зазор в стыке полюса с корпусом  $\delta_{стк}$ .

#### 4.5.2. Размеры участков магнитной цепи и магнитные нагрузки.

Длина средней магнитной силовой линии воздушного зазора

$$L_{\delta} = 2\delta = 2 * 0,0005 = 0,001м.$$

Длина средней магнитной силовой линии воздушного зазора в стыке полюса с корпусом  $L_{стк} = 2\delta_{стк} = 0,0001$  м.

Зубцовая зона якоря:

– диаметры:

$$D_a = 0,068 \text{ м}$$

$$D_1 = 0,5(D_a + D_{2max}) = 0,5 * (0,068 + 0,0636) = 0,0658м;$$

$$D_{2max} = 0,0636 \text{ м}$$

$$D_{2cp} = 0,5(D_{2max} + D_{2min}) = 0,5(0,0636 + 0,0462) = 0,0549м;$$

$$D_{2min} = 0,0462 \text{ м}$$

$$D_3 = D_{2min} - 0,5b_{nz} = 0,0462 - 0,5 * 0,0032 = 0,0446м;$$

– ширина:

$$b_z = t_z - a_{uu} = 0,0093 - 0,00132 = 0,00798м;$$

$$t_z = \frac{\pi D_a}{z} = \frac{3,14 * 0,068}{23} = 0,0093м;$$

$$h_1 = 0,5(D_a - D_{2\max}) = 0,5(0,068 - 0,0636) = 0,0022\text{м};$$

$$t_1 = \frac{\pi D_1}{z} = 3,14 * \frac{0,0658}{23} = 0,00898\text{м};$$

$$b_1 = t_1 - \sqrt{b_{n3}^2 - h_1^2} = 0,00898 - \sqrt{0,0032^2 - 0,0022^2} = 0,0067\text{м};$$

$$b_{2\max} = t_{2\max} - b_{n3} = 0,0087 - 0,0032 = 0,0059\text{м};$$

$$t_{2\max} = \frac{\pi D_{2\max}}{z} = 3,14 * \frac{0,0636}{23} = 0,0087\text{м};$$

$$b_{2cp} = t_{2cp} - b_{n3} = 0,0075 - 0,0032 = 0,0043\text{м};$$

$$t_{2cp} = \frac{\pi D_{2cp}}{z} = 3,14 * \frac{0,0549}{23} = 0,0075\text{м};$$

$$b_{2min} = t_{2min} - b_{n3} = 0,0063 - 0,0032 = 0,0031\text{м};$$

$$t_{2min} = \frac{\pi D_{2min}}{z} = 3,14 * \frac{0,0462}{23} = 0,0063\text{м};$$

$$b_3 = t_3 - 0,866 * b_{n3} = 0,006 - 0,866 * 0,0032 = 0,0032\text{м};$$

$$t_3 = \frac{\pi D_3}{z} = 3,14 * \frac{0,0446}{23} = 0,006\text{м};$$

$$h_3 = 0,5b_{n3} = 0,5 * 0,0032 = 0,0016\text{м};$$

$$h_z = h_1 + h_2 + h_3 = 0,0022 + 0,0087 + 0,0016 = 0,0125\text{м}.$$

Сердечник якоря:

– длина  $l_\delta = l_a = 0,065\text{м};$

– диаметр  $D_{amin} = 0,043\text{м};$

$$d_g = 0,3D_a = 0,3 * 0,068 = 0,02\text{м};$$

– высота  $h_a = 0,5(D_a - 2h_z - d_g) = 0,5 * (0,068 - 2 * 0,0125 - 0,02) = 0,0115\text{м}.$

Полюс и полюсный наконечник:

– диаметр расточки полюсов

$$D_n = D_a + 2\delta = 0,068 + 2 * 0,0005 = 0,069\text{м};$$

– ширина полюсной дуги

$$b_n = \alpha_\delta \tau + 2\delta = 0,65 * 0,0533 + 2 * 0,005 = 0,04464 м;$$

– высота полюса

$$h_m = 0,5(D_j - D_n - 2 * h_j) = 0,5(0,102 - 0,069 - 2 * 0,0089) = 0,0076 м;$$

– высота наконечника полюса

$$h_{нк} = 0,25h_m = 0,25 * 0,0076 = 0,002 м;$$

– длина полюса

$$l_m = l_a = 0,065 м;$$

– ширина сердечника полюса

$$b_m = \frac{\sigma * \Phi}{B_m * l_m} = \frac{1,2 * 0,00195}{1,4 * 0,065} = 0,026 м;$$

– воздушный зазор между корпусом и полюсом

$$\delta_{стк} = 0,0001 м.$$

Корпус:

– внешний диаметр

$$D_j = 1,5 * D_a = 1,5 * 0,068 = 0,102 м;$$

– высота

$$h_j = \frac{\sigma \Phi}{2B_j l_j} = \frac{1,2 * 0,00195}{2 * 1,1 * 0,118} = 0,0089 м;$$

– длина

$$l_j = 1,8 * l_a = 1,8 * 0,065 = 0,118 м.$$

#### 4.6. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ СТАРТЕРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Расчет характеристики намагничивания при заданных индукциях на участках сводится к определению напряженности магнитного поля, падения магнитного потенциала на отдельных участках магнитной цепи и суммарной МДС для фиксированных значений магнитной индукции в воздушном зазоре: 0,3 Тл; 0,6 Тл; 0,7 Тл; 1 Тл; 1,1 Тл.

Расчет МДС зубцов проводят на один зубцовый шаг  $t_z$  с учетом вытеснения магнитного потока в паз, если наибольшая индукция в зубцах превышает 1,8 Тл.

4.6.1. Воздушный зазор,  $B_\delta=0,6$  Тл:

– расчетный коэффициент

$$K_\delta = \frac{t_z + 10 * \delta}{b_z + 10 * \delta} = \frac{0.0093 + 10 * 0.0005}{0.00798 + 10 * 0.0005} = 1.11;$$

– МДС

$$F_\delta = \frac{2 * K_\delta * \delta * B_\delta}{\mu_0} = \frac{2 * 1.11 * 0.0005 * 0.6}{(4 * 3.14 * 10^{-7})} = 530 A.$$

4.6.2. Зубцовая зона якоря.

Первый участок:

– расчетный коэффициент

$$K_z = \frac{t_1}{K_c * b_1} = \frac{0.0089}{0.97 * 0.0067} = 1.3;$$

– индукция

$$B_1 = \frac{t_z * B_\delta}{(K_c * b_1)} = \frac{0.009 * 0.6}{0.97 * 0.0067} = 0.83 \text{Тл};$$

– напряженность магнитного поля по кривым рис. 2.8

$$H_1 = 540 A / м;$$

– МДС

$$Fz1 = 2 * h_1 H_1 = 2 * 0.0022 * 540 = 2.37 A.$$

Второй участок:

– расчетные коэффициенты

$$K_{zmin} = \frac{t_{2max}}{K_c * b_{2max}} - 1 = \frac{0.0087}{0.97 * 0.0059} - 1 = 0,52,$$

$$K_{zcc} = \frac{t_{2cp}}{K_c * b_{2cp}} - 1 = \frac{0.0075}{0.97 * 0.0043} - 1 = 0,798,$$

$$K_{zmax} = \frac{t_{2min}}{K_c * b_{2min}} - 1 = \frac{0.0063}{0.97 * 0.0031} - 1 = 1,09;$$

– индукция

$$B_{zmin} = \frac{t_z * B_\delta}{(K_c * b_{2max})} = \frac{0.0093 * 0.6}{0.97 * 0.0059} = 1,02 \text{Тл},$$

$$B_{zcc} = \frac{t_z * B_\delta}{(K_c * b_{2cp})} = \frac{0.0093 * 0.6}{0.97 * 0.0043} = 1,29 \text{Тл},$$

$$B_{zmax} = \frac{t_z * B_\delta}{(K_c * b_{2min})} = \frac{0.0093 * 0.6}{0.97 * 0.0031} = 1.8 \text{Тл};$$

– напряженность магнитного поля по кривым рис. 2.8

$$H_{2min} = 700 \text{А/м},$$

$$H_{2cp} = 1050 \text{А/м},$$

$$H_{2max} = 8000 \text{А/м};$$

$$H_2 = (H_{2min} + 4 * H_{2cp} + H_{2max}) / 6 = (700 + 4 * 1050 + 8000) / 6 = 2150 \text{А/м};$$

– МДС

$$F_{z2} = 2 * h_2 H_2 = 2 * 0.0087 * 2150 = 37,41 \text{А}.$$

Третий участок:

– расчетный коэффициент

$$K_{z3} = \frac{t_3}{K_c * b_3} - 1 = \frac{0.006}{0.97 * 0.0032} - 1 = 0,93,$$

– индукция

$$B_3 = \frac{t_z * B_\delta}{(K_c * b_3)} = \frac{0.0093 * 0.6}{0.97 * 0.0032} = 1.75 \text{Тл},$$

– напряженность магнитного поля по кривым рис. 2.8.

$$H_3 = 6000 \text{А/м},$$

– МДС

$$F_{z3} = 2 * h_3 H_3 = 2 * 0.0016 * 6000 = 19,2 \text{А}.$$

$$F_z = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} = 2.37 + 37,41 + 19,2 = 58,98 \text{А}.$$

4.6.3. Сердечник якоря:

– средняя длина пути магнитного потока

$$L_a = \frac{\pi(d_\delta + h_a)}{4p} + h_a = \frac{3.14 * (0.02 + 0.0115)}{4 * 2} + 0.0115 = 0.0407 \text{м},$$

– индукция

$$B_a = \frac{\alpha_\delta * \tau * B_\delta}{(2 * K_c * h_a)} = \frac{0.65 * 0.0533 * 0.6}{2 * 0.97 * 0.0115} = 0.93 \text{ Тл},$$

– напряженность магнитного поля по кривым рис. 2.8

$$H_a = 550 \text{ А/м},$$

– МДС

$$F_a = L_a * H_a = 0.0407 * 550 = 22,36 \text{ А}.$$

#### 4.6.4. Полюс:

– индукция

$$B_m = \frac{\sigma \alpha_\delta \tau l_a B_\delta}{b_m * l_m} = \frac{1.2 * 0.65 * 0.053 * 0.065 * 0,6}{0.026 * 0.065} = 0.95 \text{ Тл},$$

– напряженность магнитного поля по кривым рис. 2.8

$$H_m = 740 \text{ А/м}$$

– МДС

$$F_m = 2 * h_m * H_m = 2 * 0,0076 * 740 = 11,24 \text{ А}.$$

#### 4.6.5. Стык между полюсом и корпусом:

– МДС

$$F_{\delta_{стк}} = 2 \delta_{стк} * B_m / \mu_0 = 2 * 0,0001 * 0,95 / 12,56 * 10^{-7} = 151 \text{ А}.$$

#### 4.6.6. Корпус:

– средняя длина пути магнитного потока

$$L_j = \frac{\pi(D_j - h_j)}{4p} + h_j = 3.14 * \frac{0.102 - 0.0089}{(4 * 2)} + 0,0089 = 0.0454 \text{ м},$$

– индукция

$$B_j = \frac{\sigma \alpha_\delta \tau l_a B_\delta}{2 * l_j * h_j} = \frac{1.2 * 0.65 * 0.053 * 0.065 * 0,6}{2 * 0.118 * 0.0089} = 0.77 \text{ Тл},$$

– напряженность магнитного поля по кривым рис. 2.8

$$H_j = 400 \text{ А/м},$$

– МДС

$$F_j = L_j * H_j = 0.0454 * 400 = 18.3 \text{ А}.$$

#### 4.6.7. Суммарная МДС:

$$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_a + F_m + F_{\delta_{стк}} + F_j =$$

$$530,25 + 58,98 + 22,36 + 151 + 18,3 = 788,68 \text{ А},$$

$$F_{\delta_{за}} = F_\delta + F_z + F_a = 530,25 + 58,98 + 22,36 = 581,64 \text{ А}.$$

Результаты расчета для всех значений магнитной индукции в воздушном зазоре сведены в табл. 4.1, а на рис. 4.1 построены характеристики намагничивания.

Таблица 4.1

**Характеристики намагничивания стартерного двигателя**

	Магнитная индукция, Тл					
$B_{\delta}$	0,3	0,5	0,6	0,7	1	1,1
$B_1$	0,39	0,66	0,83	0,96	1,32	1,45
$B_{zmin}$	0,47	0,78	1,02	1,19	1,57	1,73
$B_{zcp}$	0,57	0,95	1,29	1,35	1,93	2,13
$B_{zmax}$	0,75	1,25	1,8	2,1	2,51	2,75
$B_3$	0,69	1,5	1,75	1,9	2,3	2,5
$B_a$	0,40	0,67	0,93	1,2	1,35	1,48
$B_{гп}$	0,49	0,79	0,95	1,15	1,64	1,8
$B_{стк}$	0,49	0,79	0,95	1,15	1,64	1,8
$B_j$	0,390127	0,65	0,77	0,91	1,30	1,43
	Напряженность магнитного поля, А/м					
$H_1$	180	430	540	720	1150	1800
$H_{zmin}$	250	500	700	740	3800	6000
$H_{zcp}$	270	720	1050	1400	14000	28000
$H_{zmax}$	470	970	8000	28000	95000	140000
$H_2$	300	725	2150	5723	25800	43000
$H_3$	450	750	6000	14000	47000	78000
$H_a$	185	435	550	735	1170	4000
$H_m$	300	580	740	950	3900	8000
$H_j$	187	310	400	750	1050	1700
	МДС, А					
$F_{\delta}$	265,1	441,8	530	618,6	883,75	972,13
$F_1$	0,72	1,72	2,37	2,88	4,6	7,2
$F_2$	5,22	9,86	37,41	97,3	438,6	731
$F_3$	1,44	2,4	19,2	44,8	82,5	249
$F_a$	11,18	16,4	22,36	32,3	46,42	164
$F_m$	4,56	6,51	11,24	14,4	59,28	121,5
$F_{стк}$	75	125	151	176	252	276
$F_j$	6,8	15,0	18,3	27,45	35,42	62,22
$F_{\Sigma}$	370,02	618,69	788,68	1013,73	1805,27	2583,05
$F_{\delta za}$	283,66	472,18	608,14	795,88	1458,57	2123,28



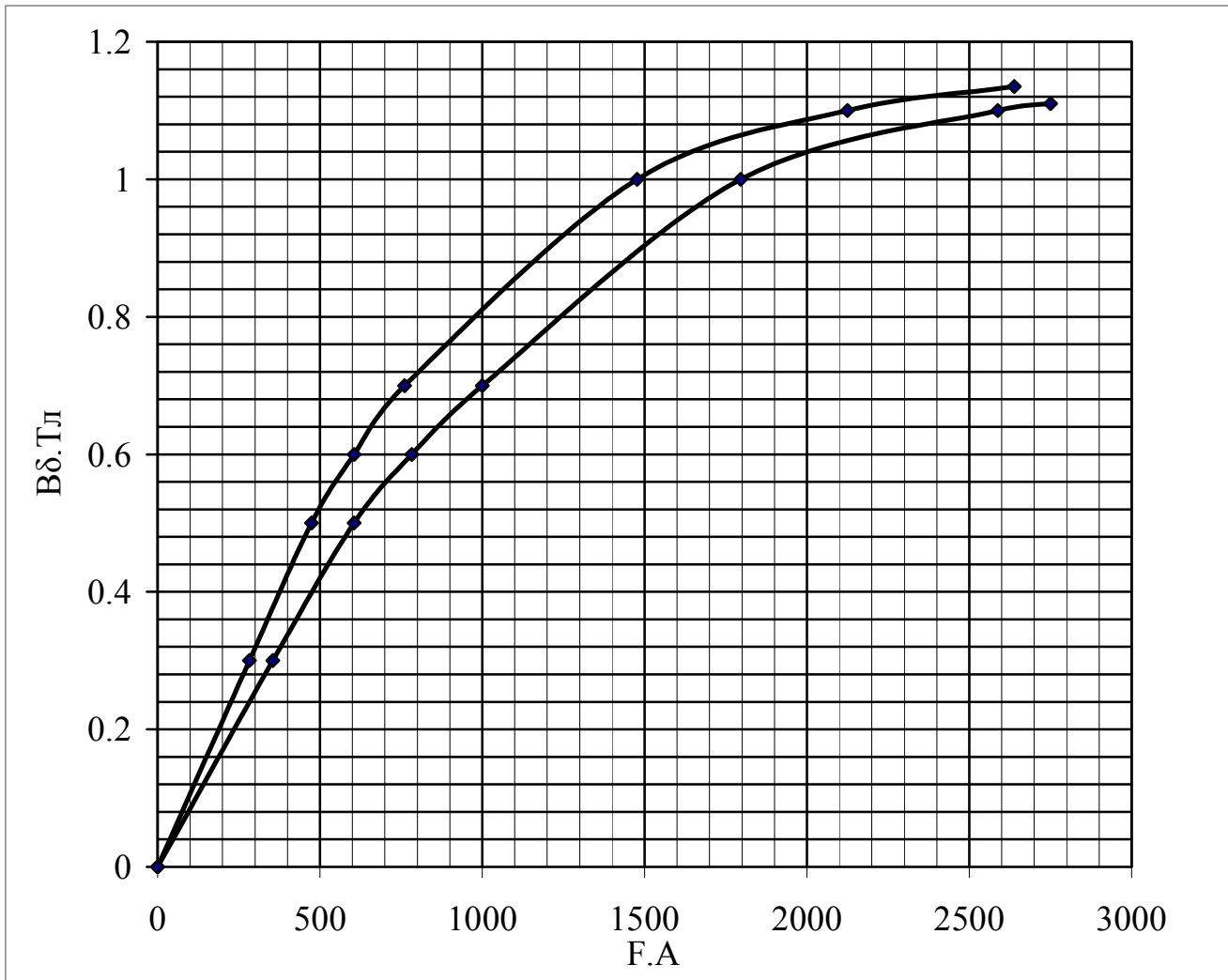


Рис. 4.1. Характеристики намагничивания стартерного двигателя

#### 4.7. РАСЧЕТ ОБМОТОЧНЫХ ДАННЫХ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

4.7.1. Требуемая МДС возбуждения с учетом размагничивающего действия реакции якоря предварительно равна

$$F_g = (1,2...1,5) * \Sigma F = 1,35 * 1180 = 1593 A,$$

где для  $B_\delta = 0,86 Tл$  по характеристике намагничивания

$$\Sigma F = 1180 A.$$

4.7.2. Число витков катушки возбуждения стартерного электродвигателя с последовательным возбуждением

$$w_{к.с} = \frac{a_c F_g}{2I_a} = \frac{1 * 1593}{2 * 419} = 1,9, \text{ принимаем } w_{к.с} = 2,$$

где  $a_c$  – число параллельных ветвей в обмотке возбуждения, при последовательном соединении всех 4 катушек возбуждения  $a_c=1$ .

