

Н.П. Бахарев, Н.А. Шишкина

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

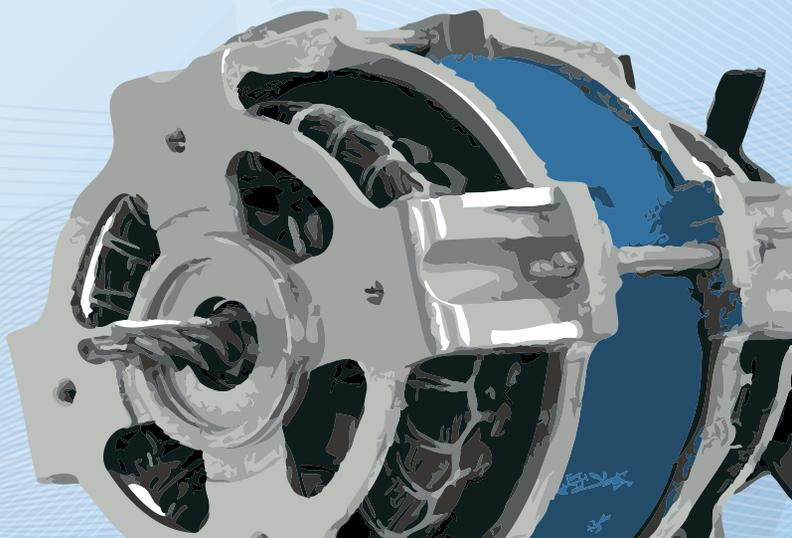
## **AC ELECTRICAL MACHINES**

---

Учебное пособие

Часть 1

### **ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Гуманитарно-педагогический институт  
Кафедра «Теория и методика преподавания  
иностраннных языков и культур»

Н.П. Бахарев, Н.А. Шишкина

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

**AC ELECTRICAL MACHINES**

Учебное пособие

В двух частях

Часть 1

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ МАШИН  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Тольятти  
Издательство ТГУ  
2012

УДК 621.313(075.8)

ББК 31.261

Б30

Рецензенты:

д.т.н., профессор, завкафедрой «Электромеханика  
и автомобильное электрооборудование» Самарского  
государственного технического университета *А.М. Абакумов*;  
к.п.н., доцент Тольяттинского государственного университета  
*Е.В. Смирнова*.

**Б30** Бахарев, Н.П. Электрические машины переменного тока = AC Electrical Machines. В 2 ч. Ч. 1. Общие вопросы теории машин переменного тока : учеб. пособие / Н.П. Бахарев, Н.А. Шишкина. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012. – 84 с. : обл.

Цель учебного пособия «AC Electrical Machines» – развитие профессиональной компетенции при овладении специальностью одновременно на русском и английском языках.

Учебное пособие предназначено для студентов 2 курса, изучающих электрические машины по направлению подготовки 140600.62 «Электротехника, электромеханика и электротехнология» очной и заочной форм обучения. Оно будет полезно магистрантам при написании курсовых и диссертационных работ, аспирантам, готовящимся к сдаче кандидатских экзаменов и изучению научных работ зарубежных авторов, а также тем, кто изучает английский язык самостоятельно и интересуется данной тематикой или решил повысить свой уровень профессионального владения английским языком.

УДК 621.313(075.8)

ББК 31.261

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский  
государственный университет», 2012

## ПРЕДИСЛОВИЕ

### INTRODUCTION

Высокий уровень профессиональной компетенции современного специалиста характеризуется наличием у него определенного набора профессиональных умений и навыков. Иноязычные умения и навыки, зафиксированные Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования, являются частью профессиональной компетенции выпускника вуза. Эти умения и навыки успешно реализуются, если они коррелируют с профессиональными. Поэтому авторы пособия сочли возможным параллельно обучать студентов специальности и английскому языку.

Цель учебного пособия «AC Electrical Machines» – развитие профессиональной компетенции при освоении специальности одновременно на русском и английском языках. Задача – первичное знакомство и дальнейшее закрепление (совершенствование) профессиональной терминологии на двух языках, а также развитие профессионального мышления студентов по мере работы с материалами лекций на русском языке и выполнения тестов и контрольных заданий – на английском языке.

Пособие предназначено для студентов второго курса специальностей электротехнического направления.

Учебное пособие состоит из двух связанных между собой разделов. Первый – конспект лекций по общим вопросам теории электрических машин переменного тока, второй – тесты и контрольные задания для повторения. Справочные материалы размещены в приложениях.

В современном мире высококвалифицированному специалисту необходимо знать и называть одни и те же предметы, явления и понятия на разных языках, так как объем поступающей в наши дни иноязычной информации постоянно растет. Поэтому при создании конспекта лекций авторы пытались соединить цели обучения иностранному языку специалиста технического вуза с тем миром, в котором он формируется. Это мир его будущей профессии. Психологические закономерности усвоения

языка натолкнули на мысль построить синонимическую систему обучения специальности и иностранному языку. В качестве синонимов авторы решили использовать обозначения предметов, явлений, понятий и профессиональных терминов на русском и английском языках (даются в скобках в качестве подсказки). Авторы посчитали такой подход к освоению профессиональной терминологии вполне приемлемым, так как он позволяет сосредоточить внимание студентов на решении именно профессиональной задачи и одновременно помогает расширить словарный запас по специальности на иностранном языке, что приводит к его мотивированному усвоению и преодолению возникающих лексических трудностей. Лекции, данные полностью на английском языке, создают определенные трудности в освоении профессионально направленного учебного материала. Многократное использование иноязычных терминов, постоянно встречающихся в лекциях, способствует их прочному усвоению и закреплению и в дальнейшем послужит основой успешного участия специалиста в ситуациях профессионального общения, требующих использования иностранного языка.

Второй раздел содержит тесты на английском языке, контролирующие усвоение студентами курса лекций, и контрольные вопросы на английском языке для повторения материала первого раздела.

В приложениях размещены справочные материалы: русско-английский словарь электротехнических терминов (252 единицы); русско-английский словарь математических терминов (49 единиц); краткий список глаголов с их формами (50 единиц); список русско-английских сокращений, использованных в пособии (9 единиц); краткий грамматический справочник, включающий формы образования пассивного залога в трех основных видовременных формах английского глагола и правила чтения математических формул; тексты для дополнительного чтения, заимствованные с некоторыми сокращениями из оригинальной литературы по специальности (7 единиц).

Структура учебного пособия отражает попытку авторов направить учебную деятельность обучаемого на совершенство-

вание профессиональной компетенции, а также позволяет наметить четкую траекторию формирования профессиональной иноязычной компетенции студентов технического вуза.

Пособие позволяет обучающимся самостоятельно контролировать степень понимания и усвоения материала, поскольку лекции на русском языке дают возможность оценить правильность выполнения контрольных заданий и тестов.

Учебное пособие «AC electrical machines» может быть полезным студентам магистратуры при написании курсовых и диссертационных работ, аспирантам, готовящимся к сдаче кандидатских экзаменов и изучению научных работ зарубежных авторов, а также тем, кто изучает английский язык самостоятельно и интересуется данной тематикой или решил повысить свой уровень профессионального владения английским языком.

Авторы выражают искреннюю благодарность аспиранту Тольяттинского государственного университета Александру Жукову за помощь в формировании электронной версии пособия.

## **Раздел I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

### **Chapter I. GENERAL PROBLEMS OF ALTERNATING CURRENT MACHINE THEORY**

Уровень жизни (living standards) общества во многом определяется (are defined by) количеством вырабатываемой (of produced) и потребляемой (consumed) электрической энергии (electric energy). Без электричества современный прогресс в любой отрасли (in any branch) промышленности, в быту (in everyday life), науке, экономике невозможен (is impossible).

Машины переменного тока (alternating current machines) играют огромную роль в создании (in producing), преобразовании (converting) и потреблении (consuming) электрической энергии.

Практически вся электрическая энергия в мире вырабатывается (is produced) синхронными электрическими машинами (by synchronous electrical machines) на тепловых (at the heat), гидравлических (hydraulic), атомных (atomic), ветряных (wind) электростанциях (power stations). В России вырабатывается (is produced) 20000 кВт/час (per hour) электроэнергии на человека в год (per capita annually), а в экономически развитых странах (in economically developed countries) – 5000 кВт/час.

Основную долю (a great deal of) электрической энергии потребляют (is consumed by) асинхронные двигатели (by induction motors) – 40...70% (per cent), преобразуя ее (converting it) в механическую.

Асинхронные двигатели (induction motors), потребляющие существенную долю (considerable part) электрической энергии, применяются в (are applied in) системах регулируемого (of regulated) и нерегулируемого (non-regulated) электропривода (motor drive) и как составная часть автоматизированного привода (automatic motor drive).

## 1.1. Конструктивные (basic) схемы исполнения асинхронных машин (of induction motors)

Асинхронный двигатель (induction motor) состоит из (consists of) двух основных частей, разделенных (divided by) воздушным зазором (air clearance): неподвижного статора (stationary stator), который является в основном (mainly) индуктором (an inductor), и вращающегося ротора (revolving rotor). Статор и ротор состоят из (consist of) сердечника (core) – магнитопровода (magnetic circuit) с пазами (slots) и обмоток (coils).

К основным конструктивным узлам (basic units) асинхронного двигателя (induction motor), представленного на рис. 1, можно отнести шихтованный магнитопровод (laminated magnetic circuit) статора с обмоткой переменного тока (armature alternating current coil), запрессованный (pressed) в станину (engine bed); шихтованный магнитопровод (laminated magnetic circuit) ротора с обмоткой (winding), установленный на вращающийся вал (mounted on a rotating shaft), передающий электромагнитный момент (magnetic torque) нагрузке (load); подшипниковые узлы (bearing sub-assemblies); подшипниковые щиты (bearing brackets); вентилятор (fan); коробку выводов (terminals' box); устройство крепления (fasten construction) к фундаменту (foundation) или основанию (basis).

Существуют два основных типа асинхронных двигателей (induction motors): двигатель с короткозамкнутым ротором (squirrel-cage rotor) и двигатель с фазным ротором (phase-wound rotor). Оба двигателя имеют одинаковую (similar) конструкцию статора и отличаются (differ) только конструкцией ротора.

По способу монтажа (by wiring) наибольшее распространение (are most widely used) получили исполнения (constructions) IM1 – IM4.

Среди машин малой мощности (small power) распространены исполнения IM5 и IM9, которые применяют в бытовых устройствах (every day devices) и электрифицированном инструменте (electric instrument).

По степени защиты (protection range) от воздействия окружающей среды (environmental influence) для машин малой мощнос-

ти распространено исполнение IP44 и IP54 со способом охлаждения (cooling) IC041, а для машин средней и большой мощности (medium and high) – также исполнение IP23 со способом охлаждения IC01.

Магнитопровод (magnetic circuit) сердечника статора (stator core) шихтуют (is laminated) листами (sheets) электротехнической стали (electrical-sheet steel) толщиной 0,35–0,5 мм.

Сердечник статора (stator core) асинхронного двигателя (induction motor) с высотой осей  $h \leq 250$  мм набирается из (is constructed with) шихтованных листов электротехнической стали (laminated electrical-sheet steel) с базированием по внутреннему (inner) диаметру и шлицам пазов (slots splines). Если применяется сталь марки 2013, листы после штамповки (stamping) проходят термическую обработку (heat treatment) с последующим окислением (oxidation) в печах с автоматическим режимом (automatic operation furnaces). Набранный сердечник (core) спрессовывают под давлением (is pressured under)  $\approx 1,5$  МПа и скрепляют (bolted) стальными скобами (clumps), которые располагаются (are rested) по наружной поверхности сердечника (core outer surface).

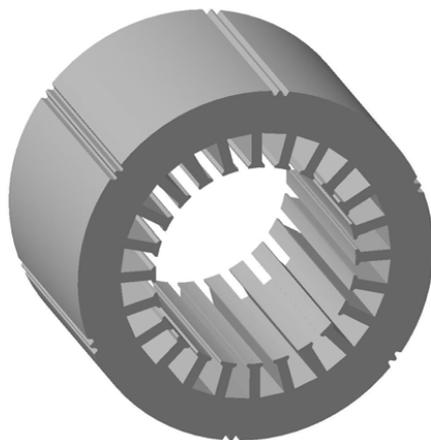


Рис. 1. Сердечник магнитопровода (magnetic circuit core) статора без обмотки (winding)

Сердечник двигателя (drive core) of  $h = 50-90$  мм сваривают (is welded) по внешней поверхности (on outer surface). Обмотанные и пропитанные сердечники статора (stator cores) двигателей впрессовывают в станины (engine bed).

Иногда листы магнитопровода (magnetic circuit sheets) устанавливаются (are mounted) непосредственно в станину и в процессе опрессовки (moulding) закрепляются (fasten) кольцевыми шпонками (ring keys) либо собираются (collect) на центрирующую оправку (on mandrel centering) вне станины и скрепляются стальными планками (steel plate), расположенными (located) в неглубоких прямоугольных канавках (rectangular slots), привариваемыми (welded) к нажимным шайбам (washers) и частично (partially) – к спинке сердечника (core back).

Форма пазов сердечника (core slots' form) в основном трапециевидная (trapezium) полузакрытая (semi-closed); прямоугольная открытая (rectangular open).

Конструкции станины (bed) асинхронного двигателя (induction motor) по степени защиты IP44 и IP23 принципиально различны (differ). Станина двигателя (engine bed) IP44 с  $h \leq 355$  мм выполняется (is made) в форме цилиндра с продольными ребрами (longitudinal ribs) на внешней поверхности (external surface) (рис. 2) либо с трубками воздухоохладителя (air-cooling tubes) у двигателей с  $h > 400$  мм.

У двигателей с  $h < 63$  мм станины (beds) литые из алюминия (aluminum castings).

При  $h = 71-100$  мм применяется комбинированная конструкция: станины из алюминиевого сплава (aluminum alloy beds), подшипниковые щиты из чугуна (bracket of cast iron).

Метод выполнения станин (beds) из полого профиля (hollow profile), получаемого путём экструзии (extrusion way) из алюминиевого сплава в виде трубы (aluminum alloy tube), находит всё более широкое применение (are wider and wider used).

Асинхронные двигатели (induction motors) с литыми чугунными оболочками (casting iron beds) (станинами) до  $h \leq 280$  мм получили наибольшее распространение (are widespread) в ми-

ровой практике электромашиностроения (in the world electro-machine engineering).

Двигатели с  $h > 280$  мм выполняются со сварными станинами (welded beds) из стального проката (steel plates).

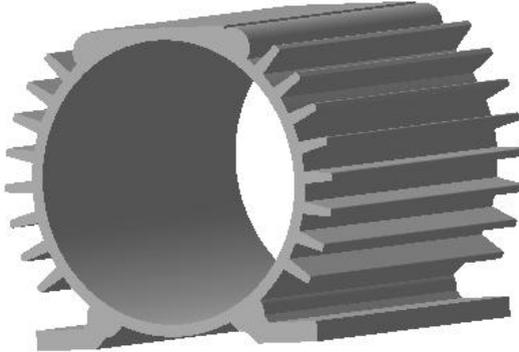


Рис. 2. Станина (bed) АД в исполнении IP44

По конструкции ротор асинхронного двигателя (induction motors' rotor) выполняется короткозамкнутым типа «беличья клетка» (squirrel-cage) (рис. 3) либо фазным (phase), в пазах которого размещается обмотка переменного тока (alternating coil), имеющая столько фаз и полюсов (phases and poles), сколько и обмотка статора (armature coil).