#### 4.7.3. Сопротивление последовательной обмотки возбуждения

$$R_c = R_{cm} - R_{aym} = 0,003 - 0,0028 = 0,0002 \text{ Ом},$$

где  $R_{aym}$  – уточненное сопротивление обмотки якоря.

$$R_{aym} = (K_{tyy} * \rho * L_{acc} * N_{ym}) / ((2 * a_a)^2 * S_a) =$$

$$1,02 * 0,0178 * 10^{-6} * 0,134 * 46 / (2 * 1)^2 * 9,72 * 10^{-6} = 0,0028 \text{ Ом}$$

#### 4.7.4. Сопротивление катушки

$$R_{kc} = a_c * R_c / Z_c = 1 * 0,0002 / 4 = 0,00005 \text{ Ом},$$

где  $Z_c$  – число катушек последовательной обмотки возбуждения.

#### 4.7.5. Средняя длина витка катушки

$$L_{kcp} = 2 * (l_m + b_m) + \pi * b_k^* = 2 * (0,065 + 0,026) + 3,14 * 0,012 = 0,219 \text{ м},$$

где  $l_m$  – длина полюса;  $b_m$  – ширина полюса;  $b_k^*$  – максимально возможная ширина катушки, определяемая по эскизу магнитной цепи электродвигателя,  $b_k^* = 0,012 \text{ м}$ .

#### 4.7.6. Сечение провода обмотки возбуждения

$$S_c = \frac{k_t * \rho * L_{kcp} * w_{kc}}{R_{kc}} = \frac{1,02 * 1,785 * 10^{-8} * 0,219 * 2,0}{0,00005} = 159 * 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Исходя из допустимой плотности тока  $j_{доп} = 28 \text{ А/мм}^2$  сечение провода  $S_c = 419 / 28 = 14,96 \text{ мм}^2$ .

#### 4.7.7. Высота катушки возбуждения

$$h_k = h_m - h_{нк} = 0,0076 - 0,002 = 0,0056 \text{ м},$$

где  $h_{нк} = 0,25 * h_m = 0,25 * 0,0076 = 0,002 \text{ м}$  – высота наконечника полюса.

#### 4.7.8. Толщина провода катушки возбуждения при намотке на ребро

$$a = (h_k - 2\Delta_{вн}) / w_{kc} = (0,0056 - 2 * 0,0011) / 2 = 0,0017 \text{ м},$$

где  $\Delta_{вн}$  – толщина внешней изоляции катушки.

4.7.9. По максимальной ширине катушки  $b_k^* = 0,012 \text{ м}$  и толщине провода  $a = 0,0017 \text{ м}$  выбираем прямоугольный провод с размерами  $a = 1,5 \text{ мм}$  и  $b = 10,0 \text{ мм}$  площадью  $S_c = 14,79 \text{ мм}^2$ .

#### 4.7.10. Уточненная ширина катушки

$$b_k = b + 2\Delta_{вн} = 0,01 + 2 * 0,0011 = 0,0122 \text{ м}.$$

#### 4.7.11. Средняя длина витка катушки

$$L_{кр.ум.} = 2 * (lm + bm) + \pi * bk = 2 * (0.065 + 0.026) + 3.14 * 0.0122 = 0.22 м.$$

#### 4.7.12. Сопротивление катушки (уточнение)

$$R_{кc} = \frac{k1 * \rho * L_{кр.ум.} * w_{кc}}{Sc} = \frac{1,02 * 1,78 * 10^{-8} * 0,22 * 2,0}{14,79 * 10^{-6}} = 0,00054 Ом.$$

#### 4.7.13. Сопротивление обмотки возбуждения

$$Rc = \frac{Zc * R_{кc}}{ac^2} = \frac{4 * 0,00054}{1^2} = 0,00216 Ом.$$

#### 4.7.14. Плотность тока

$$jc = \frac{Ia}{(ac * Sc)} = \frac{1,2 * 419}{1 * 14,79 * 10^{-6}} = 28,33 * 10^{-6} А / м^2.$$

### 4.8. РАСЧЕТ КОЛЛЕКТОРА И ВЫБОР ЩЕТОК

#### 4.8.1. Задаемся диаметром цилиндрического коллектора

$$D_k = 0,6 D_a = 0.6 * 0.068 = 0.0408 м.$$

По табл. П15 принимаем стандартный цилиндрический коллектор диаметром 40 мм.

#### 4.8.2. Наружный диаметр коллектора по петушкам

$$D_n = D_k + 4 * b + 0.002 = 0.04 + 4 * 0.00238 + 0.002 = 0.052 м.$$

#### 4.8.3. Коллекторное деление

$$\beta_k = \frac{\pi * D_k}{k} = \frac{3,14 * 0,04}{23} = 0,0054 м.$$

#### 4.8.4. Ширина коллекторной пластины

$$b_k = \beta_k - \Delta_{из.к} = 0,0054 - 0,0006 = 0,00486 м.$$

#### 4.8.5. Ширина щетки

$$b_{щ} = 2 * \beta_k = 2 * 0,0054 = 0,0108 м.$$

#### 4.8.6. Площадь щетки

$$S_{щ} = \frac{I_a}{P_{щб} * N_{щб} * j_{щ}} = \frac{419}{2 * 1 * 85 * 10^4} = 0,000205 м^2,$$

где  $j_{щ} = 85 А / см^2$  – плотность тока в щетках.

#### 4.8.7. Длина щетки

$$l_{щ} = \frac{S_{щ}}{b_{щ}} = \frac{0,000205}{0,0108} = 0,0189 м.$$

По табл. П15 выбираем щетку шириной  $b_{щ} = 0,012$  м и длиной  $l_{щ} = 0,021$  м.

4.8.8. Уточняем плотность тока в щетке

$$j_{щ} = \frac{I_a}{P_{щб} * N_{щб} * S_{щ}} = \frac{419}{2 * 1 * 0,012 * 0,021} = 83 * 10^4 \text{ A/м}^2.$$

4.8.9. Перекрытие пластин

$$\frac{b_{щ}}{b_{к}} = \frac{0,012}{0,0048} = 2,5.$$

4.8.10. Длина рабочей поверхности коллектора

$$l_{ка} = l_{щ} * N_{щб} + a + c = 0,021 * 1 + 0,006 + 0,006 = 0,033 \text{ м.}$$

4.8.11. Длина петушка

$$q = (1,4 \dots 1,8) b = 1,6 * 2,38 = 3,8 \text{ мм.}$$

4.8.12. Полная длина коллектора

$$l_{к} = l_{ка} + q = 0,033 + 0,0038 = 0,0368 \text{ м.}$$

4.8.13. Скорость вращения рабочей поверхности коллектора

$$v_{к} = \frac{\pi * D_{к} * n}{60} = \frac{3,14 * 0,04 * 1400}{60} = 2,93 \text{ м/с.}$$

4.8.14. Общая площадь всех щеток

$$\sum S_{щ} = 2 * P_{щб} * N_{щб} * S_{щ} = 2 * 2 * 1 * 0,012 * 0,021 = 0,00101 \text{ м}^2.$$

## 4.9. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

4.9.1. Уточненное суммарное сопротивление цепи якоря

$$\sum R_a = R_a + R_c + R_b + R_{пр} = 0,0028 + 0,00216 + 0,01 + 0,002 = 0,017 \text{ Ом.}$$

Ток якоря в режиме торможения

$$I_{к.см} = \frac{U_n - \Delta U_{щ}}{\sum R_a} = \frac{12 - 1,5}{0,017} = 617 \text{ А.}$$

4.9.2. Сила тока при  $P_{эmax}$

$$I_{ам} = \frac{I_{к.см}}{2} = \frac{617}{2} = 308 \text{ А.}$$

4.9.3. Максимальная электромагнитная мощность

$$P_{эmax} = \frac{(U_n - \Delta U_{щ})^2}{4 \sum R_a} = \frac{(12 - 1,5)^2}{(4 * 0,017)} = 1621 \text{ Вт.}$$

#### 4.9.4. Напряжение на клеммах стартера

$$U_{cm} = U_n - R_\delta * I_a = 12 - 0.01 * 308 = 8.92B.$$

#### 4.9.5. МДС возбуждение на два полюса

$$F_{\delta i} = \frac{2 * w_{kc} * I_{ai}}{a_c} = \frac{2 * 2 * 308}{1} = 1232A.$$

#### 4.9.6. Линейная нагрузка якоря

$$A_i = \frac{N_{ym} * I_{ai}}{2 * a * \pi * D_a} = \frac{46 * 308}{2 * 1 * 3.14 * 0.068} = 33733A/м.$$

#### 4.9.7. МДС поперечной реакции якоря

$$F_{qi} = \frac{\alpha_\delta * \tau}{2} * A_i = \frac{0.65 * 0.0533}{2} * 33733 = 574A.$$

#### 4.9.8. ЭДС в обмотке якоря

$$E_{ai} = U_n - \Delta U_{\omega} - I_{ai} * \sum R_a = 12 - 1.5 - 308 * 0.017 = 5,27B.$$

#### 4.9.9. Магнитная индукция в воздушном зазоре

$$B_{\delta i} = 0,8Tл (B_{\delta i} = f(F_{\delta i}) \text{ по характеристике } B_\delta = f(F_\Sigma)).$$

#### 4.9.10. МДС возбуждения по переходной характеристике

$$F_{\delta zai} = 975A (\text{по характеристике } B_\delta = f(F_{\delta za})).$$

#### 4.9.11. МДС под краями полюсов

$$F_{mini} = F_{\delta zai} + F_{qi} = 975 - 574 = 401A.$$

$$F_{maxi} = F_{\delta zai} - F_{qi} = 975 + 574 = 1549A.$$

#### 4.9.12. По переходной характеристике находят значение $B_{\delta maxi}$ и $B_{\delta mini}$ :

$$B_{\delta maxi} = 1.025Tл;$$

$$B_{\delta mini} = 0,425Tл.$$

#### 4.9.13. Магнитная индукция $B^*_{\delta i}$ в воздушном зазоре при нагрузке с учетом размагничивающего действия реакции якоря

$$B^*_{\delta} = \frac{1}{6} * (B_{\delta maxi} + 4 * B_{\delta i} + B_{\delta mini}) = \frac{1,025 + 4 * 0,8 + 0,425}{6} = 0,775Tл.$$

#### 4.9.14. Магнитный поток

$$\Phi_{назpi} = \alpha_{\delta} * \tau * l_a * B_{\delta}^* = 0.65 * 0.0533 * 0.065 * 0,775 = 0.00174 \text{ Вб}.$$

#### 4.9.15. Частота вращения якоря

$$n_i = \frac{60 * a * E_{ai}}{p * N * \Phi_{назpi}} = \frac{60 * 1 * 5,27}{2 * 46 * 0,00174} = 1975 (\text{Об} / \text{мин}).$$

#### 4.9.16. Мощность

$$P_{li} = U_{cmi} * I_{ai} = 8,92 * 308 = 2747 \text{ Вт}.$$

#### 4.9.17. Потери на трение в подшипниках

$$\Delta P_{подi} = 0,03 \left( \frac{n_i}{n_{max}} \right) P_{эmax} = 0.03 * \left( \frac{1975}{1975} \right) * 1621 = 48,63 \text{ Вт}.$$

#### 4.9.18. Потери на трение в щетках

$$\Delta P_{щi} = 7500 \sum S_{щ} * \pi D_k n_i / 60 = 7500 * 0,00101 * 3,14 * 0,04 * 1975 / 60 = 31,31 \text{ Вт}.$$

#### 4.9.19. Частота перемагничивания стали

$$f_i = \frac{p * n_i}{60} = \frac{2 * 1975}{60} = 65,83 \text{ Гц}.$$

#### 4.9.20. Диаметр на 1/3 от высоты трапецеидального участка зуба от основания

$$D_{1/3} = D_{2min} + 2 * \left( \frac{h_2}{3} \right) = 0.0462 + 2 * \frac{0.0087}{3} = 0.052 \text{ м}.$$

#### 4.9.21. Зубцовый шаг по диаметру

$$t_{1/3} = \pi * \frac{D_{1/3}}{z} = \frac{3.14 * 0.052}{23} = 0.0071 \text{ м}.$$

#### 4.9.22. Ширина зуба по диаметру $D_{1/3}$

$$b_{1/3} = t_{1/3} - b_{nz} = 0,0071 - 0,0028 = 0,0043 \text{ м}.$$

#### 4.9.23. Магнитная индукция в сечении зуба

$$B_{1/3} = \frac{t_z * B_{\delta i}}{K_{cm} * b_{1/3}} = \frac{0,0071 * 0,775}{0,97 * 0,0043} = 1,32 \text{ Тл}.$$

#### 4.9.24. Магнитная индукция в сердечнике якоря

$$B_a = \frac{\alpha_{\delta} * \tau * B_{\delta i}}{(2 * K_c * h_a)} = \frac{0.65 * 0.0533 * 0,775}{2 * 0.97 * 0.0115} = 1.2 \text{ Тл}.$$

#### 4.9.25. Масса зубцового слоя

$$M_z = \gamma_{cm} K_c l_a [0,25\pi(D_a^2 - D_{amin}^2) - Z(b_{n3}h_2 + 0,25\pi b^2_{n3} + h_{ul}a_{ul})] =$$

$$7850 * 0,97 * 0,065 \left[ 0,25 * 3,14(0,068^2 - 0,043^2) - 23(0,0032 * 0,0087 + \right. \\ \left. + 0,25 * 3,14 * 0,0032^2 + 0,001 * 0,00132) \right] = 0,52 \text{кз.}$$

#### 4.9.26. Магнитные потери в зубцовом слое

$$\Delta P_{zi} = 2 * B_{1/3i}^2 * M_z (0,044 * f_i + 2240 * \Delta^2 * f_i^2) =$$

$$2 * 1,32^2 * 0,52 (0,044 * 65,83 + 2240 * 0,0012^2 * 65,83^2) = 30,56 \text{Вт},$$

где  $\Delta$  – толщина листов железа якоря = 0,0012 м.

#### 4.9.27. Масса сердечника якоря

$$M_a = 0,25 * \pi * \gamma_{cm} * K_{cm} * l_{ayy} * (D_{amin}^2 - d_e^2) =$$

$$0,25 * 3,14 * 7850 * 0,97 * 0,065 * (0,043^2 - 0,02^2) = 0,56 \text{кз.}$$

#### 4.9.28. Магнитные потери в сердечники якоря

$$\Delta P_{ai} = 2 * B_{ai}^2 * M_a (0,044 * f_i + 2240 \Delta^2 f_i^2) =$$

$$2 * 1,2^2 * 0,56 * (0,044 * 65,83 + 2240 * 0,0012^2 * 65,83^2) = 27,21 \text{Вт}.$$

#### 4.9.29. Суммарные потери

$$P_{магнi} = \Delta P_{zi} + \Delta P_{ai} = 30,56 + 27,21 = 57,77 \text{Вт}.$$

$$\Delta P_{мехi} = \Delta P_{подi} + \Delta P_{щi} = 48,63 + 31,31 = 79,94 \text{Вт}.$$

$$\Delta P_{mi} = \Delta P_{мехi} + \Delta P_{магi} = 27,98 + 71 = 98,98 \text{Вт}.$$

#### 4.9.30. Полезная мощность

$$P_{2i} = P_{эмакс} - \Delta P_{mi} = 1621 - 98,98 = 1522,1 \text{Вт}.$$

#### 4.9.31. Электромагнитный момент

$$M_i = \frac{9,55 * P_{эмакс}}{n_i} = \frac{9,55 * 1621}{1975} = 7,83 \text{Н * м}.$$

#### 4.9.32. Полезный момент на валу

$$M_{2i} = \frac{9,55 * P_{2i}}{n_i} = \frac{9,55 * 1522}{1975} = 7,35 \text{Н * м}.$$

#### 4.9.33. КПД двигателя

$$\eta_i = \frac{P_{2i}}{P_{1i}} = \frac{1522}{2747} = 0,55.$$

4.9.34. Аналогичные расчеты выполняются для тока якоря  $I_a = (0,1; 0,25; 0,75; 1,0)$   $I_{к.см}$  и  $I_{ан} = \kappa * I_{к.см}$ . Результаты расчета заносятся в табл. 4.2, строятся рабочие характеристики.

## Рабочие характеристики

№ п/п	Расчетные формулы	0,1 $I_{Kст}$	0,25 $I_{Kст}$	$I_{ам}$	$I_a$	0,75 $I_{Kст}$	$I_{Kст}$	Ед. измер.
		60	150	308	370	460	617	А
1	$E_{ai} = U_H - \Delta U_{щ} - I_{ai} \Sigma R_a$			5,27				В
2	$F_{\delta i} = 2w_{к.с.} I_{ai} / a_c$			1232				А
3	$B_{\delta i} = f(F_{\delta i})$ по характ. $B_{\delta} = f(F_{\Sigma})$			0,8				Тл
4	$F_{(z+a+\delta)_i}$ по характ. $B_{\delta} = f(F_{z+a+\delta})$			975				А
5	$F_{qi} = \alpha \frac{\tau}{2} \cdot \frac{N}{2a\pi D_a} \cdot I_{ai}$			574				А
6	$F_{\min i} = F_{(z+a+\delta)_i} - F_{qi}$			401				А
7	$F_{\max i} = F_{(z+a+\delta)_i} + F_{qi}$			1549				А
8	$B_{\delta \max i}$ по характеристике $B_{\delta} = f(F_{z+a+\delta})$			1,025				Тл
9	$B_{\delta \min i}$ по характеристике $B_{\delta} = f(F_{z+a+\delta})$			0,425				Тл
10	$B_{\delta i}^* = (B_{\delta \max i} + 4B_{\delta i} + B_{\delta \min i}) / 6$			0,775				Тл
11	$\Phi_{нагр.i} = \alpha_{\delta} \tau l_a B_{\delta i}^*$			0,00174				Вб
12	$n = a E_{ai} / (p N \Phi_{нагр.i})$			1975				об/мин
13	$U_{см.} = U_H - R_{\delta} I_{ai}$			8,92				В
14	$P_1 = U_{см.} I_{ai}$			2747				Вт
15	$P_9 = E_a I_{ai}$			1621				Вт
16	$\Delta p_{подш.} = 0,03(n / n_m) P_{9 \max}$			48,63				Вт
17	$\Delta p_{щ} = 7,5 \Sigma S_{щ} (\pi D_k n_i / 60) 10^3$			31,31				Вт
18	$f = pn / 60$			65,83				Hz
19	$B_{\frac{1}{3}} = t_z B_{\delta}^* / (K_{см} b_{\frac{1}{3}})$			1,32				Тл
20	$B_a = \alpha_{\delta} \tau B_{\delta}^* (2K_{см} h_a)$			1,2				Тл
21	$\Delta p_a = 2B_a^2 M_a (0,044f + 2240\Delta^2 f^2)$			27,21				Вт
22	$\Delta p_z = 2B_{\frac{1}{3}}^2 M_z (0,044f + 2240\Delta^2 f^2)$			30,56				Вт
23	$\Delta p_M = \Delta p_{подш.} + \Delta p_{щ} + \Delta p_a + \Delta p_z$			98,98				Вт
24	$P_2 = P_9 - \Delta P_M$			1522,1				Вт
25	$\eta = P_2 / P_1$			0,55				о. е.
26	$M = 9,55 P_9 / n$			7,83				нм
27	$M_2 = 9,55 P_2 / n$			7,35				нм



## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие типы обмотки якоря применяются в электростартерах?
2. Какие виды пазов применяются в якорях электростартеров?
3. Что влияет на выбор линейной нагрузки при поверочном расчете электродвигателя?
5. По каким показателям осуществляется выбор и расчет относительной геометрии электродвигателя и числа полюсов?
6. Какие характеристики называются рабочими характеристиками стартера?
7. Как определяется уровень качества проектируемого электростартерного двигателя?
8. Как определяется напряжение АБ в режиме пуска?

## 5. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОСТАРТЕРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И ВСТРОЕННЫМ ПЛАНЕТАРНЫМ РЕДУКТОРОМ

Исходные данные для расчета:

- номинальная мощность  $P_{2н} = 1200$  Вт;
- напряжение  $U_n = 12$  В;
- номинальная частота вращения  $n_n = 1230$  об/мин;
- режим работы кратковременный;
- число полюсов  $2p = 4$ ;
- тип обмотки якоря – простая волновая ( $2a_я = 2$ );
- кратность тока  $k = 0,5$ .

### 5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МОЩНОСТИ

5.1.1. Максимальная электромагнитная мощность двигателя

$$P_{э \max} = P_{2н} / 4 \cdot (1 - k) \cdot \eta_{эм} = 1200 / 4 \cdot (1 - 0,5) \cdot 0,5 \cdot 0,89 = 1348 \text{ Вт},$$

где  $\eta_{эм}$  – электромагнитный КПД (выбираем по рис. 2.1 и принимаем  $\eta_{эм} = 0,89$ ).

5.1.2. Частота вращения в максимальном режиме

$$n_{мн} = 0,5 \cdot n_n \cdot i / 1 - k = 0,5 \cdot 1230 \cdot 3,25 / 1 - 0,5 = 4000 \text{ об/мин},$$

где  $i$  – передаточное число планетарного редуктора.

Конструкция планетарного редуктора принята как у базового

$$i = Z2 / Z1 = 39 / 12 = 3,25.$$

5.1.3. ЭДС в обмотке якоря

$$E_a = E_{ам} = (U_n - \Delta U_{щ}) \cdot (1 - k) = (12 - 1,5) \cdot (1 - 0,5) = 5,25 \text{ В},$$

где  $\Delta U_{щ} = 1,5 \text{ В}$  для щеток марки МГСО.

5.1.4. Ток в расчетном режиме работы

$$I_a = I_{ам} = P_{эmax} / E_a = 1348 / 5,25 = 256,7 \text{ А}.$$

5.1.5. Суммарное сопротивление цепи якоря

$$\sum R_a = (U_n - \Delta U_{щ} - E_a) / I_{ам} = (12 - 1,5 - 5,25) / 256,7 = 0,0204 \text{ Ом}.$$

5.1.6. Номинальную емкость аккумуляторной батареи определяем по рис. 2.2 и округляем до ближайшего большего значения по ГОСТ 959.0-84, а ее тип 6СТ-55ЭМ выбираем по табл. П1.

5.1.7. Внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи

$$R_б = a_б \cdot U_n / C_{20} = 0,05 \cdot 12 / 55 = 0,011 \text{ Ом},$$

где  $a_б = 0,05$  – коэффициент аппроксимации вольтамперной характеристики батареи, определяется по табл. П2.

## 5.2. РАСЧЕТ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Совершенство конструкции электродвигателя зависит от правильного выбора диаметра  $D_a$  и длины  $l_a$  пакета якоря.

5.2.1. Диаметр якоря стартерного электродвигателя в зависимости от  $Q = 0,5 \cdot P_э / k n_n = 0,5 \cdot 1348 / 0,5 \cdot 4000 = 0,34$  определяем по рис. 2.3.  $D_a = 0,055 \text{ м}$ .

5.2.2. В стартере используется постоянный магнит из материала неодимферрумбор Nd-Fe-B марки VM38SH, для которого  $B_r = 1,2 \text{ Тл}$ ,  $H_c = 1200 \text{ кА/м}$  (рис. 5.1).

Магнитная индукции в воздушном зазоре равна

$$B_\delta = (0,8 - 1,0) \cdot B_r \cdot \sqrt{\gamma} = 1,0 \cdot \sqrt{0,43} \cdot 1,2 = 0,79 \text{ Тл},$$

где  $\gamma = (B_r \cdot 0,656) \cdot (H_c \cdot 0,656) / B_r \cdot H_c =$   
 $= (1,2 \cdot 0,656) \cdot (1200 \cdot 0,656) / 1,2 \cdot 1200 = 0,43.$

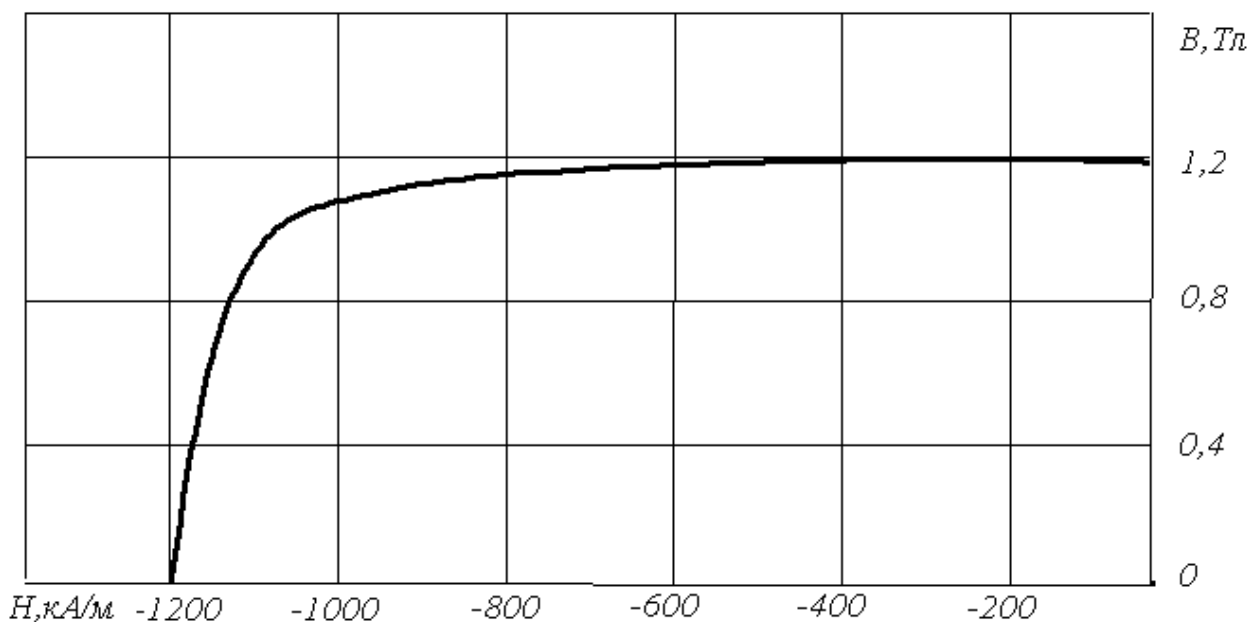


Рис. 5.1. Кривая размагничивания материала Nd-Fe-B марки BM38SH

### 5.2.3. Расчет наружного диаметра корпуса:

$$D_j = (1,45 \dots 1,65) \cdot D_a = 1,5 \cdot 0,055 = 0,0825 \text{ м.}$$

По табл. П14 принимаем  $D_j = 0,080 \text{ м.}$

5.2.4. Расчет длины пакета якоря. По рис. 2.4 находим линейную нагрузку якоря  $A = 22000 \text{ А/м}$  и коэффициент полюсного перекрытия  $\alpha_\delta = 0,64$ .

$$l_a = 6,1 \cdot P_{\text{эmax}} / A \cdot B_\delta \cdot \alpha_\delta \cdot n \cdot D_a^2 =$$

$$= 6,1 \cdot 1348 / 22000 \cdot 0,79 \cdot 0,64 \cdot 4000 \cdot (0,055)^2 = 0,062 \text{ м.}$$

### 5.2.5. Принимаем длину магнита

$$l_a = l_m = 0,062 \text{ м.}$$

### 5.2.6. Полюсное деление

$$\tau = \pi \cdot D_a / 2p = 3,14 \cdot 0,055 / 4 = 0,043 \text{ м.}$$

### 5.2.7. Расчет ширины магнита:

$$b_m = \alpha_\delta \cdot \tau = 0,64 \cdot 0,043 = 0,028 \text{ м.}$$

### 5.2.8. Расчет площади магнита:

$$S_m = b_m \cdot l_m = 0,028 \cdot 0,062 = 0,00173 \text{ м}^2.$$

### 5.2.9. Расчет основного магнитного потока:

$$\Phi = S_m \cdot B_\delta = 0,00173 \cdot 0,79 = 0,00137 \text{ Вб.}$$

### 5.3. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

5.3.1. Число проводников обмотки якоря, предварительно:

$$N' = 60 \cdot a_{\text{я}} \cdot E_a / p \cdot n \cdot \Phi = 60 \cdot 1 \cdot 5,25 / 2 \cdot 4000 \cdot 0,00137 = 28,74.$$

Число пазов пакета якоря  $Z = 19 \dots 31$ . Принимаем  $Z = K = S = 19$ .

5.3.2. Число витков в секции обмотки:

$$\omega_c = N' / 2 \cdot Z = 28 / 2 \cdot 19 = 0,74,$$

принимаем  $\omega_c = 1$ .

5.3.3. Уточненное число активных проводников

$$N_{\text{ут}} = 2 \cdot \omega_c \cdot Z = 2 \cdot 1 \cdot 19 = 38.$$

5.3.4. Уточненная величина линейной нагрузки якоря

$$A_{\text{ут}} = I_a \cdot N_{\text{ут}} / 2 \cdot a_{\text{я}} \cdot \pi \cdot D_a = 256,7 \cdot 38 / 2 \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 0,055 = 28241,4 \text{ А/м.}$$

5.3.5. Уточненная длина пакета якоря

$$l_{\text{аут}} = 6,1 \cdot P_{\text{эмакс}} / A \cdot B_{\delta} \cdot \alpha_{\delta} \cdot n \cdot D_a^2 = \\ = 6,1 \cdot 1348 / 28241,4 \cdot 0,79 \cdot 0,64 \cdot 4000 \cdot (0,055)^2 = 0,048 \text{ м.}$$

Соотношение  $\lambda = l_a / D_a = 0,048 / 0,055 = 0,87$  находится в пределах рекомендованного значения  $\lambda = 0,75 \div 1,25$ .