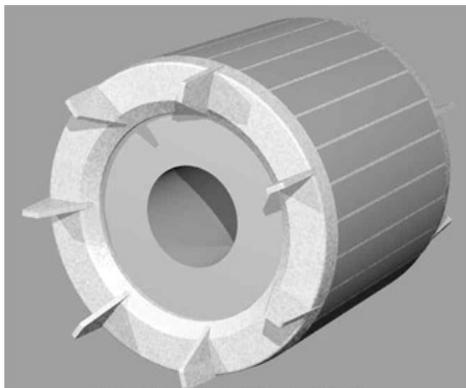


Рис. 3. Короткозамкнутый ротор

Ротор состоит из (consists of) шихтованного магнитопровода (laminated magnetic circuit) и короткозамкнутой обмотки типа «беличья клетка» (squirrel-cage winding) (рис. 4).

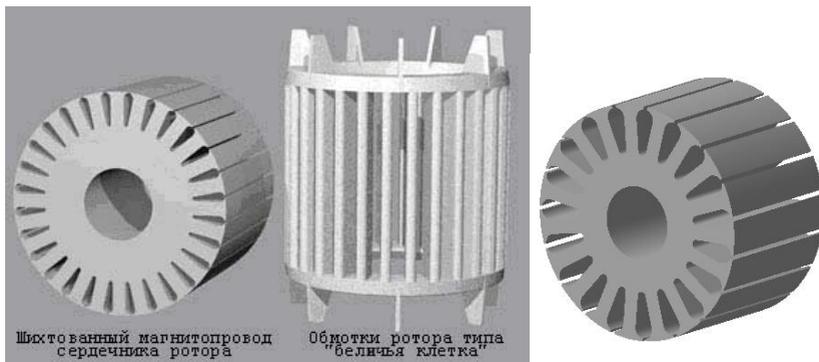


Рис. 4. Конструкция магнитопровода и обмотки короткозамкнутого ротора (squirrel-cage rotor)

Ротор с обмоткой (winding) напрессовывается (is pressed) на вал двигателя (onto the engine shaft).

Штамповка листов сердечника ротора (sheets' core rotor stamping) производится одновременно со штамповкой листов статора (sheets' core stator stamping).

Листы ротора у двигателя (engine rotor sheets)  $h < 250$  мм изготавливаются из стали 2013 и набираются на оправку (taken to holder), прессуются и без снятия давления (pressure release) закрепляются на оправке (are fitted on the holder). В таком виде сердечник ротора (rotor core) заливается (is poured) алюминием.

Сердечники короткозамкнутых роторов (squirrel-cage rotor cores) после заливки алюминием напрессовывают на вал (onto shaft).

При заливке алюминием (when aluminum pouring) одновременно происходит формирование короткозамкнутых колец (formation of squirrel-cage rings) и вентиляционных лопаток (ventilation bladings).

Фазный ротор (phase rotor) (рис. 5) состоит из сердечника магнитопровода (magnetic circuit core) и обмотки переменного тока (alternating winding), фазы которой соединены в звезду

(into star), реже – в треугольник (into triangle), и имеют три вывода (terminals), которые подсоединяются к контактным кольцам (contact rings), расположенным внутри корпуса (body) или на выступающем конце вала (overhanging shaft end).

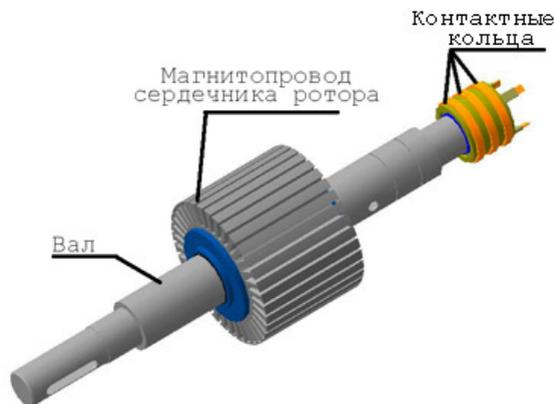


Рис. 5. Фазный ротор АД без обмотки (winding)

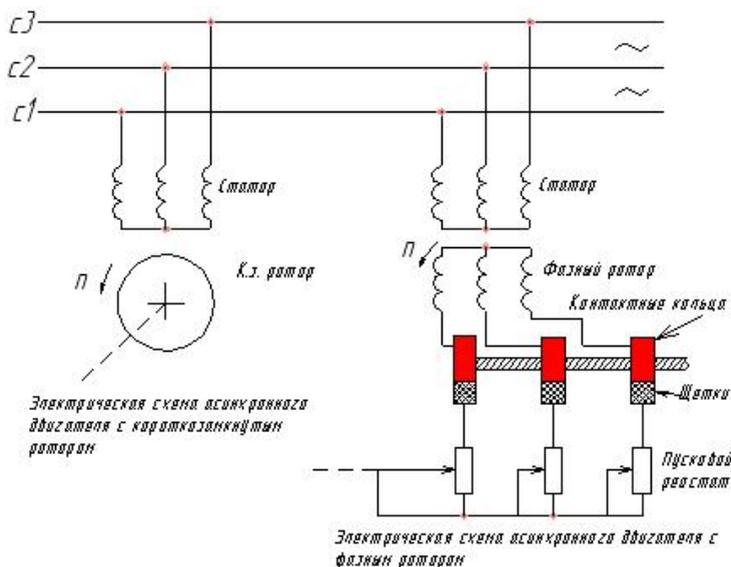


Рис. 6. Электрическая схема (scheme) АД с короткозамкнутым и фазным ротором

Прилегающие к контактным кольцам (contact rings) щетки (adjoining brushes) соединены с пусковым реостатом (starter rheostat), позволяющим изменять дополнительное активное сопротивление в обмотке ротора (rotor resistance) во время пуска. При номинальном режиме щетки (brushes) замкнуты накоротко (are short circuit) (рис. 6).

## 1.2. Конструктивные (basic) схемы исполнения синхронных машин (SM) (synchronous machines)

Принцип действия многофазных (polyphase) синхронных машин основан на получении вращающегося магнитного поля (rotating magnetic field). В синхронных машинах (СМ) (SM) (synchronous machines) ротор вращается (rotates) синхронно (in synchronism) с вращающимся магнитным полем (rotating magnetic field).

Основные преимущества (advantages) СМ:

- а) постоянная (constant) скорость вращения ротора (rotor rotating) независимо от (in independent of) нагрузки на валу (shaft load)  $n = n_1 = \text{const}$ ;
- б) возможность (possibility) работы СМ с  $\cos\varphi = 1$  и даже с опережающим (with advancing of)  $\varphi$  ( $\varphi < 0$ ).

К особенностям (peculiarities) СМ следует отнести следующие:

- 1) независимо от режима работы СМ (however synchronous machine might operate) (генератор или двигатель) ротор вращается со скоростью, равной скорости магнитного поля (magnetic field speed) и в ту же сторону (in the same direction);
- 2) частота ЭДС (electromotive force frequency), индуцируемой в обмотке переменного тока статора, пропорциональна (is proportional to) скорости вращения ротора (rotating rotor speed);
- 3) в обмотке ротора (rotor winding) ЭДС не индуцируется, а магнитное поле создается (is produced by) постоянным током (continuous current) от постороннего источника (side source) или постоянными магнитами (permanent magnets);
- 4) СМ (synchronous machines) – это машины двойного питания (double energized sources). Якорь (armature) подключается (is powered with) к сети многофазного переменного напряжения

(polyphase alternating voltage), а индуктор (inductor) – к источнику постоянного напряжения (direct voltage), если возбуждение электромагнитное (magnetization), а не (but not) магнито-электрическое.

СМ (synchronous machines – SM) применяются в качестве (are applied both as) генераторов и двигателей большой мощности (high power), а также микродвигателей в системах автоматического управления (automatically operated systems) и в быту (everyday life).

Рассмотрим (let's consider) устройство СМ (the general arrangement of SM) большой мощности.

Якорь (armature) – статор. Индуктор – ротор. Данное построение (given model) имеет преимущества. Мощность возбуждения (magnetization power) невелика – 0,3...2% от мощности якоря. Следовательно, подвод постоянного тока (alternating current brushing) к обмотке возбуждения (field coil) на роторе с помощью двух контактных колец не вызывает затруднений.

СМ (synchronous machines SM) небольшой мощности (small power) иногда выполняют (are produced) обратной конструкции (converse construction): статор – индуктор, ротор – якорь (armature).

В СМ с неподвижным якорем (stationary armature) (классическая конструкция) конструкция статора аналогична конструкции статора асинхронных машин, а ротор имеет две разновидности (variations):

- 1) явнополюсная конструкция (obviously poled-construction) с явновыраженными полюсами;
- 2) неявнополюсная конструкция (non-obviously poled construction) с неявновыраженными полюсами.

Явнополюсный ротор (obviously poled rotor) применяется в СМ с  $2p \geq 4$  (рис. 7). Обмотка возбуждения (field coil) сосредоточенная, в виде цилиндрических катушек (cylindrical bobbin form), которые размещаются (that located) на сердечниках полюсов (pole cores) и закрепляются (fastened) полюсными наконечниками (pole pieces). Сердечники (pole cores) и наконечники полюсов (pole arcs) выполняются шихтованными из электротехнической стали (laminated electrical-sheet steel).

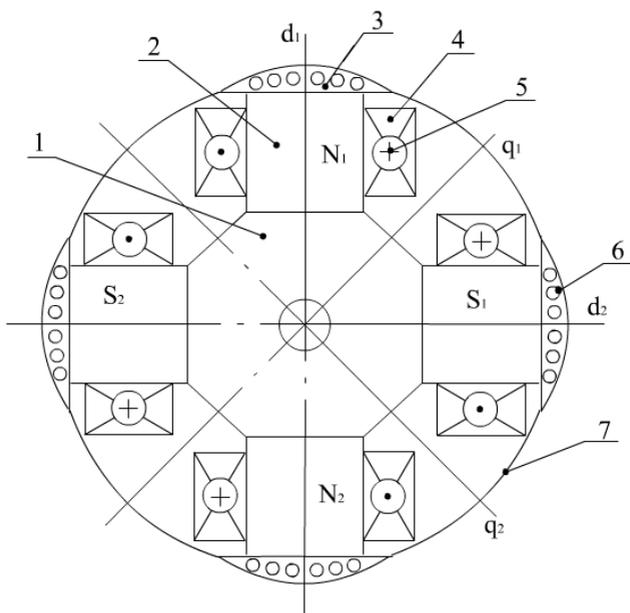


Рис. 7. Конструкция явнополюсного ротора (obviously poled rotor construction) СМ ( $2p = 4$ ): 1 – остов ротора (skeleton) (бочка, крестовина) (cage, spider); 2 – сердечник полюса (pole core); 3 – наконечник полюса (pole arc); 4 – обмотка возбуждения (field coil); 5 – ток возбуждения (field current); 6 – пусковая (СД) (starting winding) успокоительная (СГ) к.з. обмотка (short-circuit winding damper); 7 – к.з. кольца (squirrel-cage ring);  $d$  – продольная ось ротора (rotor axis);  $q$  – поперечная ось ротора (rotor cross axis)

Явнополюсная конструкция ротора (obviously poled rotor construction) применяется в СМ  $2p \geq 4$ . В основном (mainly) это мощные тихоходные (slow moving) гидротурбины (hydraulic-turbine generators).

Сердечники полюсов (pole cores) с ОВ крепятся (are mounted) к остову ротора (skeleton). Крепление (connection) выполняется по различным вариантам: болтовое соединение (bolt), «ласточкин хвост» («dovetail») и т. д.

Неявнополюсный ротор (non-obviously poled rotor construction) (рис. 8) применяется в СМ на большие скорости (at high speed):  $2p = 2, 4$ . Конструкция ротора обеспечивает (provides) необходи-

мую прочность (necessary strength). Соотношение длины (length ratio) к диаметру неявнополюсного ротора (non-obviously poled rotor diameter)  $\frac{l}{D} \approx 6$ , явнополюсного ротора (obviously poled rotor)  $\frac{l}{D} \approx 0,15...0,2$ .

В основном это быстроходные турбогенераторы (speed turbo generators), применяемые на тепловых (thermal) и атомных электростанциях (power stations).

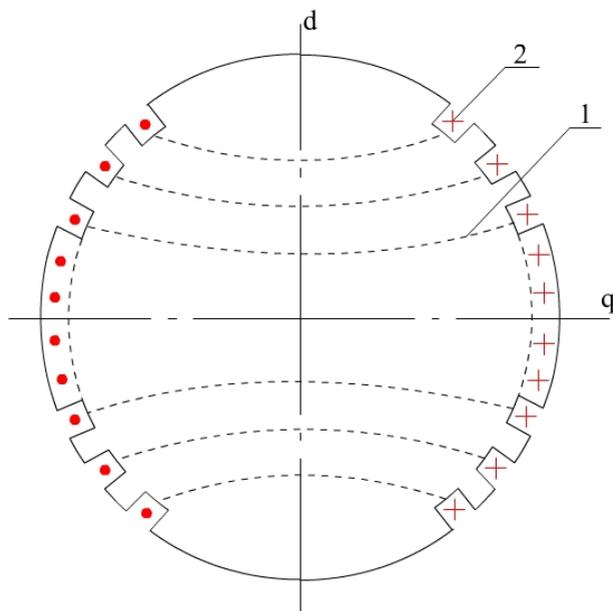


Рис. 8. Конструкция неявнополюсного ротора (non-obviously poled rotor construction) СМ ( $2p = 2$ ): 1 – остов (skeleton) ротора (поковка); 2 – распределённая обмотка возбуждения (stator winding)

Остов ротора (skeleton) выполняется из массивной стальной поковки (massive steel sheet) с высокой магнитной проницаемостью (high magnetic permeability). Концентрические катушки (concentric windings) распределенной обмотки возбуждения (stator winding) размещаются в пазах ротора (rotor slots). При-

близительно (approximately)  $\frac{1}{3}\tau$  не имеет пазов – это большие зубцы (teeth), которые способствуют созданию синусоидального распределения (sinusoid distribution) магнитного потока возбуждения (magnetic flux) в воздушном зазоре СМ (air-gap length synchronous machines).

### **1.3. Принцип выполнения обмотки переменного тока (alternating current coil producing)**

Современная физическая концепция принципа действия машин переменного тока основана на получении и использовании вращающегося (rotating) в пространстве машины (в воздушном зазоре length) магнитного поля (magnetic field).

В последнее время в электроприводах (electric circuit) широко начинают применяться реактивные, индукторные и другие электрические машины (electric machine), представляющие собой различные варианты исполнения классических машин переменного тока, принцип действия которых основан на возникновении реактивного момента (reactive moment). Причиной реактивного момента являются электромагнитные силы (electromagnetic forces), длительность, величина и форма которых формируются электронной схемой питания электропривода (magnetic circuit) и конструкцией магнитной системы электрической машины.

Рассмотрим условия и конструктивные решения получения вращающегося магнитного поля (rotating magnetic field) в электрической машине переменного тока (МПТ).

Вращающееся круговое магнитное поле (rotating magnetic circuit) можно получить с помощью обмотки переменного тока (ОПТ) (current variable winding), по виткам которой протекает синусоидальный переменный ток  $m$ -фазной системы (phase system), где  $m$  – число фаз ОПТ.

## 1.4. Основные условия (conditions) получения вращающегося магнитного поля

Принцип действия электрических машин переменного тока МПТ (alternating current machine) основан на создании вращающегося магнитного поля в электромеханическом преобразователе (converter) энергии.

Необходимые и достаточные условия получения вращающегося магнитного поля (rotating magnetic circuit) приведены ниже.

1. Число обмоток (фаз) переменного тока (alternating current winding) должно быть  $m \geq 2$ . Наибольшее распространение получили МПТ (alternating current machine) с  $m = 3$ , реже (rarely) применяются  $m = 2$ .

2. По обмоткам протекают переменные синусоидальные токи одной частоты, смещённые по фазе (out of phase) друг относительно друга на одинаковый угол  $\varphi$  (в градусах):

$$m = 2, \varphi = 90^\circ;$$

$$m = 3, \varphi = 120^\circ;$$

$$m = 6, \varphi = 60^\circ.$$

Если обмотки (winding) одинаковые (наиболее распространённый случай), то амплитуды токов (current amplitude) равны.

3. Амплитуды МДС всех обмоток (фаз) равны. Например, при  $m = 3$

$$F_{mA} = F_{mB} = F_{mC}.$$

4. Оси всех обмоток фаз смещены в пространстве МПТ на один и тот же угол  $\gamma$  (в электрических градусах) (electrical degree):

$$m = 2, \gamma = 90^\circ \text{ эл.};$$

$$m = 3, \gamma = 120^\circ \text{ эл.};$$

$$m = 6, \gamma = 60^\circ \text{ эл.},$$

где  $\gamma$  – электрический угол (electrical angle) между осями фаз обмотки.

Ось обмотки (winding axle) (рис. 9) совпадает с геометрической осью, проходящей в центре плоскости этой обмотки (winding). Направление (direction) оси совпадает (coincides) с на-

правлением МДС обмотки, создающейся током, протекающим в положительном направлении (positive direction) от конца обмотки к её началу.

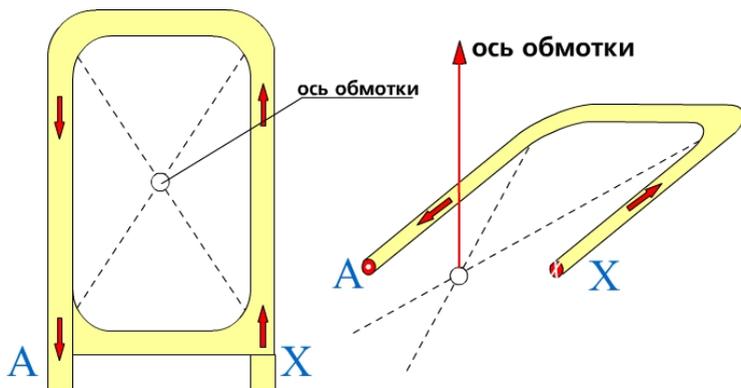


Рис. 9. Простейшая (simplest) сосредоточенная катушка (concentrated) (обмотка, фаза) МПТ

Электрический угол (electrical angle) между осями фаз:

$$\gamma = \frac{360^\circ p}{m},$$

где  $p$  – число пар полюсов (pair pole number) магнитного поля;  $m$  – число фаз (phase number) или фазных зон;  $\gamma$  – фазная зона, измеряется в электрических градусах (electrical degree).

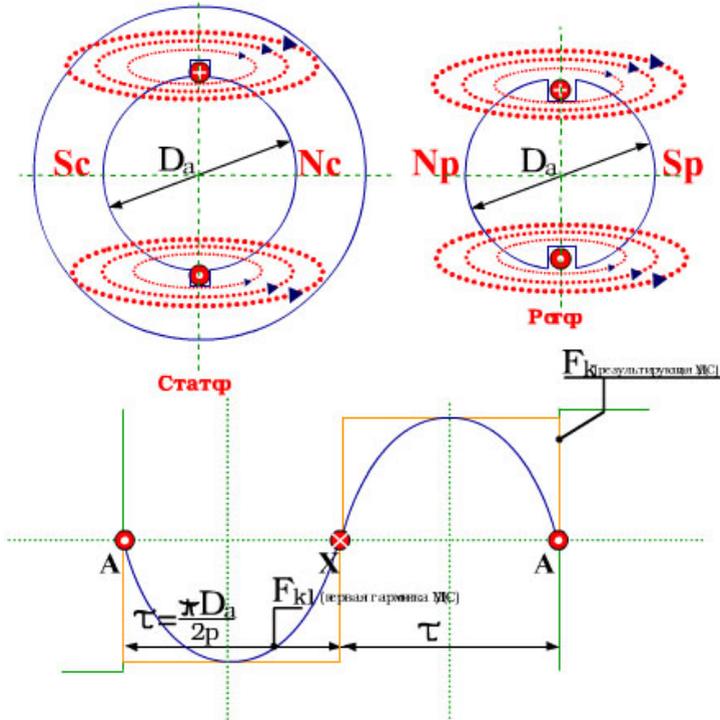
### 1.5. Однофазная сосредоточенная однослойная обмотка переменного тока (one-phase concentrated one-layer alternating current winding)

Однофазные сосредоточенные однослойные обмотки переменного тока (one-phase concentrated one-layer alternating current winding) создают только пульсирующее магнитное поле (pulsating magnetic field) (рис. 10).

Полюсное деление (pole pitch) МПТ:

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

где  $\tau$  – это часть окружности статора /ротора (stator /rotor circumference), приходящаяся на полюс определенной полярности (defined polarity).



Распределение МДС по зазору

Рис. 10. Картина силовых линий (power lines) магнитного поля простейшей сосредоточенной ОПТ  $2p = 2$

Вся окружность якоря (armature) (статора или ротора) составляет  $360p$  – электрических градусов (electrical degree) ( $360p^\circ$  эл.).

Полюсное деление (pole pitch) всегда занимает пространство в  $\frac{360p}{2p} = 180^\circ$  эл.

Получение числа  $p > 1$  возможно при увеличении числа катушек (winding) фазы (обмотки), равномерно распределенных по окружности (along the circumference) якоря (статора, ротора).

Например, при  $2p = 4$  ( $p = 2$ ) вся окружность (circumference) статора или ротора будет включать в себя  $360p = 720^\circ$  эл.

В данном случае для формирования четырёх полюсных делений (pole pitch)  $\tau = 180^\circ$  эл. необходимы две катушечные группы (coil group) фазы, смещенные друг относительно друга на  $360^\circ$  эл.

В этом случае магнитное поле МПТ пульсирующее (pulsing).

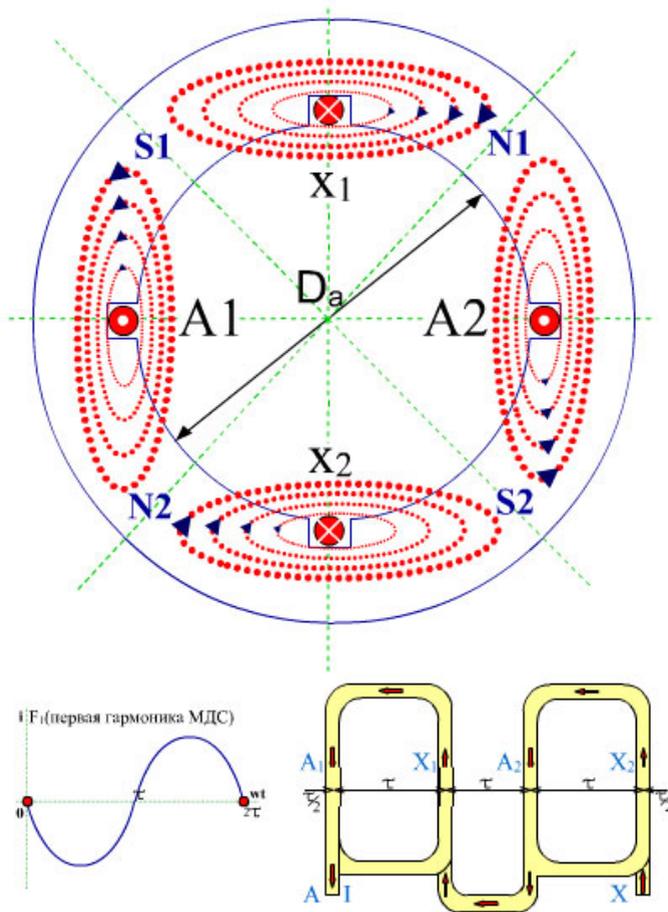


Рис. 11. Простейшая (simplest) сосредоточенная обмотка (фаза) (concentrated winding) ОПТ при  $2p = 4$

Рассмотрим возможность получения сосредоточенной обмотки (concentrated winding) с большим количеством полюсов, например  $2p = 4$  (рис. 11). Очевидно, в этом случае необходимо увеличить число катушек (coil), обмоток (winding) данной фазы в пространстве машины (machine space).

### **1.6. Распределенная однослойная обмотка переменного тока $2p = 2$ (distributed one-layer alternating current winding)**

Распределение (distribution) обмотки по пазам (slot) приводит к улучшению формы кривой поля и ЭДС обмотки (winding electromotive force). Идея распределения обмотки по поверхности якоря (armature surface) состоит в том, что витки провода катушки размещают не в двух пазах (slot), а равномерно распределяют («размазывают») на значительной площади поверхности якоря (armature surface).

Обычно одну сосредоточенную обмотку (катушку) (concentrated winding) делят на  $q$  одинаковых катушек (coil), размещаемых в  $2q$  пазах якоря (armature slot) с числом витков (winding) одной элементарной катушки (coil):

$$W_k = \frac{W}{q}.$$

Все  $q$  элементарных катушек (coil) смещены по поверхности якоря (armature surface) друг относительно друга на одинаковый угол  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{360^\circ p}{Z},$$

где  $Z$  – число пазов (slot) статора (ротора).

Угол, который занимает катушечная группа (coil group), состоящая из  $q$  катушек (coil), называют фазной зоной (phase-zone) или углом катушечной группы:

$$\gamma = \alpha \cdot q \text{ (эл. град), (electrical degree).}$$

Число катушек (coil) в катушечной группе определяется по формуле

$$q = \frac{Z}{2pm}$$

Данное число обычно называют числом пазов на полюс и фазу (slot number to pole/to phase) или числом катушек в катушечной группе.

Распределение магнитного поля в однофазной (one-phase) однослойной (one-layer) распределенной обмотке переменного тока (distributed alternating current winding)  $2p = 2$  представлено на рис. 12.

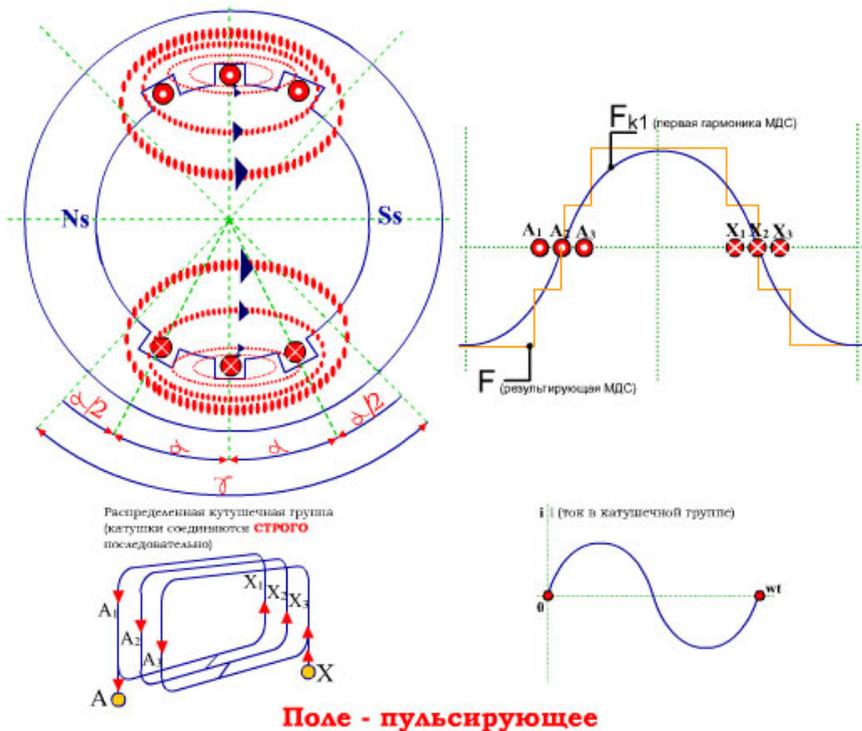


Рис. 12. МДС распределённой обмотки (фазы) (distributed winding)

Как видно из него, форма магнитного поля (magnetic field) более приближена к синусоидальной (sinusoidal form). Однако распределённая обмотка (distributed winding) создаёт в пространстве

машины всего лишь пульсирующее магнитное поле (pulsating magnetic field), пусть даже улучшенной формы.

ОПТ якоря (armature) МПТ, создающая вращающееся магнитное поле (rotating magnetic field), выполняется в основном двух видов: трехзонная (three-zone winding) и шестизонная (six-zone winding).

### 1.7. Выполнение трехфазной (three-phase) трехзонной (three-zone) обмотки переменного тока (alternating current winding)

При допущении  $Z \rightarrow \infty$  (число пазов якоря (slot armature) стремится к бесконечности (to infinity) векторная диаграмма (vector diagram) ЭДС обмотки (winding electromotive force) якоря (armature winding) машины постоянного тока представляет собой окружность (circumference), точки на которой изображают электрический потенциал.

Для получения трехфазной ОПТ ( $m = 3$ ) «разрезаем» идеальную векторную диаграмму ЭДС (winding electromotive force) на три равные части: А, В и С (рис. 13, 14).

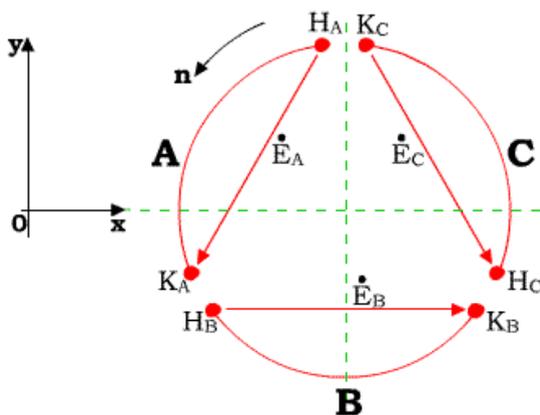


Рис. 13. Векторная диаграмма ЭДС трёхзонной ОПТ

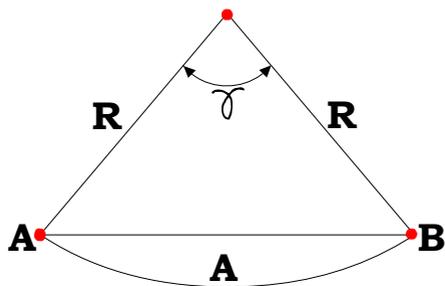


Рис. 14. Векторная диаграмма ЭДС одной фазной зоны  
( $R$  – радиус диаграммы)

Каждая обмотка (фаза) (winding) занимает в пространстве угол (фазную зону)  $\gamma = \frac{2\pi}{m} = 120^\circ$  эл. и представляет собой совокупность последовательно соединенных (series connection) катушек (coil) (секций), распределенных по окружности якоря (armature circumference). Эффективность использования распределенной обмотки (distributed winding) при  $Z \rightarrow \infty$  можно оценить коэффициентом распределения, представляющим собой отношение хорды дуги (span) векторной диаграммы к длине этой дуги:

$$k_{p\infty} = \frac{\text{хорда } AB}{\cup AB}; \quad k_{p\infty} = \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2}.$$

При фазной зоне  $\gamma = 120^\circ$  (однослойная (single-layer) распределенная (distributed) трехфазная трехзонная обмотка переменного тока (alternating current winding) при  $Z \rightarrow \infty$ :

$$k_{p\infty} = 0,827.$$

Трехзонная (three-zone winding) однослойная (single-layer) ОПТ может быть соединена в схему «звезда» (star) или «треугольник» (triangle) (рис. 15).

Максимальное число параллельных ветвей в трехзонной обмотке (three-zone winding) составляет  $a_{\max} = p$ .