5.3.6. Уточненная величина основного магнитного потока

$$\Phi = \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot B_{\delta} \cdot l_a = 0,64 \cdot 0,043 \cdot 0,79 \cdot 0,048 = 0,0011 \text{ Вб.}$$

5.3.7. Шаг обмотки по коллектору и результирующий шаг

$$y_k = y = (k \pm 1) / p = (19 \pm 1) / 2 = 9.$$

5.3.8. Первый частичный шаг

$$y_1 = (Z / 2p) \pm \xi = (19 / 4) \pm 1/4 = 5.$$

5.3.9. Второй частичный шаг

$$y_2 = y - y_1 = 9 - 5 = 4.$$

5.3.10. Сопротивление обмотки якоря

$$R_{\text{ст}} = \sum R_a - R_b = 0,0204 - 0,011 = 0,0094 \text{ Ом,}$$

т. к.  $R_{\text{ст}} = R_a = 0,0094 \text{ Ом.}$

5.3.11. Средняя длина проводника

$$L_{\text{аср}} = l_a + 1,3\tau = 0,048 + 1,3 \cdot 0,043 = 0,1039 \text{ м.}$$

5.3.12. Площадь сечения проводника

$$S_a = K_t \cdot \rho \cdot L_{\text{аср}} \cdot N / (2a_{\text{я}})^2 \cdot R_a = \\ = 1,02 \cdot 17,83 \cdot 10^{-9} \cdot 0,104 \cdot 38 / (2 \cdot 1)^2 \cdot 0,0094 = 1,91 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

По максимальной допустимой плотности тока в обмотке якоря площадь поперечного сечения проводника должна быть равна

$$S_a = I_a / 2 a j_a = 256,7 / 2 \cdot 30 = 4,27 \text{ мм}^2.$$

По табл. П4 выбираем провод ПММ шириной  $b = 0,0028$  м, высотой  $a = 0,0016$  м и сечением  $S_a = 4,825 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ . Отношение  $a/b = 0,64$  находится в рекомендуемых пределах  $0,33 \div 0,73$ .

5.3.13. Уточненное сопротивление обмотки якоря

$$R_a = K_t \cdot \rho \cdot L_{аср} \cdot N / (2 \cdot a_{я})^2 \cdot S_a = \\ = 1 \cdot 17,83 \cdot 10^{-9} \cdot 0,104 \cdot 38 / (2 \cdot 1)^2 \cdot 4,825 \cdot 10^{-6} = 0,0036 \text{ Ом}.$$

5.3.14. Масса меди обмотки якоря

$$m_{мя} = \gamma_a \cdot L_{аср} \cdot N \cdot S_a = 8900 \cdot 0,104 \cdot 38 \cdot 4,825 \cdot 10^{-6} = 0,169 \text{ кг}.$$

#### 5.4. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ПОЛУЗАКРЫТОГО ПАЗА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Форму и размеры паза выбирают из условий максимального заполнения, при этом магнитная индукция в минимальном сечении зубца должна быть не более  $1,8 \dots 3,0$  Тл. Большие значения магнитной индукции относятся к стартерам большей мощности. Толщина изоляции паза выбирается в соответствии с рекомендациями и равна  $\Delta a = 0,0002 \dots 0,0004$  м, принимаем  $\Delta a = 0,0003$  м.

В пазах якоря укладываются одновитковые секции простой волновой обмотки. Проводники одновитковых секций изолируют друг от друга и от пакета якоря изоляционным картоном.

5.4.1. Радиус закругления провода

$$r_{пр} = 1,08 \cdot \sqrt{(a \cdot b) - S_a} = 1,08 \cdot \sqrt{(1,6 \cdot 2,8) \cdot 10^{-6} - 4,825 \cdot 10^{-6}} = 0,00011 \text{ м}.$$

5.4.2. Ширина паза

$$b_{пз} = a + 2 \cdot (\Delta a + 0,0003) = 0,0016 + 2 \cdot (0,0003 + 0,0003) = 0,0028 \text{ м},$$

где  $\Delta a = 0,0003$  м.

5.4.3. Ширина прорези паза

$$a_{пр} = 0,6 \cdot a = 0,6 \cdot 0,0016 = 0,00096 \text{ м}.$$

5.4.4. Максимальный диаметр второго участка зубцовой зоны

$$D_{2max} = D_a - 2 \cdot (h_{пр} + 0,5 \sqrt{b_{пз}^2 - a_{пр}^2}) =$$

$$= 0,055 - 2 \cdot (0,001 + 0,5 \sqrt{(0,0028)^2 - (0,00096)^2}) = 0,0504 \text{ м.}$$

#### 5.4.5. Высота второго участка зубцовой зоны

$$h_2 = b_{\text{пз}} + 2b - 4r_{\text{прв}} - 0,0003 - 0,0566 \cdot \sqrt{(b_{\text{пз}} - 2r_{\text{прв}} - 0,001)} = \\ = 0,0028 + 2 \cdot 0,0028 - 4 \cdot 0,00011 - 0,0003 - 0,0566 \sqrt{0,0028 - 2 \cdot 0,00011 - 0,001} = \\ = 0,0063 \text{ м.}$$

#### 5.4.6. Минимальный диаметр второго участка зубцовой зоны

$$D_{2\text{min}} = D_{2\text{max}} - 2h_2 = 0,0504 - 2 \cdot 0,0063 = 0,0378 \text{ м.}$$

#### 5.4.7. Расстояние между проводниками в пазу

$$l = h_2 - 2 \cdot (b - OX) = 0,0063 - 2 \cdot (0,0028 - 0,00121) = 0,00312 \text{ м,}$$

где  $OX = KN + KF = KN + r_{\text{прв}} = 0,0011 + 0,00011 = 0,00121 \text{ м;}$

$$KN = \sqrt{OK^2 + ON^2} = \sqrt{(0,00098)^2 + (0,00069)^2} = 0,0011 \text{ м;}$$

$$OK = 0,5 \cdot b_{\text{пз}} - \Delta a - r_{\text{прв}} - 0,0001 =$$

$$= 0,5 \cdot 0,0014 - 0,0003 - 0,00012 - 0,0001 = 0,00098 \text{ м;}$$

$$ON = 0,5 \cdot a - r_{\text{прв}} = 0,5 \cdot 0,0016 - 0,00011 = 0,00069 \text{ м.}$$

#### 5.4.8. Минимальный диаметр зубцовой зоны

$$D_{\text{amin}} = D_{2\text{min}} - b_{\text{пз}} = 0,0378 - 0,0028 = 0,035 \text{ м.}$$

### 5.5. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ СТАРТЕРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

#### 5.5.1. Расчет зубцовой зоны.

##### 5.5.1.1. Расчетный диаметр на первом участке зубцовой зоны

$$D_1 = 0,5 \cdot (D_a + D_{2\text{max}}) = 0,5 \cdot (0,055 + 0,0504) = 0,0527 \text{ м.}$$

##### 5.5.1.2. Расчетный диаметр на втором участке зубцовой зоны

$$D_{2\text{ср}} = 0,5 \cdot (D_{2\text{max}} + D_{2\text{min}}) = 0,5 \cdot (0,0504 + 0,0378) = 0,0425 \text{ м.}$$

##### 5.5.1.3. Расчетный диаметр на третьем участке зубцовой зоны

$$D_3 = D_{2\text{min}} - 0,5 \cdot b_{\text{пз}} = 0,0378 - 0,5 \cdot 0,0028 = 0,0364 \text{ м.}$$

##### 5.5.1.4. Расчет высоты первого участка зубцовой зоны:

$$h_1 = 0,5 \cdot (D_a - D_{2\text{max}}) = 0,5 \cdot (0,055 - 0,0504) = 0,0023 \text{ м.}$$

##### 5.5.1.5. Расчет высоты третьего участка зубцовой зоны:

$$h_3 = 0,5 \cdot b_{\text{пз}} = 0,5 \cdot 0,0028 = 0,0014 \text{ м.}$$

##### 5.5.1.6. Расчет высоты зубца:

$$h_z = h_1 + h_2 + h_3 = 0,0023 + 0,0063 + 0,0014 = 0,012 \text{ м.}$$

5.5.1.7. Расчет зубцовых шагов по наружному диаметру якоря и в расчетных сечениях зубца:

$$t_z = \pi \cdot D_a / Z = 3,14 \cdot 0,055 / 19 = 0,009 \text{ м};$$

$$t_1 = \pi \cdot D_1 / Z = 3,14 \cdot 0,0527 / 19 = 0,0087 \text{ м};$$

$$t_{2\max} = \pi \cdot D_{2\max} / Z = 3,14 \cdot 0,0504 / 19 = 0,0083 \text{ м};$$

$$t_{2\text{cp}} = \pi \cdot D_{2\text{cp}} / Z = 3,14 \cdot 0,0425 / 19 = 0,007 \text{ м};$$

$$t_{2\min} = \pi \cdot D_{2\min} / Z = 3,14 \cdot 0,0378 / 19 = 0,0062 \text{ м};$$

$$t_3 = \pi \cdot D_3 / Z = 3,14 \cdot 0,0364 / 19 = 0,00601 \text{ м}.$$

5.5.1.8. Расчет ширины зубца:

$$b_z = t_z - a_{\text{пр}} = 0,009 - 0,00096 = 0,00804 \text{ м};$$

$$b_1 = t_1 - \sqrt{b_{\text{пз}}^2 - h_1^2} = 0,0087 - \sqrt{(0,0028)^2 - (0,0023)^2} = 0,007 \text{ м};$$

$$b_{2\max} = t_{2\max} - b_{\text{пз}} = 0,0083 - 0,0028 = 0,0055 \text{ м};$$

$$b_{2\text{cp}} = t_{2\text{cp}} - b_{\text{пз}} = 0,007 - 0,0028 = 0,0042 \text{ м};$$

$$b_{2\min} = t_{2\min} - b_{\text{пз}} = 0,0062 - 0,0028 = 0,0034 \text{ м};$$

$$b_3 = t_3 - 0,866 \cdot b_{\text{пз}} = 0,00601 - 0,866 \cdot 0,0028 = 0,00359 \text{ м}.$$

5.5.1.9. Расчет магнитной индукции в расчетных сечениях зубца:

$$B_1 = (t_z / K_c \cdot b_1) \cdot B_\delta = (0,009 / 0,97 \cdot 0,007) \cdot 0,79 = 1,06 \text{ Тл};$$

$$B_{2\min} = (t_z / K_c \cdot b_{2\max}) \cdot B_\delta = (0,009 / 0,97 \cdot 0,0055) \cdot 0,79 = 1,34 \text{ Тл};$$

$$B_{2\text{cp}} = (t_z / K_c \cdot b_{2\text{cp}}) \cdot B_\delta = (0,009 / 0,97 \cdot 0,0042) \cdot 0,79 = 1,77 \text{ Тл};$$

$$B_{2\max} = (t_z / K_c \cdot b_{2\min}) \cdot B_\delta = (0,009 / 0,97 \cdot 0,0034) \cdot 0,79 = 2,22 \text{ Тл};$$

$$B_3 = (t_z / K_c \cdot b_3) \cdot B_\delta = (0,009 / 0,97 \cdot 0,0035) \cdot 0,79 = 2,15 \text{ Тл}.$$

5.5.1.10. Расчет зубцовых коэффициентов:

$$K_1 = (t_1 / K_c \cdot b_1) - 1 = (0,0087 / 0,97 \cdot 0,007) - 1 = 0,29;$$

$$K_{2\min} = (t_{2\min} / K_c \cdot b_{2\min}) - 1 = (0,0062 / 0,97 \cdot 0,0034) - 1 = 0,93;$$

$$K_{2\text{cp}} = (t_{2\text{cp}} / K_c \cdot b_{2\text{cp}}) - 1 = (0,007 / 0,97 \cdot 0,0042) - 1 = 0,75;$$

$$K_{2\max} = (t_{2\max} / K_c \cdot b_{2\max}) - 1 = (0,0083 / 0,97 \cdot 0,0055) - 1 = 0,56;$$

$$K_3 = (t_3 / K_c \cdot b_3) - 1 = (0,00601 / 0,97 \cdot 0,0035) - 1 = 0,77.$$

5.5.1.11. Напряженность магнитного поля определяем по рис. 2.8 и рис. 2.9:

$$H_1 = 700 \text{ А/м};$$

$$H_{2\min} = 1400 \text{ А/м};$$

$$H_{2\text{cp}} = 6000 \text{ А/м};$$

$$H_{2\max} = 50000 \text{ А/м};$$

$$H_3 = 48000 \text{ А/м};$$

5.5.1.12. Средняя напряженность на втором участке

$$H_2 = 1/6 \cdot (H_{2\min} + 4H_{2\text{cp}} + H_{2\max}) = \\ 1/6 \cdot (1400 + 4 \cdot 6000 + 50000) = 12600 \text{ А/м}.$$

5.5.1.13. МДС первого участка

$$F_1 = 2 \cdot h_1 \cdot H_1 = 2 \cdot 0,0023 \cdot 700 = 3,22 \text{ А}.$$

5.5.1.14. МДС второго участка

$$F_2 = 2 \cdot h_2 \cdot H_2 = 2 \cdot 0,0063 \cdot 12600 = 158,76 \text{ А}.$$

5.5.1.15. МДС третьего участка

$$F_3 = 2 \cdot h_3 \cdot H_3 = 2 \cdot 0,0014 \cdot 48000 = 134,4 \text{ А}.$$

5.5.1.16. МДС зубцовой зоны

$$F_z = F_1 + F_2 + F_3 = 3,22 + 158,76 + 134,4 = 296,38 \text{ А}.$$

5.5.2. Расчет воздушного зазора.

5.5.2.1. Коэффициент воздушного зазора

$$K_\delta = t_z + 10\delta / (b_z + 10\delta) = \\ = 0,009 + 10 \cdot 0,0005 / 0,00804 + 10 \cdot 0,0005 = 1,03,$$

где  $\delta = 0,0005 \text{ м}$ .

5.5.2.2. МДС воздушного зазора

$$F_\delta = (2 \cdot K_\delta \cdot \delta / \mu_0) \cdot B_\delta = (2 \cdot 1,03 \cdot 0,0005 / 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}) \cdot 0,78 = 647 \text{ А}.$$

5.5.3. Расчет корпуса, сердечника якоря.

5.5.3.1. Наружный диаметр корпуса

$$D_j = (1,45 \div 1,65) \cdot D_a = 1,46 \cdot 0,055 = 0,08 \text{ м}.$$

Принимаем  $D_j$  в соответствии с номинальным рядом диаметров по ГОСТ 9944-77.

5.5.3.2. Длина корпуса

$$l_j = (1,6 \div 2) \cdot l_a = 2 \cdot 0,048 = 0,098 \text{ м}.$$

5.5.3.3. Площадь расчетного сечения корпуса

$$S_j = \sigma \cdot \Phi / 2 \cdot B_j = 1,15 \cdot 0,0011 / 2 \cdot 1,3 = 0,00048 \text{ м}^2,$$

где  $B_j = 1,3 \text{ Тл}$ ,  $\sigma = 1,15$ .



#### 5.5.3.4. Толщина корпуса

$$h_j = S_j / l_j = 0,00048 / 0,098 = 0,005 \text{ м.}$$

#### 5.5.3.5. Диаметр расточки полюсов

$$D_{\pi} = D_a + 2\delta = 0,055 + 2 \cdot 0,0005 = 0,056 \text{ м.}$$

#### 5.5.3.6. Диаметр вала якоря

$$D_b = (0,2 \div 0,4) \cdot D_a = 0,3 \cdot 0,055 = 0,0165 \text{ м.}$$

#### 5.5.3.7. Высота сердечника якоря

$$h_a = 0,5 (D_a - 2h_z - D_b) = 0,5 \cdot (0,055 - 2 \cdot 0,0139 - 0,0165) = 0,0107 \text{ м.}$$

#### 5.5.3.8. Расчет магнитной индукции в сердечнике якоря

$$\begin{aligned} B_a &= \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot B_{\delta} / 2 \cdot K_c \cdot h_a = \\ &= 0,64 \cdot 0,043 \cdot 0,79 / 2 \cdot 0,97 \cdot 0,0107 = 1,01 \text{ Тл.} \end{aligned}$$

Индукция  $B_a$  не выходит за рекомендуемые пределы  $1,0 \div 1,7$  Тл.