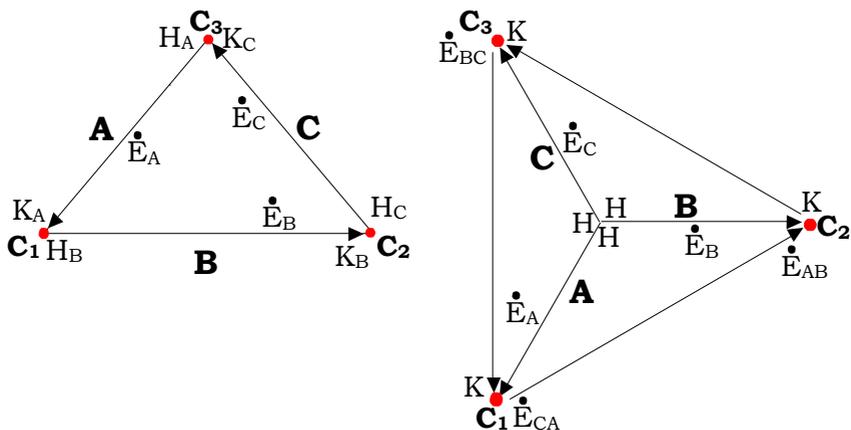


Рис. 15. Векторная диаграмма ЭДС трёхфазной (three-phase) трёхзонной (three-zone winding) ОПТ

### 1.8. Выполнение шестизонной (six-zone) трёхфазной обмотки переменного тока (alternating current winding)

Для машин переменного тока средней и большой мощности применяется трёхфазная двухслойная шестизонная ОПТ, конструкция которой признана наиболее экономичной с точки зрения получения ЭДС (electromotive force).

Векторная диаграмма ЭДС шестизонной обмотки (six-zone winding) при  $Z \rightarrow \infty$  и  $2p = 2$  представляет собой равносторонний шестиугольник, вписанный в окружность (circumference) (рис. 16).

Фазная зона (phase-zone) шестизонной обмотки (six-zone winding):

$$\gamma = \frac{\pi}{m} = 60^\circ \text{ эл.}$$

Каждая фаза трёхфазной шестизонной обмотки (six-zone winding) состоит из двух встречновключенных (opposite) полуфаз, расположенных друг относительно друга на расстоянии  $180^\circ$  эл. (АиХ, ВиУ, СиZ). Коэффициент распределения (distributing coefficient) шестизонной (six-zone winding) обмотки выше, чем у трёхзонной (three-zone winding):  $k_{p\infty} = 0,955$ .

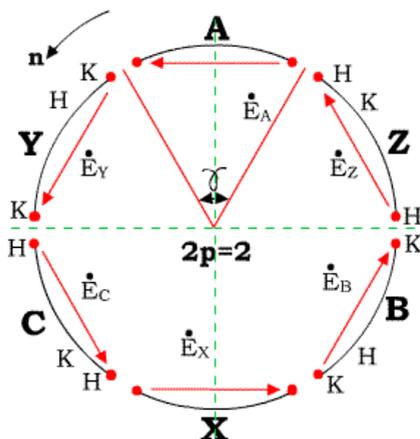


Рис. 16. Векторная диаграмма ЭДС шестизонной ОПТ

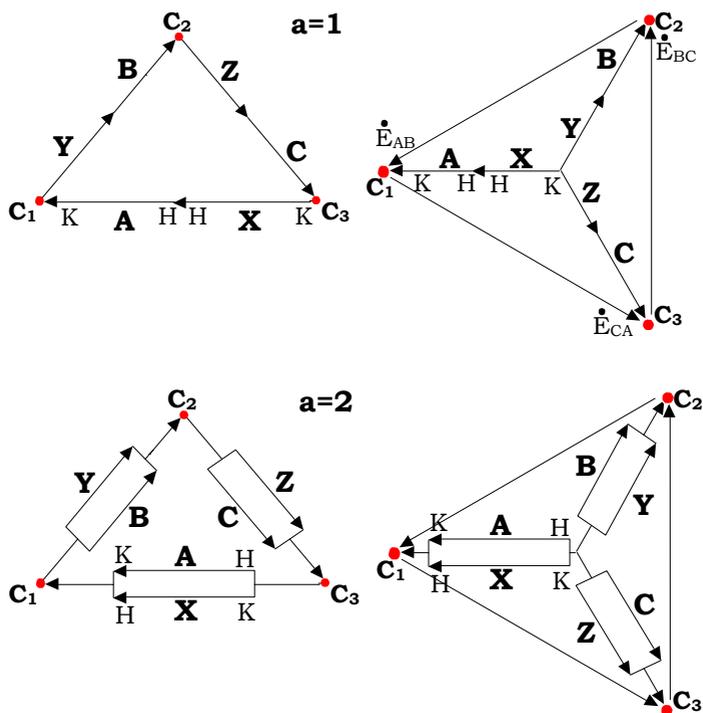


Рис. 17. Векторная диаграмма ЭДС трёхфазной шестизонной ОПТ

Трехфазная шестизонная двухслойная (double-layer) ОПТ может быть соединена в треугольник или в звезду (star) с различной комбинацией параллельных ветвей (brush) (рис. 17).

Максимальное число параллельных ветвей (brush) в шестизонной двухслойной трехфазной ОПТ составляет:  $a_{\max} = 2p$

Изобразим схему фазы сосредоточенной (concentrated) двухслойной (double-layer) (шестизонной) обмотки (six-zone winding) при  $2p = 4$  (рис. 18).

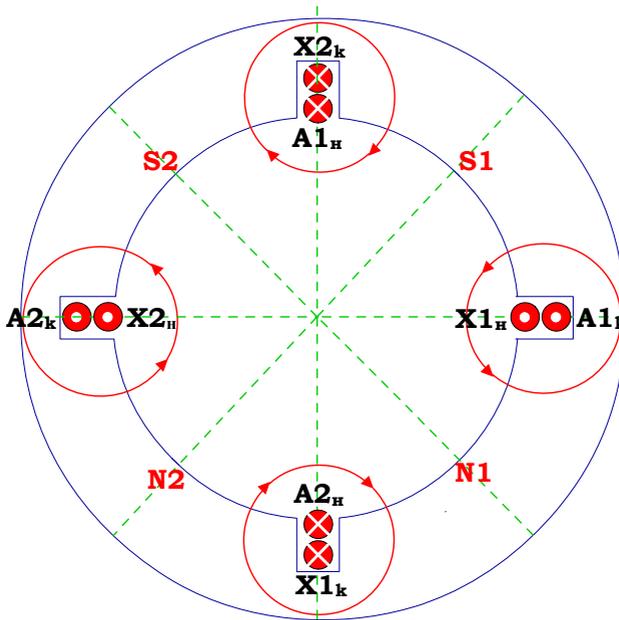


Рис. 18. Конструктивное исполнение фазы шестизонной ОПТ  $2p = 4$

Фаза должна состоять из четырех катушечных групп (coil group), каждая из которых состоит из одной катушки:  $A1_H-A1_K$ ,  $X1_H-X1_K$ ,  $A2_H-A2_K$ ,  $X2_H-X2_K$  (рис. 19).

Катушечные группы (катушки) (windings) смещены друг относительно друга на  $180^\circ$  эл.

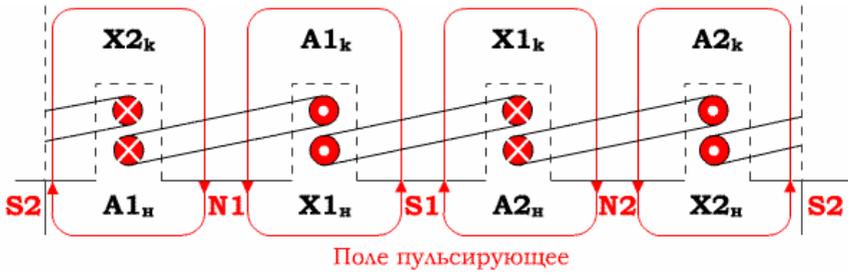


Рис. 19. Расположение катушечных сторон (coil side) шестизонной двухслойной ОПТ в пазах

### *Выводы (conclusions)*

1. Так как реальная обмотка (winding) выполняется с конечным числом пазов  $Z$  (slot), то для выполнения условия ее симметричности необходимо, чтобы все полуфазы (фазные зоны) были одинаковы и состояли из одинакового числа катушек (coil) или чтобы число пазов (slot) на полюс и фазу было целым числом:

$$q = \frac{Z}{2pt} = \text{целое число (integral number)},$$

где  $q$  – число пазов на полюс и фазу или число катушек в катушечной группе (полуфазе или фазной зоне).

2. Каждая фазная зона состоит из  $q$  катушек, соединенных строго последовательно (seriously).

3. В фазу включаются катушечные группы (фазные зоны), смещенные на  $360^\circ$  эл. в однослойных трехфазных обмотках и на  $180^\circ$  эл. в двухслойных шестизонных.

4. Число катушечных групп в однослойной трёхзонной обмотке –  $p$ , в двухслойной шестизонной обмотке –  $2p$ .

Катушечные группы (coil groups) в одной фазе могут соединяться последовательно, параллельно или последовательно-параллельно, при этом схема соединения катушечных групп во всех фазах должна быть одинаковой. Максимальное число параллельных ветвей в однослойной обмотке  $a_{\max} = p$ , в двухслойной  $a_{\max} = 2p$ .

## 1.9. Примеры выполнения обмоток переменного тока (alternating current winding)

### Однослойная концентрическая обмотка (concentric winding)

Исходные данные (initial data):  $z = 24$ ,  $m = 3$ ,  $2p = 4$ .

Определить основные параметры однослойной трёхзонной концентрической обмотки (concentric winding) и построить ее электрическую схему (circuit diagram) (рис. 20).

*Решение*

1. Число катушек в катушечной группе или число пазов (slot) на полюс и фазу:  $q = \frac{z}{2pm} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$ .
2. Электрический угол (angle) между соседними пазами (neighbour slots):  $\alpha = \frac{360p}{z} = \frac{360 \cdot 2}{24} = 30^\circ$  эл.
3. Полюсное деление (division):  $\tau = \frac{z}{2p} = 6$ .

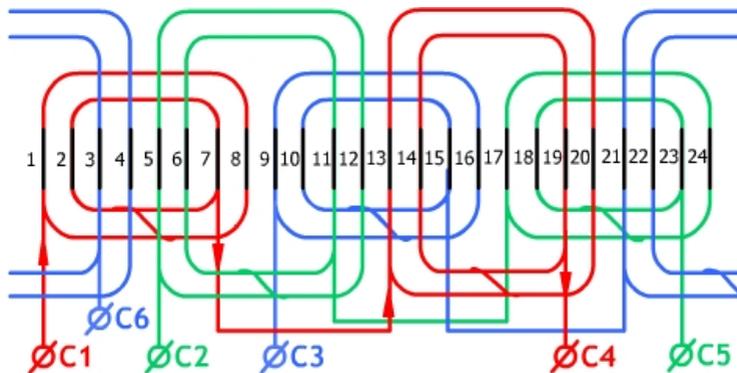
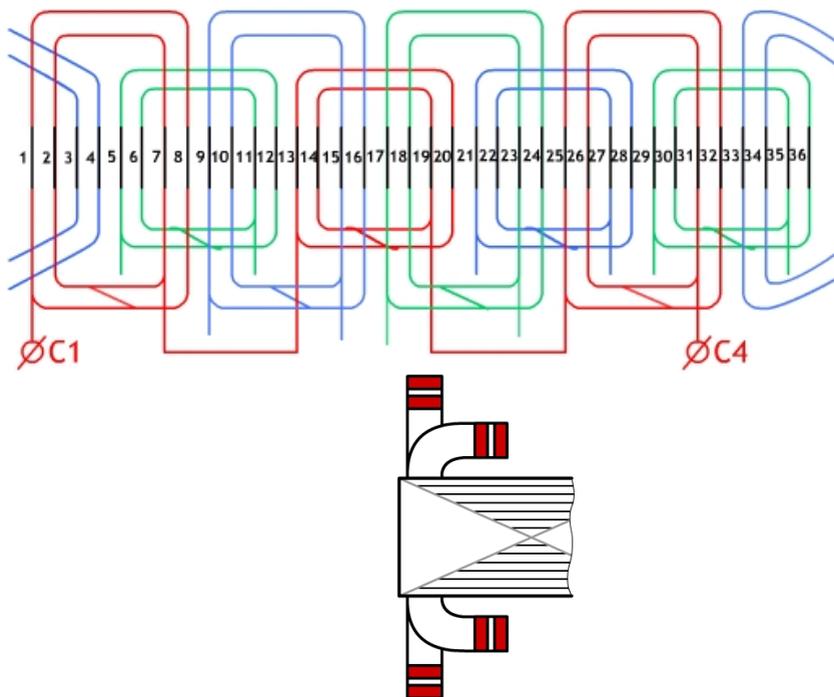


Рис. 20. Электрическая схема (circuit diagram) соединений ОПТ из концентрических катушек (concentric coils),  $a = 1$

Чтобы избежать перекрещивания (crossing), лобовые части (frontal part) больших и малых катушек выполняют в разных плоскостях – двухплоскостная (double plane) обмотка (выполняется при условии, что  $p$  – четное) (even number).

В случае, когда  $p$  – нечетное (odd), схема может быть составлена, если одна катушечная группа будет состоять из катушек с одной длинной и одной короткой сторонами. Данная катушечная группа называется «кривой» (curve). Рассмотрим пример построения однослойной (single-layer) концентрической обмотки с «кривой» катушечной группой (рис. 21).



Расположение лобовой части ОПТ

Рис. 21. Электрическая схема (circuit diagram) соединений однослойной концентрической обмотки (concentric winding) с «кривой» катушечной группой

Исходные данные (initial data):  $z = 36$ ,  $m = 3$ ,  $2p = 6$  ( $p = 3$  нечетное) (odd).

*Основные параметры обмотки (winding)*

1. Число катушек в катушечной группе или число пазов (slot) на

полюс и фазу:  $q = \frac{z}{2pm} = \frac{36}{6 \cdot 3} = 2$ .

2. Электрический угол между соседними пазами (neighbour slot):

$$\alpha = \frac{360p}{z} = \frac{360 \cdot 3}{36} = 30^\circ \text{ эл.}$$

3. Полюсное деление:  $\tau = \frac{z}{2p} = 6$ .

*Задание для самостоятельной работы:* изобразить «кривую» катушечную группу фазы А – вторую по счету от начала обмотки произвольно.

### ***Шаблонная (pattern) однослойная обмотка (single-layer winding)***

В данной обмотке (winding) все катушки (coil) имеют одинаковые размеры и изготавливаются по шаблону. Конструкция обмотки несколько упрощает технологию изготовления катушек, но затрудняет формовку (shaping) и распределение лобовых частей (обмотка может быть выполнена и вразвалку (wobbled), что уменьшает число разных катушек).

Исходные данные (starting data):  $z = 24$ ,  $m = 3$ ,  $2p = 4$ .

Определить основные параметры однослойной концентрической обмотки (single-layer concentric winding) и построить ее электрическую схему (circuit diagram) (рис. 22).

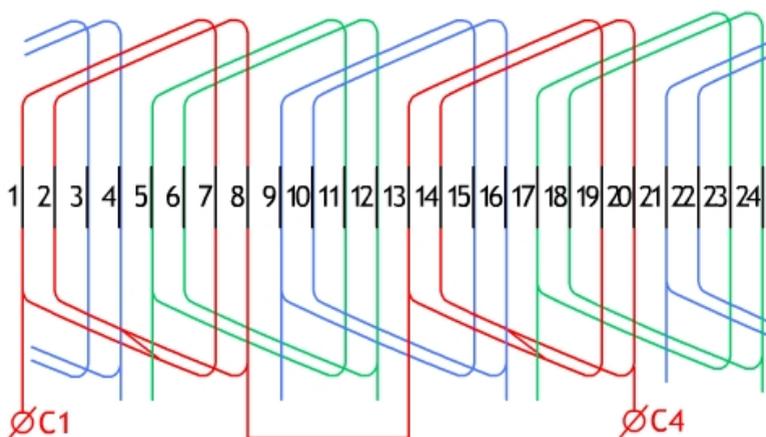


Рис. 22. Электрическая схема (circuit diagram) соединений шаблонной однослойной обмотки (pattern single-layer winding),  $a = 1$

### *Решение (solution)*

1. Число катушек в катушечной группе (coil group) или число пазов (slot) на полюс (pole) и фазу (phase):  $q = \frac{z}{2pt} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$ .

2. Электрический угол (electrical angle) между соседними пазами

$$\alpha = \frac{360p}{z} = \frac{360 \cdot 2}{24} = 30^\circ \text{ эл.}$$

3. Полюсное деление (pole division):  $\tau = \frac{z}{2p} = 6$ .

### *Недостатки однослойных обмоток (single-layer winding)*

1. Повышенный расход меди (copper) из-за больших вылетов (overhang) лобовых частей (frontal part).

2. Невозможность укорочения шага (short pitch) и, как следствие, ухудшение формы поля в воздушном зазоре (air-length single-layer winding).

### ***Трехфазная (three-phase winding) трехплоскостная обмотка (обмотка вразвалку) (wobbled winding)***

Применяется при  $q$  – четном (even). Средний шаг этой обмотки (winding pitch mean) меньше, чем двухплоскостной (two-string winding), поэтому длина лобовых частей (frontal part) меньше. Применяется в зарубежных двигателях и генераторах при  $2p = 2$  (рис. 23).

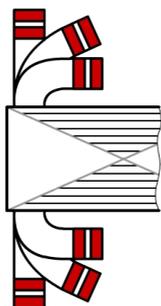
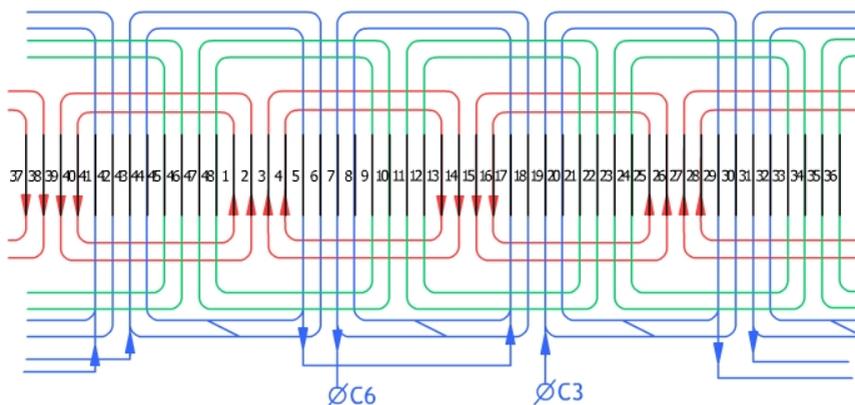
Исходные данные (starting data):  $z = 48$ ,  $m = 3$ ,  $2p = 4$ . Основные параметры обмотки следующие.

1. Число катушек (winding) в катушечной группе (coil group) или число пазов (slot) на полюс и фазу  $q = \frac{z}{2pt} = \frac{48}{4 \cdot 8} = 4$  – четное число.

2. Электрический угол (electrical angle) между соседними пазами

$$\alpha = \frac{360p}{z} = \frac{360 \cdot 2}{48} = 15^\circ \text{ эл.}$$

3. Полюсное деление (pole division)  $\tau = \frac{z}{2p} = 12$ ; позволяет избежать «кривой» (curve) группы, однако сопротивление фаз (phase resistance) будет различным.



Расположение лобовой части ОПТ

Рис. 23. Электрическая схема (circuit diagram) соединений однослойной обмотки «вразвалку» (wobbled winding), или трехплоскостной

### ***Двухслойная обмотка (double-layer winding) МПТ (alternating current machine)***

*Преимущества двухслойных обмоток (double-layer winding)*

1. Укорочение шага на любое число зубцовых делений (teeth deviation).
2. Возможность создания большого числа совершенно равноценных (equivalent) параллельных ветвей (branches).
3. Простота изготовления с применением шаблонов (pattern).

### *Недостатки двухслойных обмоток (double-layer winding)*

1. Трудность укладки последних сторон катушек.
2. Невозможность выполнить статор разъемным (joint stator).
3. При повреждении нижней стороны катушки необходим подъем целого шага обмотки.

При проектировании ОПТ (alternating current winding) для МПТ (alternating current machine) применяют следующие условные виды:

- 1) развернутая электрическая схема (circuit diagram) ОПТ или статор (ротор), схема электрических соединений (electrical connection);
- 2) схема соединения (connection diagram) катушечных групп;
- 3) торцевая схема (facing diagram).

### *Основные положения*

1. Двухслойная (double-layer winding) ОПТ выполняется из многовитковых катушек (multiturned coil).
2. Двухслойная ОПТ состоит из катушечных групп (фазных зон), расположенных на поверхности якоря (статора) на расстоянии  $180^\circ$  эл.
3. Каждая катушечная группа (фазная зона) состоит из  $q$  катушек, соединенных строго последовательно (in series).
4. Число катушечных групп в каждой фазе  $2p$ . Эти группы могут соединяться последовательно, параллельно или смешанно (series-parallel connection). При этом  $\alpha_{\max} = 2p$ .

### *Обмотка трехфазная двухслойная петлевая (lap winding) с диаметральной шагом и целым $q$*

Исходные данные (starting data):  $y = \tau$ ,  $m = 3$ ,  $2p = 4$ ,  $z = 36$ .

Определим основные параметры двухслойной петлевой (double-layer lap winding) ОПТ.

1. Число катушек в катушечной группе или число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2pm} = 3.$$

2. Электрический угол (angle) между соседними пазами:

$$\alpha = \frac{360p}{z} = 20^\circ \text{ эл.}$$

3. Полусное деление:

$$y = \tau = \frac{z}{2p} = 9.$$

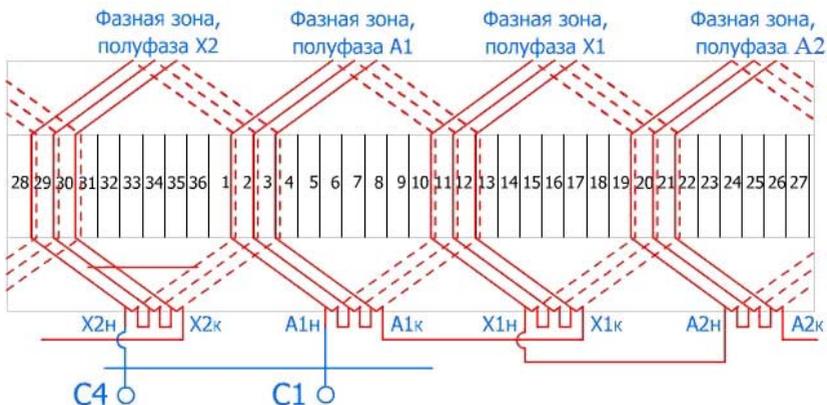


Рис. 24. Электрическая схема (circuit diagram) фазы А двухслойной трехфазной петлевой (lap winding) обмотки  $y = \tau$ ,  $q = 3$ ,  $a = 1$

На рис. 24 показана электрическая схема (circuit diagram) фазы трехфазной (three-phase) двухслойной обмотки, у которой катушечная группа (фазная зона, полуфаза (semi-phase) состоит из  $q = 3$  катушек, соединенных последовательно (in series).

Если первая катушечная группа начинается с первого паза, то все последующие полуфазы (semi-phase) смещены относительно предыдущей на  $180^\circ$  эл., т. е. на  $\frac{180}{\alpha} = 9$  пазов (X1 с 10 паза, A2 с 19 паза и X2 с 28 паза).

Количество параллельных ветвей (branches) в данной фазе может быть создано: 4, 2, 1. На рисунке показана фаза, у которой  $a = 1$ .

Фазы В и С имеют абсолютно одинаковое строение (construction). Только смещены друг относительно друга на  $120^\circ$  эл. (6 пазов): фаза В начинается с 7 паза (slot), а фаза С – с 13 паза (slot).

### *Трехфазная двухслойная волновая обмотка (wave winding) с целым $q$*

В основном двухслойные (double-layer) волновые обмотки (wave winding) применяют в фазном роторе асинхронных двигателей.

При  $P > 70 \dots 80$  кВт обмотки стержневые.

Исходные данные:  $z = 24$ ,  $m = 3$ ,  $2p = 4$ .

Определим основные параметры обмотки и построим ее электрическую схему (рис. 25).

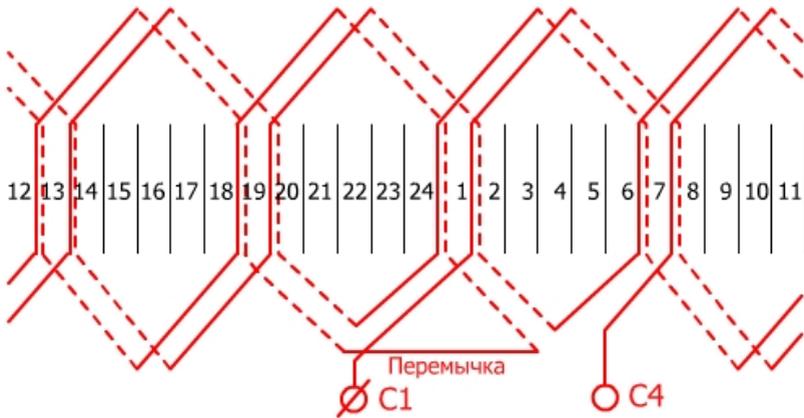


Рис. 25. Ротор. Электрическая схема (electrical diagram) соединений

#### *Решение*

1. Число катушек в катушечной группе или число пазов (slot numbers) на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2.$$

2. Электрический угол между соседними пазами:

$$\alpha = \frac{360p}{z} = \frac{360 \cdot 2}{24} = 30^\circ \text{ эл.}$$

3. Полюсное деление:  $\tau = \frac{z}{2p} = 6.$

После первого обхода шаг можно искусственно укоротить или удлинить на единицу. Чаше укорачивают (экономится медь

и нет перекрещивания) (crossing). Предположим, что при проектировании волновой обмотки (wave winding) необходимым условием является укорочение шага катушки (coil step):

$$y = 5, \dots, \beta = \frac{5}{6}.$$

В этом случае целесообразным является изображение торцевой схемы (facing diagram) ОПТ (рис. 26).

12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Номер пазы	
																									Направление тока вверх
○	•	•	×	×	○	○	•	•	×	×	○	○	•	•	×	×	○	○	•	•	×	×	○		
•	•	×	×	○	○	•	•	×	×	○	○	•	•	×	×	○	○	•	•	×	×	○		Направление тока вниз	

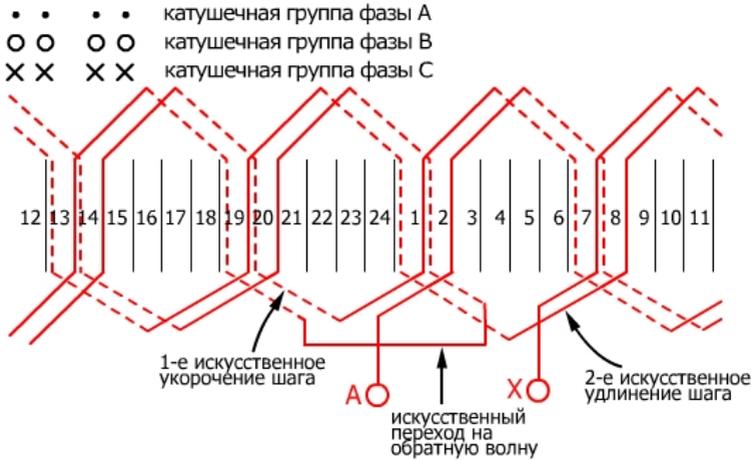


Рис. 26. Электрическая схема (electrical diagram) фазы А двухслойной обмотки переменного тока (alternating current) с  $q = \text{ц.ч.}$  и  $y < t$

**Трехфазные двухслойные (two-layer) шестизонные (six-zone winding) обмотки с дробным (fractional number) числом пазов на полюс или фазу**

При небольшом  $q$  ( $q = 1, 2, 3$ ) в мощных (power) синхронных генераторах в ОПТ индуцируются зубцовые гармоники (teeth harmonics). Основными мерами борьбы с зубцовыми гармониками

ками являются скос пазов (slot chamfer) и дробные  $q$  (fractional) – число пазов на полюс и фазу.

При дробном  $q$  элементы обмотки, принадлежащие данной фазе, находятся под разными полюсами в неодинаковых условиях.

Обмотки с дробным  $q$  имеют в фазных зонах число пазов, отличающееся на единицу.

При этом группы катушек (фазные зоны) каждой фазы с отличающимся на единицу числом пазов должны быть распределены симметрично по окружности (along circumference) машины.

#### *Необходимые условия выполнения обмотки*

1. Амплитудные (amplitude) (действующие) значения ЭДС (electromotive force) обмоток одинаковые:

$$|\dot{E}_{A\Phi}| = |\dot{E}_{B\Phi}| = |\dot{E}_{C\Phi}|.$$

2. Угол между фазными ЭДС равен:

$$\alpha = \frac{2\pi}{m} = \text{const}.$$

Для построения электрической схемы (electrical diagram) ОПТ с дробным  $q$  (рис. 27) необходимо составить числовой ряд (number series), состоящий из цифр  $a, b, c$ :

$$q = a + \frac{b}{c} = \frac{ac + b}{c}.$$

Правило составления числового ряда:

$a, b, c$  – целые (even) числа;

$b/c$  – правильная дробь (proper fraction);

$c$  – делитель числа (number divisor) пар полюсов  $p$ ;

$c$  не равно  $k3$  (не кратное 3) (multiple three);

$Z/2m$  – целое (integer) число.

При этом если  $t$  – делитель  $Z$  и  $p$ , то обмотка позволяет образовать  $t$  параллельных ветвей (branch).

Если  $Z$  – четное (even) и  $t > 1$ , то обмотка позволяет выполнить  $2t$  параллельных ветвей.

### Пример

Построить электрическую схему (electrical diagram) соединений петлевой обмотки (lap winding) с дробным  $q$  (fractional number) и следующими параметрами:  $z = 30$ ,  $2p = 8$ ,  $m = 3$ .

### Построение обмотки

Наибольший общий делитель (divisor)  $Z$  и  $p$   $t = 2$ . Число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2pt} = 1\frac{1}{4} = 1 + \frac{1}{4} (a = 1, b = 1, c = 4).$$

Электрический угол (electrical angle) между соседними пазами:

$$\alpha = \frac{360^\circ p}{z} = \frac{360^\circ p}{2ptq} = \frac{180^\circ}{mq} = \frac{60^\circ}{m} = \frac{C60^\circ}{ac + b};$$

$$\alpha = \frac{60^\circ}{1\frac{1}{4}} = 48^\circ \text{ эл.}$$

Электрический угол между соседними векторами звезды (star) пазовых (slot) ЭДС:

$$\alpha = \frac{t360^\circ}{z} = \frac{2 \cdot 360^\circ}{30} = 24^\circ \text{ эл.}$$

Шаг обмотки (winding pitch)  $y < \tau$ :

$$\tau = \frac{z}{2p} = \frac{30}{8} = 3,75, y = 3.$$

Укорочение шага (shorten pitch) обмотки:  $\beta = 0,8$ .

### Принцип составления числового ряда (number series)

Из каждых  $c$  ( $c = 4$ ) катушечных групп  $b$  ( $b = 1$ ) групп имеют по  $a + 1$  (2) катушек, а  $(c - b)$  (3) групп имеют по  $a$  (1) катушек. То есть числовой ряд имеет вид: 2111.

Составим таблицу распределения катушек в катушечных группах ОПТ.