#### 5.5.3.9. Расчет магнитной индукции в корпусе

$$\begin{aligned} B_j &= (\sigma \cdot \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_a / 2 l_j \cdot h_j) \cdot B_{\delta} = \\ &= (1,15 \cdot 0,64 \cdot 0,043 \cdot 0,048 / 2 \cdot 0,098 \cdot 0,005) \cdot 0,79 = 1,22 \text{ Тл.} \end{aligned}$$

#### 5.5.3.10. Средняя длина магнитной силовой линии в сердечнике якоря

$$\begin{aligned} L_a &= [\pi (D_b + h_a) / 2p] + h_a = \\ &= [3,14 \cdot (0,0165 + 0,0107) / 4] + 0,0107 = 0,032 \text{ м.} \end{aligned}$$

#### 5.5.3.11. Средняя длина магнитной силовой линии в корпусе

$$\begin{aligned} L_j &= [\pi (D_j + h_j) / 2p] + h_j - 0,5b_m = \\ &= [3,14 \cdot (0,056 + 0,006) / 4] + 0,005 - 0,5 \cdot 0,027 = 0,041 \text{ м.} \end{aligned}$$

#### 5.5.3.12. Напряженность $H_a$ находим по рис. 2.8, 2.9; $H_j$ находим по табл. Пб:

$$H_a = 700 \text{ А/м;}$$

$$H_j = 900 \text{ А/м.}$$

#### 5.5.3.13. МДС сердечника якоря

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0,032 \cdot 700 = 22,4 \text{ А.}$$

#### 2.5.3.14. МДС корпуса

$$F_j = L_j \cdot H_j = 0,041 \cdot 900 = 37,05 \text{ А.}$$

#### 5.5.4. Расчет МДС воздушного зазора в стыке полюса с корпусом:

$$\begin{aligned} F_{\delta_{ст}} &= (2 \cdot \sigma \cdot \alpha_{\delta} \cdot l_a \cdot \delta_{ст} \cdot \tau / \mu_0 \cdot l_m \cdot b_m) \cdot B_{\delta} = \\ &= (2 \cdot 1,15 \cdot 0,64 \cdot 0,048 \cdot 0,00005 \cdot 0,043 / 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 0,048 \cdot 0,028) \cdot 0,79 = 56 \text{ А.} \end{aligned}$$

5.5.5. Расчет характеристики намагничивания электродвигателя.  
Суммарная МДС на два полюса в расчетном рабочем режиме

$$F_{\Sigma} = F_z + F_{\delta} + F_a + F_j + F_{\delta_{ст}} = \\ = 296,38 + 647 + 22,4 + 37,05 + 56 = 1058,83 \text{ А.}$$

Результаты расчета МДС для нескольких значений  $B_{\delta}$  сведены в табл. 5.1.

По данным табл. 5.1 построена характеристика намагничивания электродвигателя при холостом ходе  $B_{\delta} = f(F_{\Sigma})$  и характеристика намагничивания переходного слоя  $B_{\delta} = f(F_{\delta_{за}})$ .

5.5.6. Высота постоянного магнита должна быть не менее

$$h_m > F_k / 0,4H_c = 0,5 \alpha_{\delta} \tau I_k N / 2a\pi D_a 0,4H_c = \\ = 0,5 \cdot 0,64 \cdot 0,043 \cdot 512 \cdot 38 / 2 \cdot 3,14 \cdot 0,055 \cdot 0,4 \cdot 1200 \cdot 10^3 = 0,0016 \text{ м.}$$

Действительная высота постоянного магнита

$$h_m = 0,5(D_j - D_a - 2\delta - 2h_j) = 0,5(0,08 - 0,055 - 2 \cdot 0,0005 - 2 \cdot 0,005) = 0,007 \text{ м.}$$

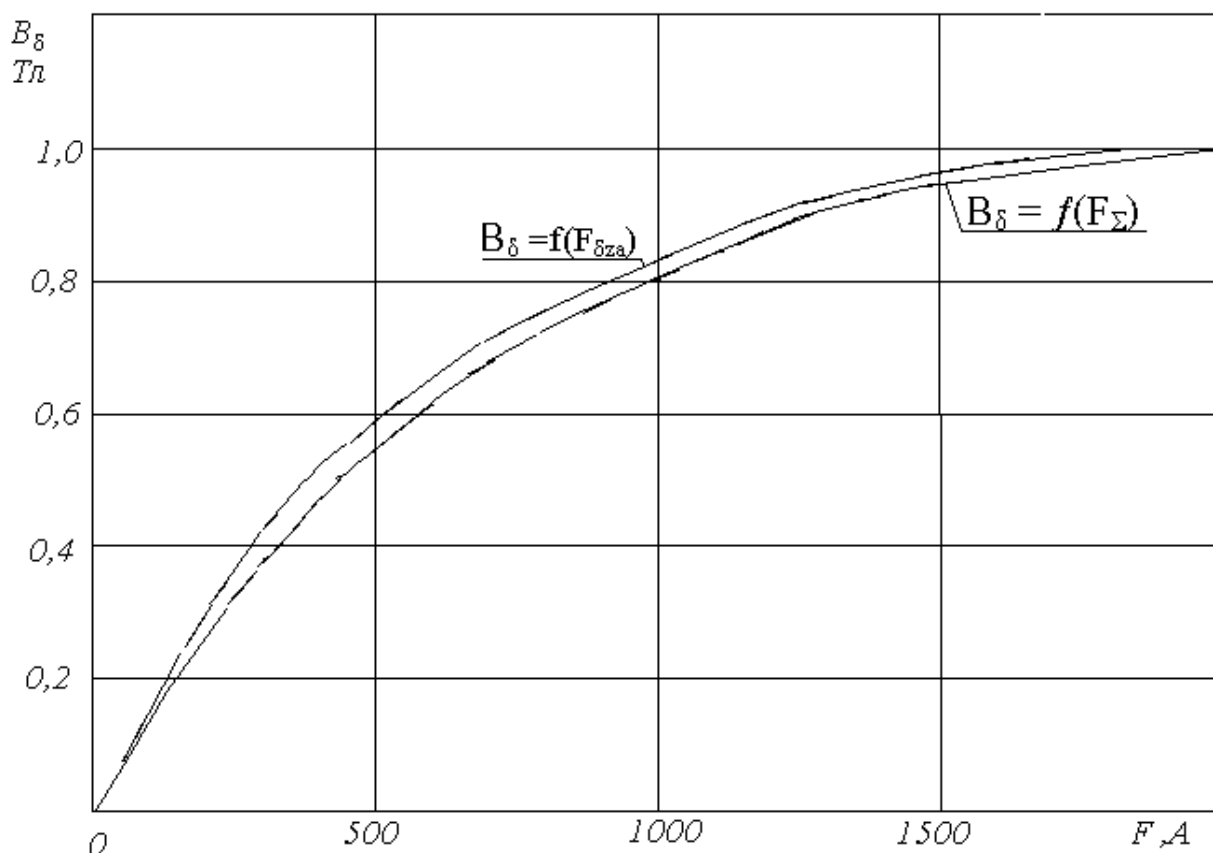


Рис. 5.2. Характеристики намагничивания

Таблица 5.1

## Характеристики намагничивания

$B_{\delta}$	0,2	0,5	0,79	1
$B_1$	0,26	0,66	1,06	1,32
$B_{2min}$	0,336	0,84	1,34	1,68
$B_{2cp}$	0,44	1,1	1,77	2,2
$B_{2max}$	0,54	1,36	2,22	2,72
$B_3$	0,53	1,325	2,15	2,65
$B_a$	0,26	0,65	1,01	1,3
$B_j$	0,3	0,75	0,95	1,5
$H_1$	180	370	700	1320
$H_{2min}$	216	500	1400	3500
$H_{2cp}$	250	820	6000	50000
$H_{2max}$	280	1450	50000	120000
$H_2$	374	871	12600	53916
$H_3$	270	1400	48000	110000
$H_a$	180	370	700	1300
$H_j$	200	420	900	2800
$F_1$	0,828	1,702	3,22	6,07
$F_2$	4,71	10,98	158,7	679,3
$F_3$	0,75	3,92	134,4	308
$F_z$	6,28	16,6	296	993,3
$F_a$	5,7	11,8	22,4	41,6
$F_j$	8,2	17,22	37,05	114,8
$F_{\delta}$	164	410	647	820
$F_{\delta cr}$	9,6	24	56	78
$F_{\Sigma}$	193,8	479,6	1058,8	2017,7
$F_{\delta za}$	176	438,4	965,4	1854,9

## 5.6. РАСЧЕТ КОЛЛЕКТОРА И ВЫБОР ЩЕТОК

5.6.1. Диаметр рабочей поверхности коллектора

$$D_k = (0,5 \div 0,7) \cdot D_a = 0,6 \cdot 0,055 = 0,035 \text{ м.}$$

5.6.2. Наружный диаметр по петушкам

$$D_{\Pi} = D_k + 2b + (0,001 \div 0,002) = 0,035 + 2 \cdot 0,0028 + 0,001 = 0,0416 \text{ м.}$$

5.6.3. Расчет коллекторного деления:

$$\beta_k = \pi \cdot D_k / K = 3,14 \cdot 0,035 / 19 = 0,00578 \text{ м.}$$

5.6.4. Ширина коллекторных пластин

$$b_k = \beta_k - \Delta_{ик} = 0,00578 - 0,0012 = 0,0046 \text{ м.}$$

5.6.5. Ширина щетки

$$b_{щ} = (1,3 \div 2,0) \cdot \beta_k = 1,6 \cdot 0,00578 = 0,0086 \text{ м.}$$

5.6.6. Длина щетки

$$L_{щ} = I_a / (P_{щб} j_{щ} b_{щ}) = 256,7 / (2 \cdot 90 \cdot 10^4 \cdot 0,0086) = 0,0166 \text{ м,}$$

где  $j_{щ}$  – плотность тока в щетке. По табл. П10  $j_{щ} = 90 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$ .

5.6.7. По табл. П15 выбираем щетку шириной  $b_{щ} = 0,007 \text{ м}$  и длиной  $L_{щ} = 0,016 \text{ м}$ .

5.6.8. Длина петушка

$$q = (1,4 \div 1,8) \cdot b = 1,6 \cdot 0,0028 = 0,0044 \text{ м.}$$

5.6.9. Полная длина коллектора

$$\begin{aligned} L_k &= L_{щ} N_{щб} + (N_{щб} - 1)b + a + c + q = \\ &= 0,016 + (1 - 1) + 0,006 + 0,006 + 0,0044 = 0,0324 \text{ м,} \end{aligned}$$

где  $N_{щб} = 1$  – число щеток на щеточный болт.

5.6.10. Скорость рабочей поверхности коллектора

$$v_k = \pi \cdot D_k \cdot n / 60 = 3,14 \cdot 0,035 \cdot 4000 / 60 = 7,32 \text{ м/с.}$$

5.6.11. Общая площадь всех щеток

$$\Sigma S_{щ} = 2 \cdot P_{щб} \cdot N_{щб} \cdot b_{щ} \cdot L_{щ} = 2 \cdot 1 \cdot 0,007 \cdot 0,016 = 0,000448 \text{ м}^2.$$

## 5.7. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

5.7.1. ЭДС в обмотке якоря

$$E_a = U_n - \Delta U_{щ} - \Sigma R_a \cdot I_a = 12 - 1,5 - 0,0166 \cdot 316 = 5,26 \text{ В.}$$

5.7.2. Величина магнитного потока

$$\Phi = \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot I_a \cdot B_{\delta}^* = 0,64 \cdot 0,043 \cdot 0,048 \cdot 0,79 = 0,00104 \text{ Вб.}$$

### 5.7.3. Частота вращения

$$n = 60 \cdot a_{\text{я}} \cdot E_a / p \cdot N \cdot \Phi = 60 \cdot 1 \cdot 5,26 / 2 \cdot 38 \cdot 0,00104 = 3978 \text{ об/мин.}$$

### 5.7.4. Напряжение на клеммах стартера

$$U_{\text{ст}} = U_{\text{н}} - R_{\text{б}} \cdot I_a = 12 - 0,013 \cdot 316 = 7,89 \text{ В.}$$

### 5.7.5. Электромагнитная мощность

$$P_{\text{э}} = E_a \cdot I_a = 5,26 \cdot 316 = 1662 \text{ Вт.}$$

### 5.7.6. Мощность, подводимая к стартерному электродвигателю,

$$P_1 = U_{\text{ст}} \cdot I_a = 7,89 \cdot 316 = 2493 \text{ Вт.}$$

### 5.7.7. Потери мощности на трение в подшипниках

$$\Delta P_{\text{п}} = 0,03 \cdot P_{\text{эmax}} \cdot n_{\text{н}} / n_{\text{нн}} = 0,03 \cdot 1348 \cdot 3978 / 4000 = 40,21 \text{ Вт.}$$

### 5.7.8. Потери мощности на трение между щетками и коллектором

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{щ}} &= 7,5 \cdot 10^3 \cdot \Sigma S_{\text{щ}} \cdot \pi \cdot D_{\text{к}} \cdot n_{\text{мн}} / 60 = \\ &= 7,5 \cdot 10^3 \cdot 0,000448 \cdot 3,14 \cdot 0,033 \cdot 3978 / 60 = 24,5 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

### 5.7.9. Частота перемагничивания стали

$$f = P \cdot n / 60 = 2 \cdot 3978 / 60 = 132 \text{ Гц.}$$

### 5.7.10. Диаметр на 1/3 высоты трапецеидального участка зубца от основания

$$D_{1/3} = D_{2\text{min}} + 2h_2/3 = 0,0378 + 2 \cdot 0,0086/3 = 0,0435 \text{ м.}$$

### 5.7.11. Зубцовый шаг по диаметру $D_{1/3}$

$$t_{1/3} = \pi \cdot D_{1/3} / Z = 3,14 \cdot 0,0435 / 19 = 0,007 \text{ м.}$$

### 5.7.12. Ширина зубца по диаметру $D_{1/3}$

$$b_{1/3} = t_{1/3} - b_{\text{п}} = 0,007 - 0,0028 = 0,0043 \text{ м.}$$

### 5.7.13. Магнитная индукция в сечении зубца по диаметру $D_{1/3}$

$$B_{1/3} = t_z / K_c \cdot b_{1/3} \cdot B_{\delta} = 0,00711 / 0,97 \cdot 0,0043 = 1,704 \text{ Тл.}$$

### 5.7.14. Магнитная индукция в сердечнике якоря

$$\begin{aligned} B_a &= (\alpha_{\delta} \cdot \tau / 2 \cdot K_c \cdot h_a) \cdot B_{\delta} = \\ &= (0,64 \cdot 0,043 / 2 \cdot 0,97 \cdot 0,0107) \cdot 0,79 = 1,01 \text{ Тл.} \end{aligned}$$

### 5.7.15. Масса сердечника якоря

$$\begin{aligned} m_a &= 0,25 \cdot \pi \cdot \gamma_{\text{ст}} \cdot K_c \cdot l_a (D_{\text{amin}}^2 - D_{\text{в}}^2) = \\ &= 0,25 \cdot 3,14 \cdot 7850 \cdot 0,97 \cdot 0,048 (0,037^2 - 0,0209^2) = 0,25 \text{ кг.} \end{aligned}$$

### 5.7.16. Масса зубцового слоя

$$m_z = \gamma_{\text{ст}} \cdot K_c \cdot l_a \cdot [0,25 \cdot \pi (D_a^2 - D_{\text{amin}}^2) - Z (b_{\text{п}} \cdot h_2 + 0,25 \cdot \pi \cdot b_{\text{п}}^2 + h_{\text{пр}} \cdot a_{\text{пр}})] =$$

$$= 7850 \cdot 0,98 \cdot 0,048 \cdot [0,25 \cdot 3,14(0,055^2 - 0,037^2) - 19(0,0028 \cdot 0,0077 + 0,25 \cdot 3,14 \cdot 0,0028^2 + 0,001 \cdot 0,00117)] = 0,223 \text{ кг.}$$

5.7.17. Магнитные потери в сердечнике якоря

$$\Delta P_a = 2 \cdot B_a \cdot m_a \cdot (0,044 \cdot f + 2240 \cdot \Delta^2 \cdot f^2) =$$

$$= 2 \cdot (1,01)^2 \cdot 0,25 \cdot (0,044 \cdot 132,6 + 2240 \cdot (0,0012)^2 \cdot (132,6)^2) = 23,06 \text{ Вт.}$$

5.7.18. Магнитные потери в зубцовом слое

$$\Delta P_z = 2 \cdot B_{1/3}^2 \cdot m_z \cdot (0,044 \cdot f + 2240 \cdot \Delta^2 \cdot f^2) =$$

$$= 2 \cdot (1,704)^2 \cdot 0,223 \cdot (0,044 \cdot 132,6 + 2240 \cdot (0,0012)^2 \cdot (132,6)^2) = 84,62 \text{ Вт,}$$

где  $\Delta = 0,0012$ .