Волновая обмотка (wave winding) с дробным  $q$  строится на основе числового ряда, который составляется по тому же правилу.

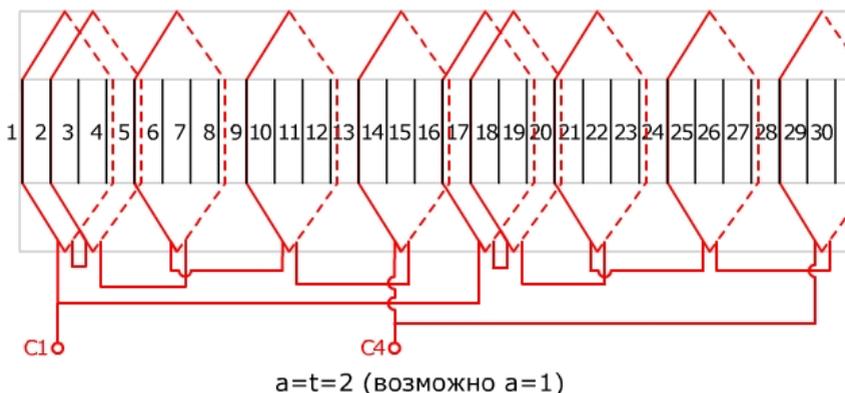


Рис. 27. Электрическая схема соединений фазы А ОПТ с дробным  $q$

### *Двухслойные (two-layer) обмотки статоров МПТ для механизированной укладки*

Технологические схемы (technology diagram) работы обмоточных станков (winding machine) наиболее просты для укладки однослойных обмоток статоров МПТ, так как в данном случае не требуется подъем (lifting) вторых сторон катушек при их намотке (turn).

Однослойные обмотки применимы только для МПТ мощностью 12–15 кВт.

При  $p > 15$  кВт применяют двухслойную обмотку, которая позволяет укорачивать шаг, что улучшает характеристики.

Сегодня разработаны новые симметричные схемы (scheme) обмоток статоров, которые укладываются в пазы при механизированной намотке без подъема (lifting) шага, как однослойные, и которые позволяют укорачивать шаг, как двухслойные.

Наиболее распространёнными типами таких обмоток являются:

- 1) одно-двухслойные обмотки (single-double winding);
- 2) двухслойные концентрические (concentric winding).

### *Одно-двухслойная концентрическая обмотка*

Применяется для МПТ  $P = 15 \dots 100$  кВт и  $q \leq 6$ . Одно-двух-слойная концентрическая обмотка представляет собой сочетание однослойной и двухслойной, шаг катушек которой имеет определенное значение:  $y \approx 0,8\tau$ ,  $\beta = (0,83 \dots 0,89)$ .

При  $2p = 2$  и  $q > 6$ ,  $y \approx \frac{2}{3}\tau$ .

### *Структура одно-двухслойной концентрической обмотки*

1. Каждая фаза состоит из  $2p$  катушечных групп (число малых и больших катушек в каждой фазе одинаковое, что обеспечивает симметричность ОПТ (AC winding) и одинаковые сопротивления (phase resistance) всех фаз).

2. Каждая катушечная группа состоит из одной большой и  $(q - 2)$  малых катушек (small coil). Большая катушка занимает весь паз (slot), а малая – только половину (half of) паза.

Построение возможно при  $q > 2$ . При  $q \leq 2$  обмотка превращается в одинарную. Обмотка выполняется концентрическими катушками без подъема шага. Максимальный шаг имеет большая катушка:

$$y_8 = 3q - 1.$$

Шаг малых катушек, расположенных концентрически внутри большой, определяется числами ряда:  $y_{m1}; y_{m2} \dots y_{m(q-2)} = (y_8 - 2); (y_8 - 4) \dots [(y_8 - 2)(q - 2)]$ .

Практический пример:  $z = 48$ ,  $2p = 4$ ,  $m = 3$ .

### *Основные параметры одно-двухслойной концентрической обмотки*

1. Число катушек в катушечной группе (coil group) или число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2pt} = 4.$$

2. Полюсное деление (pole division):

$$\tau = \frac{z}{2p} = 12.$$

3. Шаг большой катушки (big coil):

$$y_8 = 3q - 1 = 11.$$

4. Число малых катушек (small coil):

$$q - 2 = 2.$$

5. Шаг малых катушек (small coil step):

$$y_{m1} = y_{m1} - 2 = 9;$$

$$y_{m2} = y_{m1} - 2 = 7.$$

6. Электрический угол (angle) между соседними пазами:

$$\alpha = \frac{360p}{z} = 15^\circ \text{ эл.}$$

180° эл. — занимает 12 пазов;

120° эл. — занимает 8 пазов;

240° эл. — занимает 16 пазов.

На рис. 28 приведены две торцевые (facing diagram) схемы ОПТ: торцевая схема 1 — обычной (классической) двухслойной обмотки и торцевая схема 2 — одно-двухслойной концентрической.

Сравнение двух торцевых схем позволяет понять принцип получения одно-двухслойной ОПТ для механизированной укладки (mechanized packing).

Укладка (packing) одно-двухслойной ОПТ производится в несколько операций-переходов. Число катушечных групп, укладываемых за один переход, ограничивается необходимостью установки изоляционных прокладок (insulating liner) в пазах и лобовых частях (frontal part).

На рис. 29 приведена схема расположения катушечных групп одной фазы одно-двухслойной концентрической ОПТ ( $\delta$  — большая катушка,  $M$  — малая катушка). Соединение катушечных групп в фазу зависит от необходимого числа параллельных ветвей  $a$  (1, 2, 4).



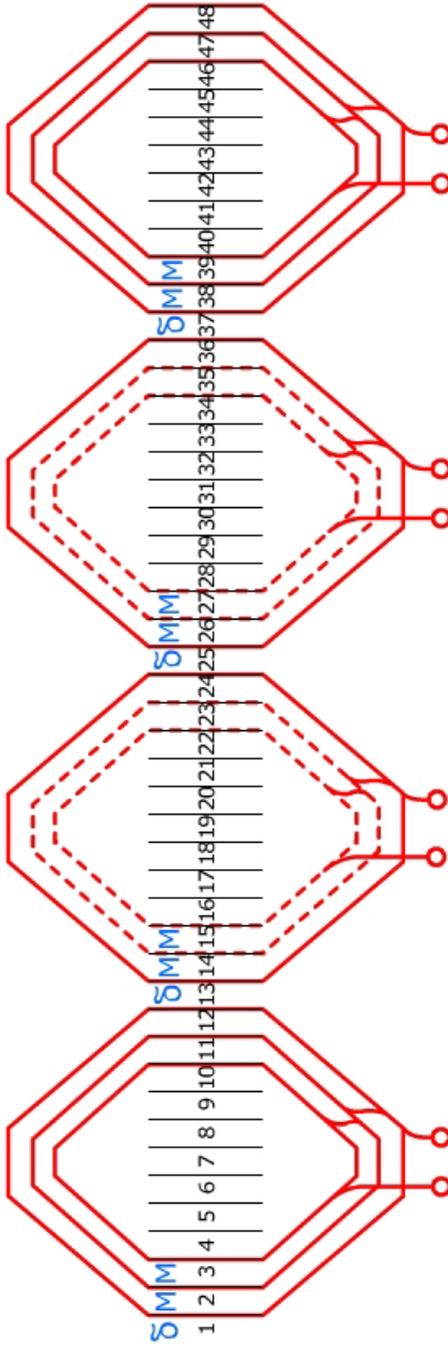


Рис. 29. Электрическая схема расположения катушечных групп фазы одно-двухслойной концентрической ОПТ

## Раздел II. ТЕСТЫ

### Chapter II. TESTS

#### Test 1. Chose the correct variant

1. The basic units of a squirrel-cage motor is

- a) an engine bed, a stator, an AC winding, a rotor, a shaft and brackets;
- b) a stator magnetic circuit with AC winding and a rotor magnetic circuit with squirrel-cage coil;
- c) a stator, a rotor, a bed with a bearing sub-assemblies;
- d) a shaft, a rotor, a bed, a stator, an AC winding, a squirrel-cage winding;
- e) a stator, a rotor, brackets, bracket covers.

2. A asynchronous machine stator is:

- a) a stator magnetic circuit on which the basic magnetic flux becomes isolated;
- b) a basic motor unit which is motionless in space and consists of laminated magnet and AC winding;
- c) a laminated magnet with slots on an inner surface pressured in bed;
- d) a bed with a laminated magnet on an inner surface in slots of which there is a AC winding;
- e) a laminated magnet with an AC winding.

3 A stator magnetic circuit is laminated from an electrical - sheet steel plates for:

- a) providing assemblage and design conveniences of technology;
- b) reducing of power losses on a magnetic reversal (hysteresis);
- c) reducing of power losses on circuital currents;
- d) reducing of power losses in a steel (on circuital currents and magnetic hysteresis);
- e) simple changing of a stator axial length.

4. For a stator core producing is used a:

- a) hot-rolled isotropic electrical - sheet steel;
- b) Roll-fed cold-rolled anisotropic electrical - sheet steel;

- c) Roll-fed cold-rolled isotropic electrical - sheet steel;
- d) an electrical - sheet steel with a high magnetic induction of saturation from strips or moulding;
- e) any of the listed electrical - sheet steel.

5. An electrical - sheet steel for a magnetic circuit stator contains a silicon for:

- a) a durability increasing of a thin steel sheet;
- b) a durability increasing of a magnetic circuit;
- c) reducing of power losses on circuital currents;
- d) reducing of power losses on magnetic hysteresis);
- e) increasing a magnetic permeability of an electrical - sheet steel.

6. The following techniques are used for improving basic characteristics of a magnetic circuit:

- a) to reduce a thickness of a roll-fed electrical - sheet steel;
- b) to isolate sheet sides with an oxide layer and a varnish;
- c) to add a silicon to the composition of an electrical - sheet steel;
- d) to apply an isotropic electrical - sheet steel;
- e) to apply an anisotropic electrical - sheet steel.

7. Asynchronous machine beds are made as:

- a) casted from an aluminium;
- b) pressed from a plastic;
- c) a unit from an aluminium pipe with an extrusion technology;
- d) a unit from a cast iron;
- e) a unit from a rolled iron.

## **Test 2 . Choose the correct variant**

1. The basic units of a synchronous machine design are:

- a) a stator, a rotor and a feed system;
- b) a stator, a rotor, a bed with a bearing sub-assemblies;
- c) a stator magnetic circuit with an AC winding, a rotor magnetic circuit with a magnetized field winding, a brush assembly, a bed with brackets;
- d) a salient-pole or implicit-pole rotor, a stator;
- e) a bed with brackets, a rotor with a shaft, a feed system.

2. The main advantage of a synchronous machine is:

- a) a high reloading ability;
- b) a constant rotation speed that is independent of a shaft load or a power;
- c) a high starting torque;
- d) a possibility of work with  $\cos \varphi = 1,0$  and even with an advancing  $\varphi$  ( $\varphi < 0$ ).
- e) a simplicity of connection for a parallel operation with a network.

3. The peculiar feature of a synchronous machine is that:

- a) a synchronous machine assumes a double-fed even if the constant magnets are applied on a rotor;
- b) an electromotive force is not induced in a rotor winding;
- c) an induced e.m.f. frequency in a stator winding is proportional to a rotor rotation speed;
- d) a load-independent synchronous machine rotor rotates with a constant speed in an engine and generator mode;
- e) an armature is connected to a polyphase alternating current network but an inductor do it to a direct current source of energy.

4. A synchronous machine armature is:

- a) a stator consisting of a magnetic circuit and an AC winding;
- b) a device consisting of a laminated magnet where there is an AC winding in the slots;
- c) a laminated magnet with a polyphase AC winding where there is a power transformation;
- d) a rotor with a direct current winding;
- e) a rotor consisting of a magnetic circuit, a polyphase alternating current winding powered through contact rings.

5. A synchronous machine inductor is:

- a) a stator consisting of electromagnets or constant magnets that create an exciting magnetic flux;
- b) a rotor consisting of a magnetic circuit and windings powered with a direct current source through contact rings and brushes;
- c) a magnetic circuit where there is an AC winding in the slots;
- d) a device creating an exciting magnetic field in an air-gaps synchronous machine length;
- e) a device rotating in a machine space with a synchronous speed.

### Test 3. Choose the correct variant

1. The basic unit of a synchronous machine salient-pole rotor is:

- a) a rotor skeleton (a cage, a field spider);
- b) a field coil;
- c) a starting or a damper squirrel-cage winding;
- d) a salient-pole or implicit-pole rotor, a stator;
- e) a distributed field coil.

2. A salient-pole rotor is used in the following synchronous machines:

- a) high-speed;
- b) low-speed;
- c) with magnetization;
- d) with electromagnetic excitation;
- e) any machines.

3. An implicit-pole rotor is used in the following synchronous machines:

- a) high-speed;
- b) low-speed;
- c) with magnetization;
- d) with electromagnetic excitation;
- e) any machines.

4. The basic unit of a synchronous machine implicit-pole rotor is:

- a) a rotor skeleton laminated from an electrical-sheet steel;
- b) a rotor skeleton in a forging shape;
- c) a concentrated field coil;
- d) a distributed field coil;
- e) a shaft with contact rings that is made of a high-alloy steel.

5. A starting or a damper winding of a synchronous machine is used to provide:

- a) a synchronous engine starting. It is mounted in stator slots and is made of a rectangular section copper wire;
- b) a synchronous engine starting. It is mounted in slots of the rotor pole pieces and is made of a conducting material of a raised resistance (brass, bronze, etc.);

- c) a synchronous engine starting. It is mounted in slots of the rotor pole pieces and is made of a conducting material of a high-electric conductivity (tough-pitch copper);
- d) a fluctuation rotor elimination while working. It is made of a conducting material of high-electric conductivity (a tough-pitch copper);
- e) a fluctuation rotor elimination while working. It is made of a conducting material of a raised resistance (brass, bronze, etc.).

#### **Test 4. Choose the correct variant**

1. An elementary part of an AC winding is:

- a) a section;
- b) a phase winding;
- c) a coil group;
- d) a multiturned coil;
- e) one turn of a wire.

2. For getting a rotating circular magnetic field a number of elementary windings (phases) in AC winding must be

- a)  $m = 1$ ;
- b)  $m = 2$ ;
- c)  $m = 3$ ;
- d)  $m = 6$ ;
- e)  $m \geq 2$ .

3. For getting a rotating circular magnetic field a magnetomotive force amplitudes of all phases (windings):

- a) are equal;
- b) are different;
- c) are optional;
- d) depend on a phases numbers;
- e) depend on a field speed.

4. For getting a rotating circular magnetic field the phase axes (windings) are displaced in a machine space on:

- a) on  $90^\circ$ ;
- b) on  $120^\circ$ ;
- c) on an angle of  $2\pi p/m$ ;

- d) on an angle of  $\pi/2$  electrical degrees;
- e) on  $360^\circ$  p/m electrical degrees.

5. For getting a rotating circular magnetic field a phase displacement of currents in phases of a three-phased machine are:

- a)  $90^\circ$ ;
- b)  $120^\circ$ ;
- c)  $2\pi/m$  electrical degrees;
- d)  $2\pi/m$ ;
- e)  $360^\circ p/m$ .

6. When flowing along a single-phase winding in a DC machine length a sinusoidal alternating current creates

- a) a rotating magnetic field;
- b) a rotating circular magnetic field;
- c) a rotating magnetic field in an ellipse form;
- d) a pulsing magnetic field in a machine space;
- e) a constant magnetic flux.

7. A pole pitch is:

- a) a stator surface (a rotor) to a pole of one polarity;
- b)  $\tau = \pi \cdot D_a / 2 \cdot p$ ;
- c) an arch length of an inner stator surface corresponding to a pole width of a magnetic field;
- d)  $\alpha = \frac{360^\circ \cdot 2p}{Z}$  ;
- e) 180 electrical degrees.

### Test 5. Choose the correct variant

1. Phase axes of a three-phase winding at  $2p = 4$  are displaced on:

- a)  $90^\circ$ ;
- b)  $180^\circ$ ;
- c)  $120^\circ$ ;
- d) 120 electrical degrees;
- e)  $60^\circ$ .

2. A phase winding zone is:

- a) an electric angle occupied with all coil phase groups;

- b) an electric angle occupied with one coil phase group;
- c) coils in the coil phase groups distributed on a stator surface in series;
- d) a whole phase winding;
- e) one coil of any phase.

3. A three-zone winding is:

- a) a winding where a phase zone is  $120^\circ$ ;
- b) a winding where a phase zone is  $120^\circ$  electrical degrees;
- c) a single-layer winding;
- d) a winding with coil group phases displaced in a space on  $180^\circ$ ;
- e) a winding with coil group phases displaced in a space on  $360^\circ$  electrical degrees.

4. A six-zone winding is:

- a) a winding with coil group phases displaced in a space on  $180^\circ$  electrical degrees;
- b) a winding with an electric angle of one coil group on  $60^\circ$  electrical degrees;
- c) a winding with coil group phases displaced in a space on  $60^\circ$  electrical degrees;
- d) a double-layer winding;
- e) a winding with the nearby semiphases.

5. A number of slots on a pole and a phase are always equal to  $q$ :

- a)  $q = 1$ ;
- b)  $Q \geq 1$ ;
- c)  $q = \frac{Z_{\text{эл}}}{2pm}$ ;
- d) a coil number in a coil group;
- e) depends on a winding type.

6. A maximum number of parallel branches in a two-layer winding is:

- a)  $= 1$ ;
- b)  $\geq 1$ ;
- c)  $= p$ ;
- d)  $= 2p$ ;
- e) depends on a machine capacity.

7. A maximum number of parallel branches in a single-layered winding  $a_{\max}$  is:

- a) = 1;
- b)  $\geq 1$ ;
- c) =  $p$ ;
- d) =  $2p$ ;
- e) depends on a machine capacity.

### Test 6. Choose the correct variant

1. A phase of a single-layer three-zone alternating current winding consists of:

- a) **2p**-coil-groups that connected in series, parallel or series-multiple for **a**-parallel branches forming;
- b) **p**-coils that connected strictly in series;
- c) **p**-coils that connected strictly parallel;
- d) **p**-coil-groups that connected in series, parallel or series-multiple for **a**-parallel branches forming;
- e) coils that connected with each other according to a winding electrical scheme.

2. A coil group of one phase consists of:

- a) coils that connected in a specified way;
- b) **q**-coils that connected strictly parallel;
- c) one coil;
- d) **q**-coils that connected strictly in series;
- e) **q**-coils that connected in any way.

3. A phase of a double-layer six-zone alternating current winding consists of:

- a) **2p**-coil-groups that connected in series, parallel or series-multiple for **a**-parallel branches forming;
- b) **p**-coils that connected strictly in series;
- c) **p**-coils that connected strictly parallel;
- d) **p**-coil-groups that connected in series, parallel or series-multiple for **a**-parallel branches forming;
- e) coils that connected with each other according to a winding electrical scheme.

<p>4. A distributive coefficient of a one-layer three-zone alternating current winding for a first field harmonic is:</p>	<p>5. A distributive coefficient of a two-layer six-zone alternating current winding for a first field harmonic is:</p>
<p>a) <math>k_{p1} = \sin \frac{\beta\pi}{2}</math> ;</p> <p>b) <math>k_{p1} = \frac{E_{q1}}{qE_{k1}}</math> ;</p> <p>c) <math>k_{p1} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}}</math> ;</p> <p>d) <math>k_{pv} = \frac{\sin \frac{v\pi}{2m}}{q \sin \frac{v\pi}{2mq}}</math> ;</p> <p>e) <math>k_{p1} = \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{q \sin \frac{\pi}{mq}}</math> .</p>	<p>a) <math>k_{p1} = \sin \frac{\beta\pi}{2}</math> ;</p> <p>b) <math>k_{p1} = \frac{E_{q1}}{qE_{k1}}</math> ;</p> <p>c) <math>k_{p1} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}}</math> ;</p> <p>d) <math>k_{pv} = \frac{\sin \frac{v\pi}{2m}}{q \sin \frac{v\pi}{2mq}}</math> ;</p> <p>e) <math>k_{p1} = \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{q \sin \frac{\pi}{mq}}</math> .</p>

**Test 7. Choose the correct variant**

1. The alternating current winding distribution on the stator (rotor) slots is applied for

- a) reducing a winding wire consumption;
- b) improving a magnetic field form in a machine air length;
- c) reducing a share of higher harmonics;
- d) reducing a value of a first magnetic field harmonic;
- e) reducing a yoke height of a stator (a rotor) magnetic circuit.

2. An alternating current winding step shorten is applied for

- a) reducing a winding wire consumption;
- b) improving a magnetic field form in a machine air length;
- c) reducing a share of higher harmonics;

- d) reducing a value of a first magnetic field harmonic;
- e) destructing one of a higher field harmonics.

3. A step shorting coefficient of an AC winding for a first field harmonic is:	4. A step shorting coefficient of an AC winding for the highest field harmonic is:
<ul style="list-style-type: none"> <li>a) <math>k_{y1} = \sin \frac{\beta\pi}{2}</math>;</li> <li>b) <math>k_{y1} = \frac{E_{q1}}{qE_{k1}}</math>;</li> <li>c) <math>k_{y1} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}}</math>;</li> <li>d) <math>k_{yv} = \frac{\sin \frac{v\pi}{2m}}{q \sin \frac{v\pi}{2mq}}</math>;</li> <li>e) <math>k_{y1} = \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{q \sin \frac{\pi}{mq}}</math>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) <math>k_{yv} = \sin \frac{\beta\pi}{2}</math>;</li> <li>b) <math>k_{yv} = \frac{E_{q1}}{qE_{k1}}</math>;</li> <li>c) <math>k_{yv} = \sin \frac{v\beta\pi}{2}</math>;</li> <li>d) <math>k_{yv} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}}</math>;</li> <li>e) <math>k_{yv} = \frac{\sin \frac{v\pi}{2m}}{q \sin \frac{v\pi}{2mq}}</math>.</li> </ul>

5. A slot chamfer in an alternating current machine is done for:

- a) a noise reducing;
- b) destructing the higher magnetic field harmonics;
- c) destructing a teeth magnetic field harmonics;
- d) a magnetic circuit assemblage technology improving;
- e) an alternating current winding active material increasing.

6. A slot chamfer of a magnetic circuit is done on:

- a) a chamfer value of a teeth harmonic degree;
- b) a teeth step value;
- c) a polar pitch value.
- d) an AC winding coil step value;
- e) 0.1 part of a rotor diameter.

### Test 8. Choose the correct variant

1. The basic assumptions at the mathematical equation derivations that characterize a magnetic field distribution in an alternating current machine slot:

- a) an air-length is uniform for salient-pole synchronous machines;
- b) a machine magnetic circuit is not saturated;
- c) a magnetic field is homogeneous;
- d) an alternating current winding is mounted in an air-length on a stator surface in the form of an infinite thin tape;
- e) an alternating current winding is located in a stator slots.

2. A coordinate quotation in a machine air-length is:

- a)  $\alpha = x$ ;
- b)  $\alpha = \frac{\pi x}{\tau}$ ;
- c)  $\alpha = \frac{2\pi x}{Z}$ ;
- d)  $\alpha = \frac{360^\circ p}{Z}$ ;
- e)  $\alpha = z$ .

3. A magnetomotive force of a coil group with a full step for a first magnetic field harmonic can be defined as

- a)  $F_{q1} = 2qF_{k1}k_{p1}$ ;
- b)  $F_{q1} = qF_{k1}k_{p1}k_{y1}$ ;
- c)  $F_{q1} = qF_{k1}k_{p1}$ ;
- d)  $F_{q1} = qF_{k\vartheta}k_{p\vartheta}$ ;
- e)  $F_{q1} = F_{k\vartheta} \cos\omega t$ .

4. The basic characteristics of a phase magnetomotive force for the  $g$  harmonic are:

- a) a DC machine creates a rotating magnetic field in a machine space;
- b) a DC machine creates a pulsing magnetic field in a machine space;
- c) a DC phase machine is directly proportional to winding coefficient and is inversely proportional to a harmonic order;
- d) a distribution and a shortening of a winding reduces considerably a share of higher harmonics and increases a share of a first harmonic;

e) a reduction of a first magnetic field harmonic at a distribution and a shortening of an alternating current winding.

5. For a DC resultant of a three-phase alternating current winding the following conclusions can be done

- a) direct harmonics in a direct wave and backward harmonics in a return wave become three times more;
- b) backward harmonics sums are equal to 0 in a DC machine magnetic field for direct harmonics;
- c) direct harmonics sums are equal to 0 in a DC machine magnetic field for direct harmonics;
- d) a basic harmonic  $\mathcal{Q} = 1$  is a straight line and rotates in a direction of a phase alternation;
- e) a three-phase DC machine winding under symmetrical load contains a three-fold harmonics.

## Контрольные вопросы для повторения

### Questions for revising students' knowledge

1. Write down an equation for defining slots' numbers on a pole and a  $q$ -phase.
2. Define an electric angle  $\alpha$  between neighbour slot of a stator (a rotor). Illustrate your answer with an equation.
3. How is a pole pitch defined if we know a number of slots on a  $Z$  stator and a number of poles ( $2p$ )? Write down an equation.
4. In what case is a three-phase one-layer concentric winding called as a biplanar winding? Illustrate your answer with an example .
5. When is there a necessity of a winding group "curve" in a three-phase one-layer concentric winding? Give an example.
6. What is the difference between a three-phase one-layer winding and a three-phase one-layer winding of concentric coils? Numerate advantages and disadvantages of them all.
7. In what conditions should be a three-phase three-planar winding made? Give an example.
8. Mention the basic properties of a three-phase two-layer lap winding with a diametric and shorten pitch and a full  $q$ . Illustrate your answer with a special example.
9. What are the basic differences of a three-phase two-layer wave winding with a full  $q$  and a three-phase two-layer winding with a full  $q$  ? Advantages and disadvantages of a three-phase two-layer wave winding.
10. Three-phase two-layer six-band windings with fractional  $q$ . A rule of drawing up of a numerical series, a construction, a definition of a number of parallel branches, advantages and disadvantages.
11. An assignment and embodiment of one- or two-layer concentric winding of an alternating current. Compare it with a two-layer winding using the provided butt schemes according to some definite example.

## Библиографический список

### List of reference books

1. Англо-русский электротехнический словарь. — М., 1980.
2. Бахарев, Н.П. Спецкурс электрических машин. Конспект лекций : учеб. пособие / Н.П. Бахарев. — Тольятти : ТГУ, 2007. — С. 142.
3. John Hindmarsh. Electrical machines and their applications / Hindmarsh John. — London, 1987.
4. James Cumming. Architecture and building construction / Cumming James. — Longman, 2004.
5. Русско-английский политехнический словарь / под ред. Б.В. Кузнецовой. — М. : Русский язык, 1980.
6. Шишкина, Н.А. Хрестоматия по техническому переводу для студентов электротехнического факультета / Н.А. Шишкина, Н.П. Бахарев. — Тольятти : ТГУ, 2003.

*Русско-английский словарь электротехнических терминов*  
*Russian-English electrotechnical terms*

А	
активные стороны катушки	active coil sides
активное падение напряжения	resistance drop
амплитуда тока	current amplitude
асинхронный двигатель	induction motor
Б	
бегущее магнитное поле	traveling field
беличья клетка	squirrel-cage
болт	bolt
бочка	cage
В	
вал	shaft
вектор ЭДС	electromotive force vector
векторная диаграмма	vector diagram
вентилятор	fan
вентиляционные лопатки	ventilation blading
вихревое поле	circuital field
внутренний диаметр	inside diameter
возбуждение	magnetization, excitation
воздушный зазор	air-gap length
вращающееся магнитное поле	rotating magnetic field
время пуска	starting time
высоколегированная сталь	high-alloy steel
Г	
гармоника магнитного поля	magnetic field harmonic
генератор	generator
гидрогенератор	hydraulic-turbine generator
главный полюс	main pole
Д	
двигатель	motor
двухполюсный индуктор	bipolar field
делитель числа	divisor number
диаметральный шаг	diameter pitch
диаграмма ЭДС	electromotive force diagram
диэлектромагнитная сила	force of conductor

длина проводника дробное число	conductor slot length fractional number
З	
зазор заливка зубцовая гармоника	length sealing tooth harmonic
И	
изоляция прокладка индуктивное падение напряжения индуктор индукционная гармоника индукция магнитного поля индукция инструмент электротехнический	insulating pad inductive drop inductor induce harmonic magnetic field induction induction electro-driven tool
К	
канавка катушечная группа катушка с длинной стороной катушка с короткой стороной катушка малая катушка многовитковая катушка (распределенная) коллектор конструктивная схема конструкция контактное кольцо коробка выводов короткозамкнутая обмотка короткозамкнутое кольцо короткозамкнутый корпус коэффициент распределения крепление крестовина ротора кривая кривая индукции кривая поля круговое вращающееся (магнитное) поле	slot coil group length side coil short side coil small coil multi-turn coil winding commutator circuit structurally construction slip-ring terminal box squirrel-cage rotor winding squirrel-cage ring squirrel-cage body propagation factor fasten field spider curve induction curve field curve circular field

Л	
ласточкин хвост	dovetail
лист ротора/статора	rotor/stator sheet
лобовая часть	frontal part
М	
магнитная индукция	magnetic induction
магнитная ось	magnetic axes
магнитная проницаемость	magnetic permeability
магнитное поле	magnetic field
магнитный поток рассеяния	magnetic flux
магнитопровод	magnetic circuit
магнитопровод шихтовой	Laminated magnet
магнитоэлектрическое возбужде- ние	magnetization
машина постоянного тока	(direct) constant-current machine
машина малой/средней/большой мощности	Low-/average-/high power machine
механизированная намотка	mechanized reeling
механизированная укладка	mechanized packing
мгновенное значение ЭДС	momentary electromotive force value
многофазный момент	polyphase torque
монтаж	wiring
мощность возбуждения	power field
Н	
наведенное (индуцированное)	conductor field
магнитное поле	
нагрузка	load
наконечник полюса	pole arc
неподвижный якорь	stationary armature
несинусоидальное распределение поля	non-sinusoidal field distribution
неявнополюсной	implicit-pole (non-salient)
нечетная гармоника	odd harmonic
номинальный режим	design condition
О	
обмотка волновая	wave winding
обмотка вразвалку	wobbled winding
обмотка двухполюсная	two-string winding
обмотка двухслойная	double-layer (two-layer) winding
обмотка с диагональным шагом	diagonal pitch winding
обмотка концентрическая	concentric winding

обмотка однослойная	single-layer (one-layer) winding
обмотки от высших гармоник поля	higher harmonics windings
обмотка петлевая	Lap winding
обмотка переменного тока	current variable winding
обмотка сосредоточенная	(concentrated winding) coil
обмотка трехзонная (шестизонная)	three-zone (six-zone) winding
обмоточный коэффициент	winding coefficient
обмоточный станок	winding machine
обмотка возбуждения	field coil
обмотка статора (распределенная)	stator distributed winding
обмотка стержневая	armature coil (winding)
окружающая среда	environment
окружность	circumference
оксидирование	oxidation
опережение	advance
оправка	holder
опрессовка	moulding
остаточный магнетизм	residual magnetism
остов ротора	rotor skeleton
отверстие	opening
<b>П</b>	
падение напряжения	voltage drop
паз	slot
паразитные зубцовые гармоники	parasitic tooth harmonics
параллельное соединение	parallel connection
параллельно-последовательное соединение	parallel-series connection
параметры внешних гармоник	external harmonic parameters
полюсное деление машин	pole pitch machine
полюсной шаг	pole pitch
последовательное соединение	series connection
перекрещивание	crossing
переменное напряжение	alternating voltage
переменный ток	alternating current
печь с автоматическим режимом	automatic operation furnace
плоскость	plane
поверхность внутренняя	internal surface
подвод тока	brushes
подшипниковые узлы	bearing sub-assembly