Таблица 5.2

### Рабочие характеристики

I, А	60	200	316	450	600
U <sub>ст</sub>	11,22	9,42	7,89	6,15	3,55
B <sub>δ</sub> <sup>*</sup> , Тл	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
Φ, Вб	0,00104	0,00104	0,00104	0,00104	0,00104
E <sub>а</sub> , В	9,504	7,18	5,26	3,03	0,54
N, об/мин <sup>1</sup>	7214	5088	3978	1661	536
P <sub>э</sub> , Вт	570,24	1036	1662	1454	324
ΔP <sub>п</sub> , Вт	72,93	58,36	40,21	29,89	18,74
ΔP <sub>ш</sub> , Вт	41,8	32,7	24,5	14,3	9,6
f, Гц	240,46	199	132,6	89	52
B <sub>1/3</sub> , Тл	1,704	1,704	1,704	1,704	1,704
B <sub>а</sub> , Тл	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
ΔP <sub>z</sub> , Вт	231,91	136,83	84,62	39,06	4,98
ΔP <sub>а</sub> , Вт	100,51	58,66	23,06	12,85	1,62
ΔP <sub>м</sub> , Вт	447,15	324,28	170,89	112,13	23,56
P <sub>2</sub> , Вт	123,09	600,72	1491,11	727,87	406,44
M, Н·м	0,754	1,94	3,98	5,21	5,77
M <sub>2</sub> , Н·м	0,16	1,12	3,57	4,68	7,24
P <sub>1</sub> , Вт	673,2	1560	2493,8	3276	4680
η	0,18	0,38	0,59	0,22	0,08

5.7.19. Суммарные потери

$$\Delta P = \Delta P_{п} + \Delta P_{ш} + \Delta P_{а} + \Delta P_{z} = 40,21 + 23 + 23,06 + 84,62 = 170,89 \text{ Вт.}$$

5.7.20. Полезная мощность

$$P_2 = P_3 - \Delta P = 5,26 \cdot 316 - 170,89 = 1491,11 \text{ Вт.}$$

5.7.21. КПД стартерного электродвигателя

$$\eta = P_2 / P_1 = 1491,11 / 2493 = 0,59.$$

5.7.22. Электромагнитный момент

$$M_3 = 9,55 \cdot P_3 / n = 9,55 \cdot 1662 / 3978 = 3,98 \text{ Нм.}$$

5.7.23. Полезный момент

$$M_2 = 9,55 \cdot P_2 / n = 9,55 \cdot 1491,11 / 3978 = 3,57 \text{ Нм.}$$

5.7.24. По результатам расчета строятся рабочие характеристики.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ**

1. Каковы основные направления повышения технического уровня системы пуска?
2. Как осуществляется выбор емкости аккумуляторной батареи и мощности стартера для заданных условий пуска двигателя?
3. К чему приводит увеличение  $B_\delta$  в воздушном зазоре?
4. Как осуществляется оценка процесса размагничивания постоянных магнитов?

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В учебном пособии освещены основные вопросы конструкции электростартерной системы пуска двигателей внутреннего сгорания. Подробно изложена методика расчета и выбора основных размеров, расчета магнитной цепи и рабочих характеристик электростартерного двигателя постоянного тока с электромагнитным возбуждением. Приведены особенности проектирования и расчета электростартерных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов.

Примеры расчета позволяют более подробно разобраться в изложенных методиках проектирования и расчета.

В приложении даны все сведения по конструкционным, магнитным и проводниковым материалам, необходимые при выполнении расчетов.

Для более подробного изучения конструкции и принципа работы электростартерной системы пуска двигателей внутреннего сгорания рекомендуется обратиться к источникам, приведенным в списке литературы [1-6] .

В учебном пособии не рассматривались вопросы оптимизации стартерных электродвигателей, базирующихся на более точных методиках расчета магнитных полей по специальным программам на ПК, которые могут быть изучены в других дисциплинах или самостоятельно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фесенко М.Н.* Теория, конструкция и расчет автотракторного электрооборудования: учебник / М.Н. Фесенко [и др.]; 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1992. – 384 с. – ISBN 5-217-01384-2.
2. *Акимов С.В.* Электрооборудование автомобилей: учебник для вузов / С.В. Акимов, Ю.П. Чижков. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. – 384 с. – ISBN 5-85907-274-0(3).
3. *Копылов И.П.* Проектирование электрических машин / И.П. Копылов [и др.]. – М.: Энергия, 1980. – 258 с.
4. *Анисимов В.М.* Особенности проектирования стартер-генераторных установок для легковых автомобилей / В.М. Анисимов, В.В. Трошин [и др.] // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2010. – №6. – С. 46-48.
5. [www//principact.ru/](http://principact.ru/)
6. [www//starter.net.ru/](http://starter.net.ru/)



## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

**Основные параметры стартерных аккумуляторных батарей  
по ГОСТ 959.0-84Е**

Тип батареи	Минимальная емкость при 25 °С на четвертом цикле, С20 АЧ	Сила разрядного тока в стартерном режиме $I_{кст}, А$	Габариты, а×b×h, мм	Масса с электролитом, кг
6СТ-55ЭМ	55	255	262×174×26 6	21,5
6СТ-55А3	55	255	242×175×21 0	16,5
6СТ-60ЭМ	51	180	283×182×23 7	24,5
6СТ-66А	60	–	301×175×21 0	19
6СТ-75ТМ	71	225	358×177×24 0	30
6СТ-90ЭМ	85,5	270	421×186×24 0	36
6СТ-105ЭМ	100	315	476×187×24 0	39,1
6СТ-132ЭМ	125	396	514×211×24 4	49,5
6СТ-182ЭМ	173	546	522×282×24 3	69,5
6СТ-190ТМ	Не регламентируется	570	582×237×23 6	70
6СТ-190ТР		570	582×237×23 6	70

Таблица П2

**Значение коэффициента  $a_8$**

Емкость батареи С <sub>20</sub> , А·ч	При определении номинальных характеристик	При определении пусковых характеристик (рекомендуется)	
		$U_{ном} = 12 В$	$U_{ном} = 24 В$
До 100	0,05	0,112	0,108
Более 100	0,057	0,129	0,121

55 (6СТ-55ЭМ)	0,038	0,081	0,077
190 (6СТ-190ТР)	0,046	0,125	0,108

Таблица ПЗ

**Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных  
эмалированных проводов марок ПЭТВ, ПЭТ-155 и ПЭТ-200**

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм <sup>2</sup>
0,08	0,1	0,00502
0,09	0,11	0,00636
0,1	0,122	0,00785
0,112	0,134	0,00985
0,125	0,147	0,01227
(0,132)	0,154	0,01368
0,14	0,162	0,01539
0,15	0,18	0,01767
0,16	0,19	0,0201
0,17	0,2	0,0227
0,18	0,21	0,0255
(0,19)	0,22	0,0284
0,2	0,23	0,0314
(0,212)	0,242	0,0353
0,224	0,259	0,0394
(0,236)	0,271	0,0437
0,25	0,285	0,0491
(0,265)	0,3	0,0552
0,28	0,315	0,0616
(0,3)	0,335	0,0707
0,315	0,35	0,0779
0,335	0,37	0,0881
0,355	0,395	0,099
0,375	0,415	0,1104
0,4	0,44	0,1257
0,425	0,565	0,1419
0,45	0,49	0,159
(0,475)	0,515	0,1772

0,5	0,545	0,1963
(0,53)	0,585	0,221
0,56	0,615	0,246
0,6	0,655	0,283
0,63	0,69	0,312
(0,67)	0,73	0,353
0,71	0,77	0,396
0,75	0,815	0,442

*Продолжение табл. ПЗ*

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм <sup>2</sup>
0,8	0,865	0,503
0,9	0,965	0,636
0,95	1,015	0,709
1	1,08	0,785
1,06	1,14	0,883
1,12	1,2	0,985
1,18	1,26	1,094
1,25	1,33	1,227
1,32	1,405	1,368
1,40	1,485	1,539
1,5	1,585	1,767
1,6	1,685	2,011
1,7	1,785	2,27
1,8	1,895	2,54
1,9	1,995	2,83
2	2,095	3,14
2,12	2,22	3,53
2,24	2,34	3,94
2,36	2,46	4,36
2,5	2,6	4,91

## Размеры и площадь поперечного сечения прямоугольной проволоки

Номинальный размер проволоки по большей стороне $b$ , мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне $a$ , мм																	
	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12
	Расчетное сечение проволоки, мм <sup>2</sup>																	
2	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,585	—	—	—	—	—	—	—
2,12	1,559	—	1,734	—	1,905	—	2,16	—	2,435	—	2,753	—	—	—	—	—	—	—
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,16	1,294	2,429	2,585	2,742	2,921	3,145	3,369	—	—	—	—	—
2,36	1,751	—	1,95	—	2,145	—	2,429	—	2,735	—	3,089	—	3,561	—	—	—	—	—
2,5	1,863	1,97	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,91	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	—	—	—
2,65	1,983	—	2,211	—	2,435	—	2,753	—	3,098	—	3,495	—	4,025	—	4,407	—	—	—
2,8	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	—
3	2,263	—	2,526	—	2,785	—	3,145	—	3,535	—	3,985	—	4,585	—	5,038	—	5,638	—
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,51	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,35	2,543	—	2,841	—	3,135	—	3,537	—	3,973	—	4,475	—	5,145	—	5,667	—	6,337	—
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,11	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163
3,75	2,863	—	3,201	—	3,535	—	3,985	—	4,473	—	5,035	—	5,785	—	6,387	—	7,137	—
4	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117
4,25	3,263	—	3,551	—	4,035	—	4,545	—	5,098	—	5,735	—	6,585	—	7,287	—	8,137	—
4,5	3,463	3,67	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,41	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177
4,75	3,663	—	4,101	—	4,535	—	5,105	—	5,723	—	6,435	—	7,385	—	8,188	—	9,137	—
5	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
5,3	4,103	—	4,596	—	5,085	—	5,721	—	6,41	—	7,205	—	8,265	—	9,177	—	10,24	—
5,6	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	8,101	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51
6	4,663	—	5,226	—	5,785	—	6,505	—	7,285	—	8,185	—	9,385	—	10,44	—	11,64	—
6,3	4,90	5,2	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,66	9,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99
6,7	—	—	5,856	—	6,485	—	7,289	—	8,16	—	9,165	—	10,51	—	11,7	—	13,04	—
7,1	—	—	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,66	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69
7,5	—	—	—	—	7,285	—	8,185	—	9,16	—	10,29	—	11,79	—	13,14	—	14,64	—
8	—	—	—	—	7,785	8,265	8,745	9,225	9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,6
8,5	—	—	—	—	—	—	9,305	—	10,41	—	11,69	—	13,39	—	14,94	—	16,64	—
9	—	—	—	—	—	—	9,865	10,41	11,04	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
9,5	—	—	—	—	—	—	—	—	11,66	—	13,09	—	14,99	—	16,74	—	18,64	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84
10,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14,63	—	16,75	—	18,72	—	20,84	—
11,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,47	16,59	17,71	18,68	19,8	20,92	22,04	23,38

Номинальный размер проволоки по большей стороне $b$ , мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне $a$ , мм																
	2,24	2,36	2,5	2,65	2,8	3	3,15	3,35	3,55	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6
	Расчетное сечение проволоки, мм <sup>2</sup>																
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,15	6,693	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,35	7,141	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,55	7,589	7,829	8,326	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,75	8,037	—	8,826	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	8,897	8,891	9,451	10,65	10,85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,25	9,157	—	10,08	—	11,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,5	9,717	10,07	10,7	11,38	12,05	12,95	13,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,75	10,28	—	11,33	—	12,75	—	14,41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	10,84	11,25	11,95	12,7	13,45	14,45	15,2	16,2	17,2	—	—	—	—	—	—	—	—
5,3	11,51	—	12,7	—	14,29	—	16,15	—	18,27	—	—	—	—	—	—	—	—
5,6	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33	20,14	21,54	—	—	—	—	—	—
6	13,08	—	14,45	—	16,25	—	18,35	—	20,75	—	23,14	—	—	—	—	—	—
6,3	13,75	14,32	15,2	16,15	17,09	18,35	19,3	20,56	21,82	22,77	24,34	25,92	27,49	—	—	—	—
6,7	14,65	—	16,2	—	18,21	—	20,56	—	23,24	—	25,94	—	29,29	—	—	—	—
7,1	15,54	16,21	17,2	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	—	—
7,5	16,44	—	18,2	—	20,45	—	23,08	—	26,08	—	29,14	—	32,89	—	36,64	—	—
8	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
8,5	18,68	—	20,7	—	23,25	—	26,23	—	29,63	—	33,14	—	37,39	—	41,64	—	46,74
9	19,8	20,69	21,95	23,3	24,65	26,54	27,8	29,6	31,4	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,5	20,92	—	23,2	—	26,05	—	29,38	—	33,18	—	37,14	—	41,89	—	46,64	—	52,34
10	22,04	23,05	25,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,6	23,38	—	25,95	—	29,13	—	32,84	—	37,08	—	41,54	—	46,84	—	52,14	—	58,5
11,2	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21	41,14	43,94	46,79	49,54	52,34	55,14	58,5	61,86
11,8	26,07	—	28,95	—	32,49	—	36,62	—	41,24	—	46,34	—	52,24	—	52,14	—	65,22
12,5	27,64	24,95	30,7	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

Номинальный размер проволоки по большей стороне $b$ , мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне $a$ , мм												
	5	5,1	5,3	5,5	5,6	6	6,5	7	8	9	10	11	12,5
	Расчетное сечение проволоки, мм <sup>2</sup>												
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	96,34	—	—	—
11,2	55,14	—	58,50	—	61,86	—	—	—	—	—	—	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	103,64	—	—	—
11,8	58,14	—	—	—	65,22	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	61,64	—	65,39	—	69,14	—	—	—	99,14	111,64	124,14	136,66	<b>155,41</b>
13,2	65,14	—	—	—	73,06	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—	—	93,64	107,14	120,64	—	—	—
14	69,14	—	73,34	—	77,54	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	—	—	—	—	—	—	93,39	100,64	115,14	129,64	—	—	—
15	74,14	—	—	—	83,14	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	100,54	108,34	123,94	139,54	154,14	—	—
16	79,14	—	83,94	—	88,74	95,14	—	—	127,14	—	—	—	—
16,8	—	84,82	—	91,54	—	99,94	108,34	116,74	133,54	—	—	—	—
18	—	90,94	—	98,14	—	107,14	116,14	125,14	143,14	—	—	—	—
19,5	—	98,59	—	106,39	—	116,14	125,89	135,64	155,14	—	—	—	—
20	99,14	—	—	—	—	119,14	—	—	159,14	—	—	—	—
22	—	111,34	—	120,14	—	131,14	142,14	153,14	—	—	—	—	—
25	124,14	126,64	—	136,64	—	149,14	161,64	174,14	—	—	—	—	—
26,3	—	133,27	—	143,79	—	158,94	170,09	183,24	—	—	—	—	—
28	—	141,94	—	153,14	—	167,14	181,14	195,14	—	—	—	—	—
30	149,14	152,14	—	164,14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32	—	162,34	—	175,14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

**Кривая намагничивания листовой электротехнической стали  
марок 1211, 1212, 1311 (слабо- и среднелегированная)**

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	140	143	146	149	152	153	158	161	164	167
0,5	171	175	179	183	187	191	195	199	203	207
0,6	211	216	221	226	231	236	241	246	251	256
0,7	261	266	271	276	281	287	293	299	306	312
0,8	318	324	330	337	344	352	360	369	378	387
0,9	397	407	417	427	437	447	458	469	480	491
1	502	514	527	541	555	570	585	600	615	631
1,1	647	664	682	701	720	739	859	779	800	821
1,2	843	866	891	918	946	976	1010	1040	1070	1100
1,3	1149	1180	1220	1260	1300	1340	1380	1430	1480	1530
1,4	1580	1640	1710	1780	1860	1950	2050	2150	2260	2380
1,5	2500	2640	2790	2950	3110	3280	3460	3660	3880	4120
1,6	4370	4630	4910	5220	5530	5880	6230	6600	6980	7370
1,7	7780	8200	8630	9070	9630	10100	10600	11 100	11 600	12200
1,8	12800	13400	14200	14600	15200	15900	16600	17300	18000	18800
1,9	19700	20600	21600	22600	23600	24600	25600	26800	28200	29600
2	31000	32500	34300	36500	39000	42000	45500	49500	54500	59500
2,1	65500	72500	80000	88000	96000	104000	112000	120000	128000	136000
2,2	144000	152000	160000	168000	176000	184000	192000	200000	208000	216000
2,3	224000	232000	240000	248000	256000	264000	272000	280000	288000	296000
2,4	304000	312000	320000	328000	336000	344000	352000	360000	368000	376000
2,5	384000	392000	400000	408000	416000	424000	432000	440000	448000	456000

**Кривая намагничивания литой стали, толстые листы (Ст3), поковки**

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72
0,1	80	88	96	104	112	120	128	136	144	152
0,2	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232
0,3	240	248	250	264	272	280	288	296	304	312
0,4	320	328	336	344	352	360	368	376	384	392
0,5	400	404	417	426	434	443	452	461	470	479
0,6	488	497	506	516	525	535	544	554	564	574
0,7	584	539	603	613	623	632	642	652	662	672
0,8	682	639	703	724	734	745	755	766	776	787
0,9	798	810	823	835	848	850	873	885	898	911
1	924	938	953	969	986	1004	1022	1039	1056	1073
1,1	1090	1108	1127	1147	1167	1187	1207	1227	1248	1269
1,2	1290	1315	1340	1370	1400	1430	1460	1490	1520	1555
1,3	1590	1630	1670	1720	1760	1810	1860	1920	1970	2030
1,4	2090	2160	2230	2300	2370	2440	2530	2620	2710	2800
1,5	2890	2990	3100	3210	3320	3430	3560	3700	3830	3960
1,6	4100	4250	4400	4550	470(1	4870	5000	5150	5300	5500

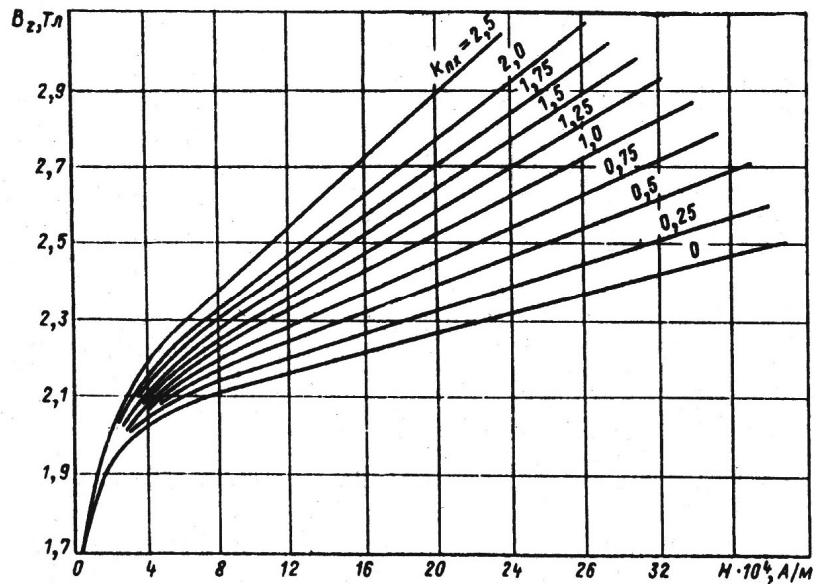


Рис. III. Кривые намагничивания стали марок 1211, 1212, 1311 для зубцовых зон:

$$k_{nx} = \frac{S_{nx}}{S_{Zx}} = \frac{b_{nx} l_{\delta}}{b_{zx} l_{ct} k_c} - \text{коэффициент, определяющий отношение площадей поперечных сечений паза и зубца на высоте } h_{Zx}$$

Таблица П7

**Максимальная толщина изоляции обмоточных проводов**

Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции							
	при диаметрах голого провода $d$ , мм							
	0,05-0,09	0,1-0,19	0,2-0,25	0,265-0,3	0,315-0,355	0,375-0,5	0,53-0,71	0,75-0,95
ПБД	—	—	0,19	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
АПБД	—	—	—	—	—	—	—	—
ПЭЛБО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18
ПЭЛШО, ПЭЛШКО	0,07	0,075	0,09	0,1	0,105	0,11	0,115	0,125
ПСД, ПСДК	—	—	—	—	0,23	0,23	0,25	0,25
ПСДТ	—	—	—	—	0,18	0,18	0,19	0,2
ПСДКТ	—	—	—	—	0,14	0,14	0,16	0,16
ПДА	—	—	—	—	—	—	—	—
ПЭВП, ПЭМП, ПЭВПИ, ПЭТВП	—	—	—	—	—	—	—	—
ППТБО, ППЛБО	—	—	—	—	—	—	—	—



Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции							
	при диаметрах голого провода $d$ , мм						прямоугольного провода при меньшей стороне сечения голого провода, мм	
	1-1,4	1,5-1,6	1,7- 2,12	2,24-5	5-5,2	0,85- 1,9	2,12- 3,75	4-5,6
ПБД	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
АПБД	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
ПЭЛБО	0,21	0,21	0,21	—	—	—	—	—
ПЭЛШО, ПЭЛШКО	0,135	0,155	0,155	—	—	—	—	—
ПСД, ПСДК	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,4
ПСДТ	0,21	0,21	0,23	—	—	—	—	—
ПСДКТ	0,18	0,18	—	—	—	0,22	—	—
ПДА	0,3	0,3	0,3	0,35	0,35	0,4	0,4	0,4
ПЭВП, ПЭМП, ПЭВППИ, ПЭТВП	—	—	—	—	—	0,1- 0,12	0,15	—
ПШТБО, ПШЛБО	—	—	—	—	—	0,45	0,45	0,5

**Нагревостойкость, температурный индекс и конструктивные данные основных типов медных эмалированных проводов**

Марка провода	Температурный индекс	Класс нагревостойкости	Тип эмалевой изоляции	Номинальные размеры токопроводящей жилы, мм	Двусторонняя толщина изоляции
ПЭЛ	105	А	Эмаль на масляно-смоляной основе	0,02...2,50	0,010...
ПЭВ-1	105	А	Высокопрочная эмаль на поливинилацетатной основе	0,02...2,50	0,01... 0,02...
ПЭВ-2	105	А	То же, с утолщенной изоляцией	0,02...2,50	0,025...
ПЭМ-1	105	А	Высокопрочная эмаль на поливинилацетатной (поливинилформалевой) основе	0,02...2,50	0,02...
ПЭМ-2	105	А	То же, с утолщенной изоляцией	0,06...2,50 0,06...0,45	0,025... 0,033...
ПЭВТЛ-1	120	Е	Высокопрочная эмаль на полиуретановой основе	0,05...1,60	0,015...
ПЭВТЛ-2	120	Е	То же, с утолщенной изоляцией	0,05...1,60	0,02...
ПЭВТЛК	120	Е	Двойная эмаль на основе полиуретановых и полиамидных смол	0,05...1,60	0,03...
ПЭВТ-1	130	В	Высокопрочная эмаль на полиэфирной основе (лак ПЭ-943)	0,063...2,50	0,025...
ПЭТВ-2	130	В	То же (лак ПЭ-939)	0,063...2,50	0,025...
ПЭТ-155 и ПЭТВ	155	Ф	Высокопрочная эмаль на полиэфириимидной основе	0,06...2,44	0,025...
ПЭТ-200	200	С	Полиамидные лаки, обеспечивающие высокие механическую прочность и нагревостойкость	0,05...2,50	0,025...

**Щетки для электрических машин.**  
**Шкала размеров электрощеток (мм)  $b_{щ} \times l_{щ} \times h_{щ}$**

Тангенциальный размер $b_{щ}$	Осевой размер $l_{щ}$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
4	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	12,5	12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	16	16	16	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	20	20	20	20	—	—	—	—	—
5	—	12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	16	16	16	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	20	20	20	20	—	—	—	—	—
	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—	—
	—	—	—	—	32	32	32	—	—	—	—
6,3	—	—	20	20	20	—	—	—	—	—	—
	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—	—
	—	—	—	32	32	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—	—
8	—	—	—	20	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—
	—	—	—	32	32	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—	—
10	—	—	—	—	25	25	25	—	—	—	—
	—	—	—	—	32	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	—
12,5	—	—	—	—	—	25	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
16	—	—	—	—	—	—	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
20	—	—	—	—	—	—	—	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100

## Рекомендуемые расчетные параметры и условия работы щеток для электрических машин общего назначения

Обозначение марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность, А/см <sup>2</sup>	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
Г-20	Угольно-графитные	2,9	15	40	50	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и коллекторные машины переменного тока
Г-21		4,3	5	30	15-100	
Г-22		2,5	10	30	40	
Г3	Графитные	1,9	11	25	20-25	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и контактные кольца
611М		2	12	40	20-25	
6110М		2	15	90	12-22	
ЭГ2А	Электрографитированные	2,6	10	45	20-25	Генераторы и двигатели со средними и затрудненными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ2АФ		2,2	15	90	15-21	
ЭГ4		2	12	40	15-20	
ЭГ8		2,4	10	40	20-40	
ЭГ14	То же	2,5	11	40	20-40	То же
ЭГ51		2,2	12	60	20-25	
ЭГ61		3	13	60	35-50	
ЭГ71		2,2	12	40	20-25	
ЭГ74		2,7	15	50	17,5-25	
ЭГ74АФ		2,3	15	60	15-21	
ЭГ85		2,3	15	50	17,5-35	

Обозначение марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность, А/см <sup>2</sup>	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
М1	Металлографитные	1,5	15	25	15-20	Низковольтные генераторы и контактные кольца
М3		1,8	12	20	15-20	
М6		1,5	15	25	15-20	
М20		1,4	12	20	15-20	
МГ	То же	0,2	20	20	18-23	То же
МГ2		0,5	20	20	18-23	
МГ4		1,1	15	20	20-25	
МГ64		0,5	25	25	15-20	
МГС0		0,2	20	20	18-23	
МГС5		2	15	35	20-25	

*Примечания:*

1. При работе электрических машин в условиях повышенной вибрации и больших частот вращения коллектора (свыше 1500 об/мин) давление на щетку может быть повышено до 50 кПа.
2. Плотность тока щетки должна выбираться в зависимости от частоты вращения коллектора и условий коммутации каждого конкретного типа электрической машины.
3. Коэффициент трения щеток о коллектор принимается равным 0,25 для всех марок щеток.

## **Условные обозначения способов охлаждения электрических машин**

Условное обозначение способа охлаждения электрических машин содержит две буквы латинского алфавита IC (начальные буквы слов International Cooling) и следующие за ними характеристики целей охлаждения. Каждая характеристика, в свою очередь, состоит из букв латинского алфавита и двух цифр.

Буквы обозначают вид хладагента, используемого в данной цепи: воздух – A, водород – H, азот – N, фреон – F, вода – W, диоксид углерода – C, масло – V, керосин – K. Если в качестве хладагента используется другие, не переименованные газы или жидкости, то в обозначении приводят их полное наименование.

В цифровой части обозначения первая цифра условно обозначает устройство для циркуляции хладагента (табл. П11); вторая – способ перемещения хладагента (табл. П12).

Если машина имеет две или более цепи охлаждения, как, например, двигатель обдуваемого исполнения IP44 или машины с замкнутой системой охлаждения при наличии охладителей, то в обозначении указывают характеристики каждой из цепи, начиная с цепи со вторичным, т. е. имеющим более низкую температуру, хладагентом.

В целях упрощения обозначений допускается для наиболее распространенных систем воздушного охлаждения в условном обозначении опускать букву A; если способом перемещения хладагента является самовентиляция, то в обозначении допускается сохранять только первую цифру, характеризующую устройство цепи охлаждения, например обозначать IC0 вместо IC01, как при полном обозначении.

Примеры условных обозначений систем охлаждения электрических машин приведены в табл. П13.

**Условное обозначение цепи циркуляции хладагента  
(первая цифра в условном обозначении системы охлаждения)**

Цифра	Краткая характеристика цепи
0	Хладагент свободно подводится из окружающей среды к машине и свободно возвращается в эту среду – свободная циркуляция.
3	Хладагент подводится к машине или к охладителю не из окружающей среды, а из другого источника через подводящую трубу или подводящий канал, а затем удаляется через отводящую трубу или отводящий канал на некоторое расстояние от машины – охлаждение при помощи подводящей и отводящей труб или каналов.
4	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло через поверхность корпуса вторичному хладагенту, которым является среда, окружающая корпус машины. Поверхность корпуса машины может быть гладкой или ребристой для лучшей теплопередачи – охлаждение внешней поверхности машины.
7	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло вторичному хладагенту в охладителе, встроенном в машину и являющемся ее неотъемлемой частью; вторичным хладагентом не является среда, окружающая машину, – охлаждение при помощи встроенного охладителя, без использования окружающей среды.
8	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло вторичному хладагенту в охладителе, являющемся независимым устройством, установленным непосредственно на машине; вторичным хладагентом не является среда, окружающая машину, – охлаждение при помощи пристроенного охладителя без использования окружающей среды.

*Примечание:* в таблице приведены обозначения не всех цепей циркуляции хладагента, используемых для охлаждения электрических машин.

**Условное обозначение способа перемещения хладагента  
(вторая цифра в условном обозначении системы охлаждения)**

Цифра	Способ перемещения хладагента
0	За счет разницы температур – свободная конвекция; вентилирующее действие ротора машины незначительно.
1	Вентилирующим действием ротора или при помощи специального устройства, расположенного на валу ротора машины, – самовентилиация.
2	При помощи зависимого встроенного устройства, не смонтированного непосредственно на валу машины, например, встроенного вентилятора с зубчатой передачей или ременным приводом.
3	При помощи зависимого пристроенного устройства, установленного непосредственно в машине, например, вентилятора, приводимого в действие электрическим двигателем, получающим питание от выводов охлаждаемой машины.
7	При помощи отдельного устройства, не установленного на машине и не зависящего от нее, или под давлением в системе циркуляции хладагента, например, путем подачи воды из водопроводной сети или газа под давлением при помощи форсунки.
8	Посредством относительного движения машины через хладагент, например тяговый двигатель, охлаждаемый воздухом, или двигатель, приводящий в движение вентилятор и охлаждаемый основным воздушным потоком.

**Примеры условных обозначений систем охлаждения электрических машин**

Система охлаждения	Обозначение*
Защищенная машина с самовентилиацией; вентилятор расположен на валу машины.	IC01
Защищенная машина, охлаждаемая пристроенным вентилятором; приводной электродвигатель вентилятора получает питание от выводов охлаждаемой машины.	IC03
Закрытая машина с естественным охлаждением без внешнего вентилятора.	IC0040
Закрытая машина с ребристой или гладкой станиной, обдуваемая внешним вентилятором, расположенным на валу машины.	IC0141
Закрытая машина с подводящей и отводящей трубами; машина охлаждается вентилятором с приводным электродвигателем, не установленным на машине.	IC37
Закрытая машина с воздушным охлаждением и пристроенным водяным охладителем; циркуляция воды в охладителе осуществляется отдельным насосом или водопроводной сети.	ICW37A81

\* См. табл. П11 и П12.