<p>подшипниковые щиты  подъем  полное возбуждение  полюс  положительное направление  полюсной наконечник  полюсное деление  полярность  полюй профиль  поперечная ось  поперечное поле  постоянное напряжение  постоянный магнит  постоянный ток  правильная дробь  проводник  продольная ось  продольное (магнитное) поле  проектирование ОПТ  промежуточное значение укорочения прочности  пульсирующее магнитное поле  пусковой реостат  пусковая короткозамкнутая обмотка</p>	<p>bracket  lifting  full field  pole  positive direction  pole piece  pole pitch  polarity  quill profile  cross axis  cross field  direct voltage  permanent magnet  direct current  proper fraction  conductor  Longitudinal axis  axial field  alternating current winding project  auxiliary value shortening  strength  pulsating magnetic field  starter rheostat  starting short-circuit winding</p>
<b>Р</b>	
<p>распределенная обмотка  распределенная катушечная группа  режим работы  реостат  ротор  ротор, вращающийся в корпусе  ротор короткозамкнутый  ротор фазовый</p>	<p>distributed winding  coil group distribution  duty  rheostat  rotor  casing rotor  short-circuited rotor (cage rotor)  phase-wound rotor</p>
<b>С</b>	
<p>сердечник  сердечник полюса  симметричность  симметрическая схема  синусоидальный закон</p>	<p>core  pole core  symmetry  symmetrical circuit  sinusoidal law</p>

<p> синусоидальное распределение  синусоидальный ток  синусоидальная форма  синхронная машина  синхронный генератор  скоба  скорость вращения  скос пазов  сложение ЭДС  смешанное соединение  смещенный по фазе  соединение болтовое  соединение звездой  соединение треугольником  сопротивление обмотки ротора  сопротивление фаз  способ охлаждения  средний шаг обмотки  стальная планка  станина двигателя  статор  статор разъемный </p>	<p> sinusoidal distribution  sinusoidal current  sinusoidal waveform  synchronous machine  synchronous generator  clump  rotating speed  slot chamber  electromotive force composition  series-parallel  out of phase  bolted connection  star connection  delta connection  rotor resistance  phase resistance  cooling method  middle pitch winding  steel strep  engine bed  stator  joint stator </p>
Т	
<p> термическая обработка  технологическая схема  ток возбуждения  торцевая схема  трехзонная обмотка  трехфазная обмотка  труба  трубка воздухоохладителя  турбогенератор быстроходный </p>	<p> heat treatment  technological diagram  exciting current  facing diagram  three-zone winding  three-phase winding  tube  air-cooler tube  speed turbo generator </p>
У	
<p> узел  угол катушечной группы  угол фазовой зоны  укороченный шаг  упрочненная обмотка  успокоительная обмотка </p>	<p> unit, assembly  coil group angle  phase zone angle  short pitch  short-step winding  damper winding </p>

Ф	
фаза	phase
фазная зона	phase zone
фазный ротор	phase rotor
формовка	shaping
Х	
хорда дуги	span
Ц	
целое число	integer
центрирующая оправка	mondrel centering
цилиндр с продольным ребром	ribbed cylinder
цилиндрическая катушка	cylindrical coil (bobbin)
Ч	
частота	frequency
частота ЭДС	electromotive force frequency
число пазов на полюс (фазу)	slot number to pole (phase)
число пар полюсов	pair pole number
число катушек	coil number
число натурального ряда	natural number
числовой ряд	number series
число фаз	phase number
Ш	
шаблон	pattern
шаг обмотки	winding pitch
шайба	washer
шайба нажимная	V-ring washer
шестифазная обмотка	six-phase winding
шестизонная обмотка	six-zone winding
шкала расположения точек укорочения шагов катушки	points coil pitch arrangement section scale
шлиц	spline
шпонка	key
шихтовой лист	laminated sheet
штамповка	stamping
щетка	brush
щит	shield

Э	
экструзия	extrusion
электрическая схема	circuit diagram
электрический градус	electrical degree
электрический угол	electrical angle
электрическая машина переменного тока	alternating current motor
электромагнитное возбуждение	electromagnetic force
электромагнитный момент	electromagnetic moment
электромеханический преобразователь энергии	electromechanical energy tranducer
ЭДС обмотки	electromotive force winding
электростанция атомная	atomic power plant
электростанция тепловая	thermal power station
электротехническая сталь	electrical-sheet steel
Я	
явнополюсной	salient-pole
якорь	armature

*Русско-английский словарь математических терминов*  
*Russian-English mathematical terms*

А	
аксиома	axiom
алгоритм	algorithm
В	
вдвое	twice as
величина	value
вычитаемое	subtrahend
вычитать	subtract
Д	
деление	division
делимое	dividend
делитель	divisor
делить	divide
дробное числительное	fractional numeral
З	
запятая	comma
знаменатель	denominator
значение	value
знак	sign, symbol
К	
(в) квадрате	squared
количество	number
М	
многократно	over and over
множимое	multiplicand
Н	
ноль	zero
О	
обратный	inverse
остаток	remainder
отношение	relation

П	
перечислять	number
площадь	rate
подсчет, вычисление	calculate
простая дробь	common traction
последовательность	sequence
процесс приведения	the process of bringing
Р	
разность	difference
решение	solution
С	
символ	numeral, symbol
складывать	add
слагаемое	addend, summand
сложение	addition
совместимый	compatible
сомножитель	factor
сокращение дроби	reducing a fraction
соответственно	accordingly
средняя величина	mean
сумма (сводить к сумме)	sum, amount
Т	
точка	point
У	
уменьшаемое	minuend
уравнение	equation
Ц	
целое число	integer
цифра	numeral, digit
Ч	
частное	quotient
числитель	numerator
число	number, numeral

***Список русско-английских сокращений, использованных в пособии***  
***Russian-English abbreviations***

1. АД – асинхронный двигатель – asynchronous motor – AM.
2. МДС – магнитодвижущая сила – magnetomotive force – MF.
3. МПТ – машина переменного тока – alternating current machine – ACM.
4. ОПТ – обмотка переменного тока – current variable winding – CVW.
5. СГ – синхронный генератор – synchronous generator – SG.
6. СД – синхронный двигатель – synchronous motor – SD.
7. СМ – синхронная машина – synchronous machine – SM.
8. ЭДС – электродвижущая сила – electromotive force – EMF.
9. ЭМПЭ – электромеханический преобразователь энергии – electromechanical energy converter – EMEC.

*Краткий список используемых глаголов (с формами)*  
*A short list of necessary verbs (with forms)*

Russian verb	infinitive	past indefinite	past participle (V3)
<b>В</b>			
включать	switch	switched	switched
выполнять	make	made	made
вращать	rotate	rotated	rotated
вырабатывать	produce	produced	produced
<b>Д</b>			
делить	divide	divided	divided
<b>З</b>			
зависеть от	depend	depended	depended
закреплять	fix	fixed	fixed
занимать	occupy	occupied	occupied
затруднять	make difficult	made difficult	made difficult
<b>И</b>			
избегать	avoid	avoided	avoided
изменять	change	changed	changed
изолировать	isolate	isolated	isolated
индуктировать	induct	inducted	inducted
<b>Н</b>			
называть	call	called	called
начинать	start	started	started
<b>О</b>			
ограничивать	limit	limited	limited
определять	define	defined	defined
отличать	differ, vary	differed, varied	differed, varied
<b>П</b>			
подключать	switch	switched	switched
получать	get	got	got
показывать	show	showed	showed
построить (схему)	make	made	made

Russian verb	infinitive	past indefinite	past participle (V3)
преобразовывать	convert	converted	converted
представлять	present	presented	presented
прессовать	press	pressed	pressed
применять	apply	applied	applied
присоединять	connect	connected	connected
признавать	recognize	recognized	recognized
производить	produce	produced	produced
<b>P</b>			
разделять	divide	divided	divided
различать	differ	differed	differed
располагать, размещать	locate	located	located
распределять	distribute	distributed	distributed
рассматривать, считать	consider	considered	considered
<b>C</b>			
сваривать	weld	welded	welded
смещать	shift, displace	shifted, displaced	shifted, displaced
соединять	connect	connected	connected
создавать	create	created	created
совпадать	coincide	coincided	coincided
состоять из	consist	consisted	consisted
способствовать	encourage	encouraged	encouraged
<b>T</b>			
течь, протекать	flow	flowed	flowed
<b>Y</b>			
увеличивать	increase	increased	increased
удлинять	lengthen	lengthened	lengthened
укорачивать	shorten	shortened	shortened
устанавливать	mount	mounted	mounted
формировать	form	formed	formed
<b>III</b>			
шихтовать	burden	burdened	burdened

**Грамматические заметки (Grammar notes)**  
**Tenses in passive voice**

Пассивный залог образуется с помощью глагола **to be**  
в соответствующей временной форме и причастия  
основного глагола **V3**

<b>Tenses in Passive Voice</b> Видовременные формы глаголов в страдательном залоге	<b>Функции</b>	<b>Structures</b>	<b>Examples</b>
Present Simple (Indefinite) Tense	Выражает обычное, регулярно повторяющееся действие в настоящем времени	am/is/are + V3	Inventions <b>are made</b> in different countries. (Изобретения создаются в разных странах)
Present Progressive (Continuous) Tense	Выражает действие, которое находится в развитии в определенный момент в настоящем времени	am/is/are being + V3	Look! An experiment <b>is being made</b> here. (Посмотри! Здесь проводится какой-то эксперимент)
Past Simple (Indefinite) Tense	Выражает обычное, регулярно повторяющееся действие в прошедшем времени	was/were + V3	Dynamite <b>was discovered</b> by Alfred Nobel in 1867. (Динамит был открыт Альфредом Нобелем в 1867 году)

<b>Tenses in Passive Voice</b> Видовременные формы глаголов в страдательном залоге	<b>Функции</b>	<b>Structures</b>	<b>Examples</b>
Past Progressive (Continuous) Tense	Выражает действие, которое находилось в развитии в определенный момент в прошлом	was/were being + V3	While T. Edison was experimenting with his apparatus he <b>was being watched</b> by his assistants. (В то время как Т. Эдисон экспериментировал со своим аппаратом, его ассистенты наблюдали за ним)
Present Perfect Tense	Выражает завершенное действие, но не уточняется, когда оно произошло, или, если промежуток времени, в который оно произошло, еще не закончился	Has/have been + V3	A lot of inventions <b>have been made</b> in the XX <sup>th</sup> century. (Много изобретений сделано в XX веке)
Past Perfect Tense	Выражает прошедшее действие, которое произошло раньше другого прошедшего действия	Had been + V3	The first gas stove <b>had been made</b> long before the first electric stove appeared. (Первая газовая плита была создана задолго до появления электроплиты)

**Как прочитать формулы и уравнения**  
(*How to read formulas, symbols and equations*)

\* – multiply, times by

: – divide, divided by

+ – add, sum up, plus

– – subtract, minus

= – equals, is equal, makes

± – plus or minus

≈ – approximately equals

( ) – round brackets or parentheses

[ ] – square brackets

{ } – braces

> – greater than

< – less than

Σ – sigma, summation of

$a = b - a$  equal  $b$

$a \geq b - a$  is equal to or greater than  $b$

$Z \rightarrow \infty$  –  $Z$  approaches infinity

1:2 – the ratio of one to two

$\frac{1}{2}$  – one half or a half

$\frac{1}{5}$  – one fifths

$\frac{3}{7}$  – three sevens

$7\frac{3}{4}$  – seven and three-fourths

0.1 – o point one or nought point one

.1 – zero point one or point one

0.01 – o point o one, nought point nought one, zero point zero one

.01 – point nought one, point zero one

0.25 – nought point two five

.25 – point two five

2.35 – two point three five

45.67 – four five point six seven or forty-five point six seven

$(2^2)$  – two to the second power, two squared, the square of two,  
the second power of two

$(2^3)$  – two cubed, two to the third power, the cube of two

$1 \cdot 2^3$  – one multiplied by two to the third power

$\sqrt{a}$  – the square root of  $a$

$3\sqrt{b}$  – the cube root of  $b$

$5\sqrt{c}$  – the fifth root of  $c$

$A_1$  –  $a$  first

$A_2$  –  $a$  second

$a_m$  –  $a$   $m$ -th,  $a$  sub  $m$

$R_m$  –  $r$   $m$ -th,  $R$  sub  $m$

$Y = f(x)$  –  $y$  is a function of  $x$  при  $2p = 4$  when two  $p$  is equal four

$\frac{24}{4 \cdot 3}$  – twenty four divided by four times three

*Тексты для дополнительного чтения*  
(*Supplementary reading*)

**Text 1. Motors with permanent-magnet excitation**

With the improvements in permanent-magnet materials, these motors are becoming more popular. Their efficiency is relatively high since there is no field power-loss, the penalty being the absence of field control. These motors are especially competitive in the low-speed, high-torque range where the machine be physically quite large even though the power is affected by power-electronic circuits.

Permanent-magnet construction is also used on low and very-low power ratings. They may be low-inertia motors having requirements which might mean several hundred stop/start cycles per second as on computer tape and printer drives. Low inertia is sometimes achieved by employing thin, ironless armatures of disc or cup shape, rotating in a double-sided air gap between fixed outer and inner iron circuits. The disc-type armature can have either wound coils or printed-circuit windings, etched on the two sides of copper-covered insulated disc. Brushes then bear directly on the «windings». Brushless designs are also used, in general accord with the different principles. The switching periods, however, are usually 60 or even 30 (3-phase or 6-phase windings), to reduce the torque ripple. Much valuable information on these topics is contained in a recent I.E.E. (International European Electronic) conference on Small Electrical Machines.

**Text 2. Generators and motors of normal construction**

With the advent of controlled rectifiers of various kinds, the importance of d.c. generators has subsided somewhat since it is cheaper to convert a.c. to d.c. with a transformer and rectifier rather than with an a.c. motor and d.c. generator. The rectifier performance is inferior in terms of power factor, simplicity of control, regenerative and reversing ability and harmonic generation, but scores on cost (in most cases), space, noise and maintenance; the latter considerations weighing more heavily in a modern age. D.C. generators will continue to be made for their virtues but will lose certain traditional fields of application. They are invaluable for use as dynamometers to control and measure the output (or input), when coupled mechanically to engines and motors of various kinds including the «rolling roads» used for vehicle testing. Generators are also useful for imparting special characteristics to a load in a simple manner, e.g. automatic current limitation for d.c. welding generators utilizing series windings and exaggerating armature reaction demagnetizing effects.

As far as motors are concerned, there are continual attempts to obtain infinitely variable-speed motors which can be directly connected to the a.c. mains and thus dispense with the intermediate a.c./d.c. conversion apparatus. Some success has been achieved with these various methods but there are always disadvantages and it seems likely that the demand for d.c. motors will continue for many years to come. The availability of compact, variable-voltage thyristor d.c. supplies, having built-in provision for closed-loop speed control, has greatly improved the economic viability of the rectifier/d.c.-motor drive. Shunt-, compound- and separately-excited motors are used for drives which have to operate over a wide range of constant speeds and in automatic control systems. Series motors are used when heavy starting torques and overloads are characteristic automatically limits the speed and power demand and gives a high torque per ampere on overload.

A very popular application for d.c. motors is on battery-powered vehicles. The problem here is the