**Присоединительные размеры стартеров с фланцевым креплением, мм,  
в соответствии с ГОСТ 3940-84 и ГОСТ 37.003.084-88**

Исполнение	Вариант фланца	Номинальная мощность, кВт	Номинальный диаметр корпуса, мм	$D$ , мм	$D_1$ , мм	$d$	$L$	$l$	$a$	$b$
1	I	до 0,4	70	62	90	8,5	65	24	22	4
2		0,4-1,2	80;90	76,2	105	10,5	75	30	28	
3		1,0-2,2	100;115	82		12,5 10,5	90	38	35	
4	II	1,3-1,5	105	82,5	114;125	M8;8,5	75;70	26; 36	23,5; 33,5	
5	III	2,5	115;130	92;100	146	13	90	35	32	7
6		4,5-8,5	130			17	130	50	47	9
7		7	150							

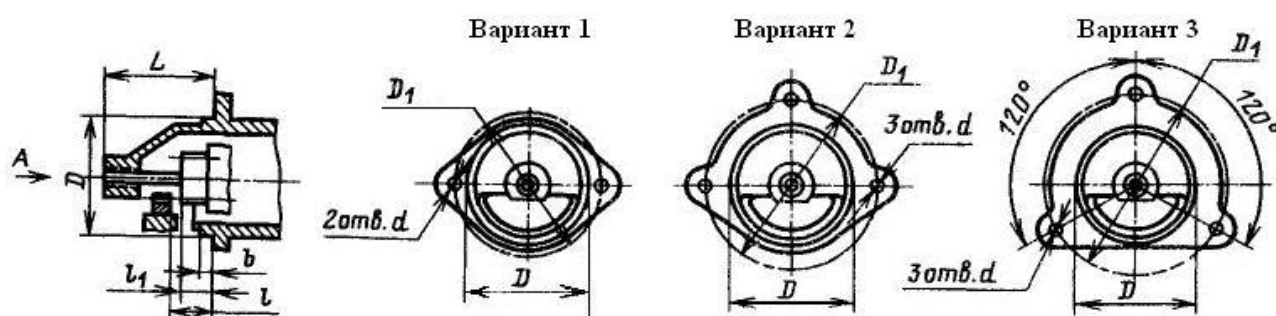


Рис. П2. Варианты фланцевого крепления стартеров

## Основные параметры щеточно-коллекторных узлов стартеров

Тип коллектора	Диаметр коллектора, мм	Марка щеток	Число щеток	Размеры $b_{щ} / l_{щ} / h_{щ}$ , мм	Сила нажатия щеточной пружины
Торцевой	50	МГС01, трапецеидальные	4	$(5,5 \times 11,5) \times 10 \times 15$	1,1
Цилиндрический сборный	36	МГСОА	4	$7 \times 16 \times 16$	0,67-1,1
Цилиндрический на пластмассе	39	МГС20	4	$7 \times 16 \times 20$	1,1
Торцевой	65	МГС20	4	$7 \times 16 \times 20$	1,1-1,4
Цилиндрический на пластмассе	40	МГСОА	4	$8,8 \times 19,2 \times 14$	1,0-1,4
Цилиндрический на пластмассе	44	МГСОА МГС5	4	$8,8 \times 19,2 \times 14$	1,0-1,4
Цилиндрический на пластмассе	55	МГС51	8	$12 \times 21 \times 20$	1,7-2,5
Цилиндрический сборный	59	МГС5	8	$12 \times 32 \times 20$	1,5
Цилиндрический сборный	70	МГ4С	8	$12 \times 32 \times 27$	1,2-1,7

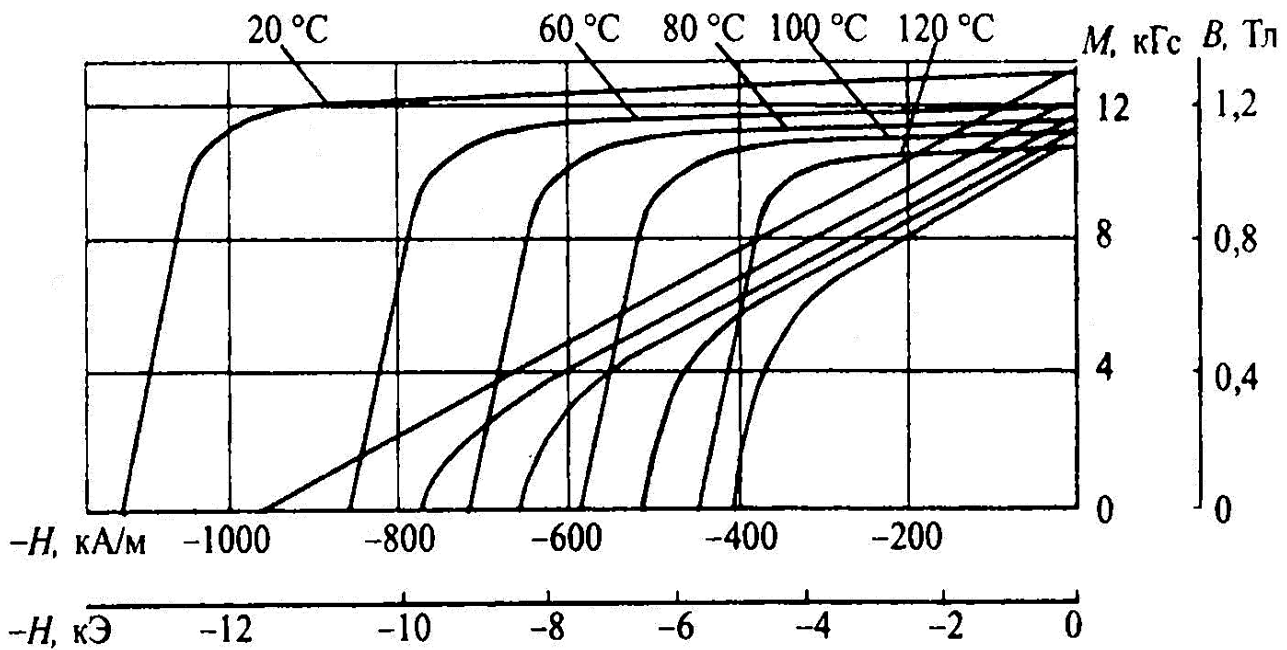


Рис. ПЗ. Кривые размагничивания материала системы Nd-Fe-B марки VM40M

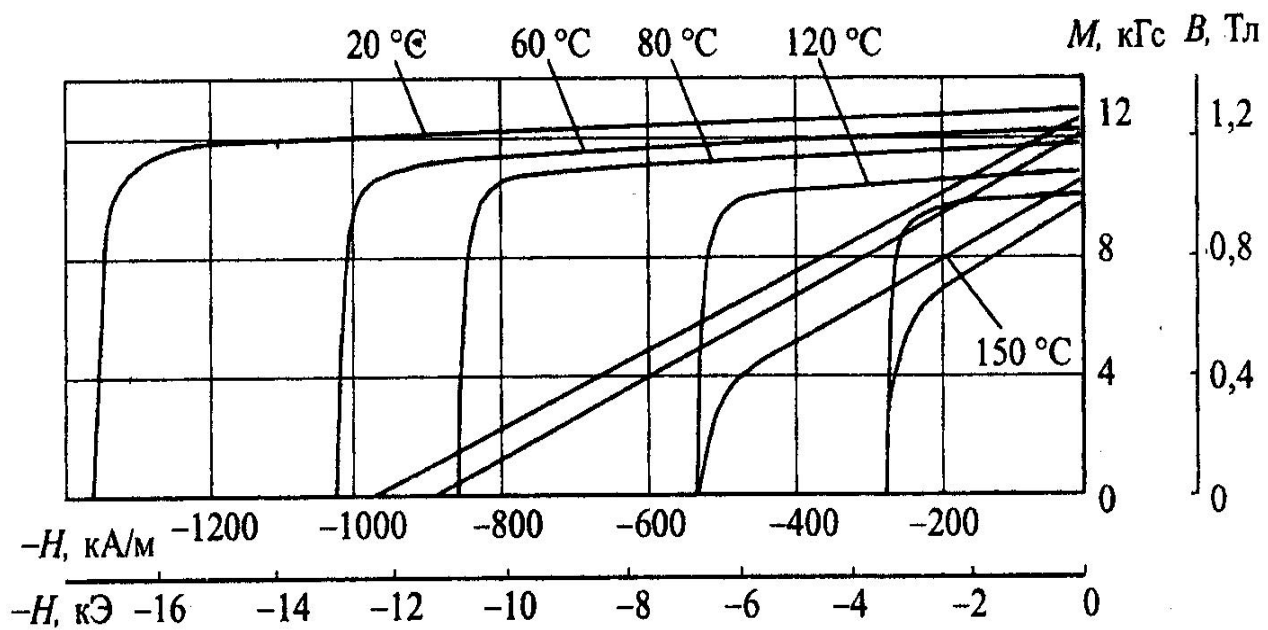


Рис. П4. Кривые размагничивания материала системы Nd-Fe-B марки VM40H

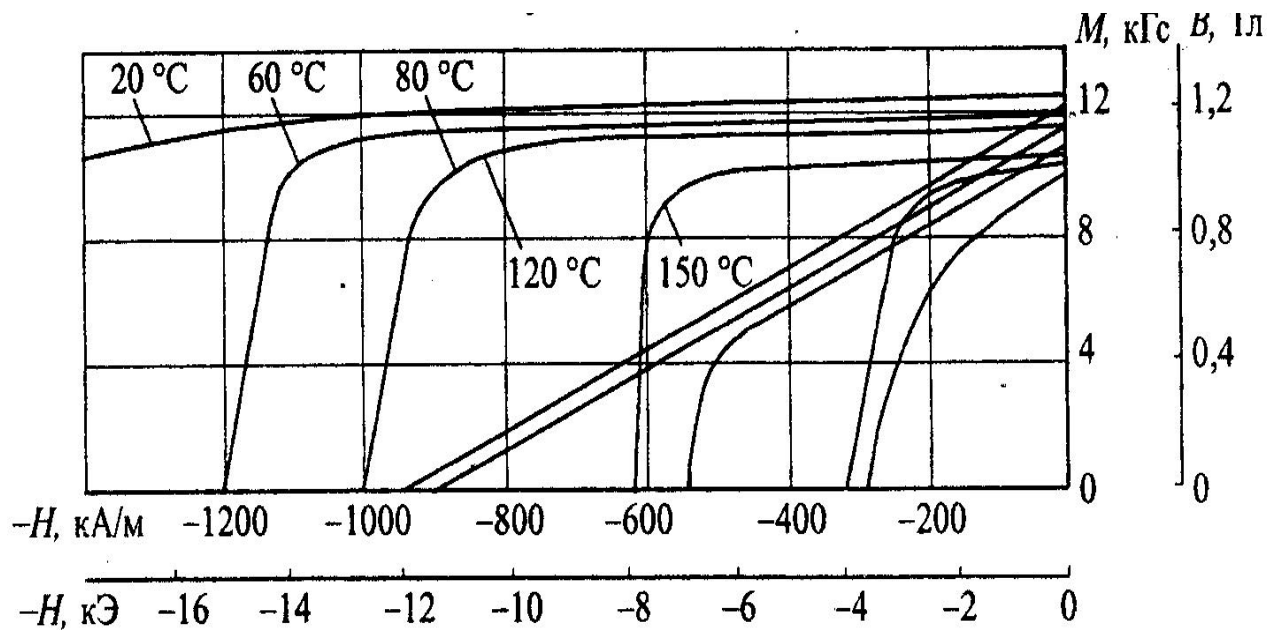


Рис. П5. Кривые размагничивания материала системы Nd-Fe-B марки VM38SH

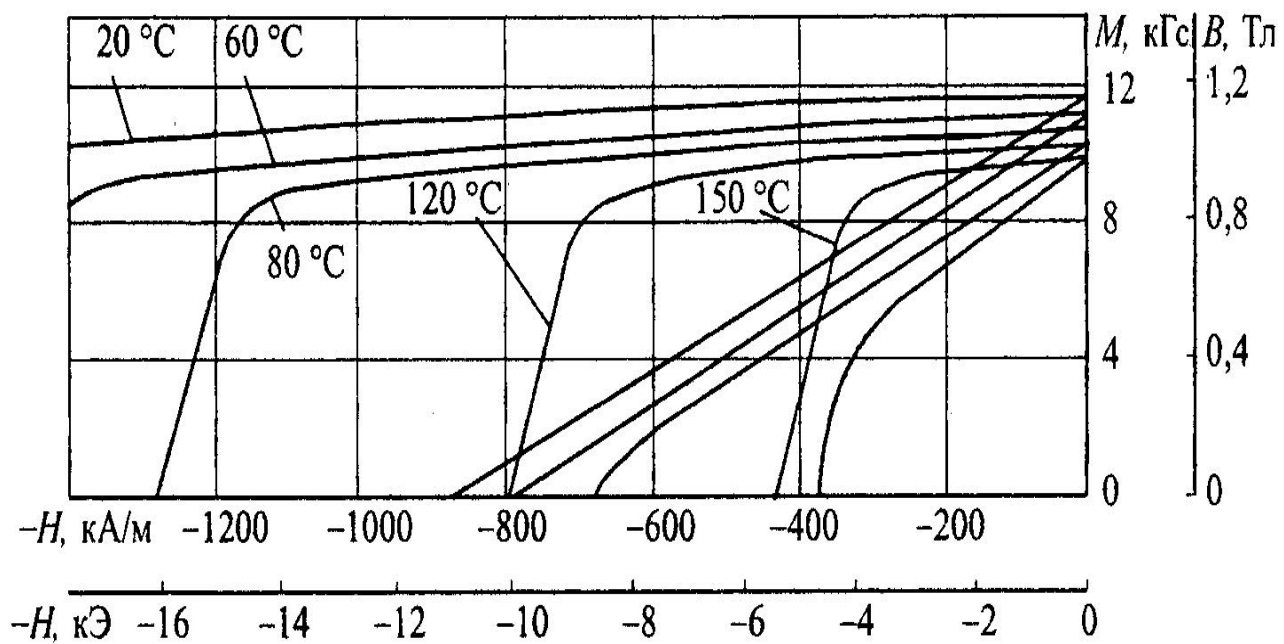


Рис. П6. Кривые размагничивания материала системы Nd-Fe-B марки VM33UH

Таблица П16

**Магнитные параметры магнитотвердых материалов на основе  
порошка феррита бария**

Марка композиции	$(BH)_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>	$H_{CB}$ , кА/м	$H_{CM}$ , кА/м	$B_r$ , Тл
	не менее			
ИРП-2042	1,12	54,4		0,08
ИРП-2056	1,88	68,8		0,11
Магнитопласт (ТУ 45-75)	4,0	72	88	0,17
Платиформ 1Н	8,3	155	176	0,21
Платиформ 1	8,6	118		0,22

Таблица П17

**Параметры гибких магнитотвердых материалов на основе Nd-Fe-B**

Марка композиции	$B_r$ , мТл	$H_{CB}$ , кА/м	$H_{CM}$ , кА/м	$(BH)_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>	$\alpha_{Br}$ , % /°C	$t_k$ , °C	$t_{раб}$ , °C	$H_s$ , кА/м	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	HRB
GPM-4	400-500	320-360	560-720	32-40	-0,10	>400	150	1600	4,5-5,5	40-45
GPM-6	500-600	320-360	560-720	40-60	-0,10	>400	150	1600	5,3~5,8	40-45
GPM-8	600-670	360-440	640-800	64-72	-0,10	>400	140	2000	5,6-6,0	35-38
GPM-8H	560-660	400-464	1040-1360	60-72	-0,13	>305	140	2800	5,6-6,0	35-38
GPM-10	660-700	400-440	640-800	72-80	-0,10	>360	140	1600	5,8-6,1	35-38
GPM-10H	690-730	400-480	760-800	80-88	-0,10	>360	150	2000	6,0-6,2	35-38
GPM-12	720-800	416-480	720-880	80-96	-0,10	>360	150	1600	6,2-6,6	35-38
GPM-12D	720-800	448-520	720-960	88-100	-0,07	2:470	160	2000	6,2-6,6	35-38

*Примечание:*  $H_s$  – поле намагничивания до насыщения

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
Введение .....	4
1. Конструкция и принцип работы электростартеров .....	5
Вопросы для самопроверки .....	13
2. Методика расчета стартерного электродвигателя .....	13
2.1. Определение расчетной электромагнитной мощности стартерного электродвигателя и номинальной емкости аккумуляторной батареи .....	13
2.2. Главные размеры электродвигателя .....	15
2.3. Обмоточные данные якоря .....	17
2.4. Размеры зубцово-пазовой зоны якоря .....	20
2.5. Расчет магнитной цепи стартерного электродвигателя .....	23
2.6. Расчет обмотки возбуждения .....	30
2.7. Расчет коллектора и выбор щеток .....	34
2.8. Расчет рабочих характеристик .....	36
Вопросы для самопроверки .....	39
3. Особенности расчета стартерного электродвигателя с постоянными магнитами и планетарным редуктором .....	40
Вопросы для самопроверки .....	43
4. Пример расчета стартерного электродвигателя с последовательным возбуждением .....	43
4.1. Определение расчетной мощности стартерного электродвигателя и номинальной емкости аккумуляторной батареи .....	44
4.2. Главные размеры электродвигателя .....	45
4.3. Обмоточные данные якоря .....	46
4.4. Размеры зубцово-пазовой зоны якоря .....	48
4.5. Расчет магнитной цепи стартерного электродвигателя .....	49
4.6. Расчет характеристики намагничивания стартерного электродвигателя .....	51
4.7. Расчет обмоточных данных обмотки возбуждения .....	56
4.8. Расчет коллектора и выбор щеток .....	58
4.9. Расчет рабочих характеристик .....	59
Вопросы для самопроверки .....	64
5. Пример расчета электростартера с постоянными магнитами и встроенным планетарным редуктором .....	64
5.1. Определение расчетной электромагнитной мощности .....	64
5.2. Расчет главных размеров электродвигателя .....	65
5.3. Расчет обмотки якоря .....	67
5.4. Расчет размеров полузакрытого паза прямоугольной формы .....	68
5.5. Расчет магнитной цепи стартерного электродвигателя .....	69
5.6. Расчет коллектора и выбор щеток .....	74
5.7. Расчет рабочих характеристик .....	75
Вопросы для самопроверки .....	78
Заключение .....	78
Список литературы .....	79
Приложение .....	79

Учебное издание

*ТРОШИН Валентин Васильевич*

**Теория, конструкция и расчет  
электростартерной системы пуска  
двигателей внутреннего сгорания**

Редактор *Г.В. Загребина*  
Компьютерная верстка *И.О. Миняева*  
Выпускающий редактор *Н.В. Беганова*

Подписано в печать 22.09.11.  
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Усл. п. л. 5,81. Уч.-изд. л. 5,78.  
Тираж 100 экз. Рег.№ 152/11.

---

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Самарский государственный технический университет»  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии  
Самарского государственного технического университета  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус №8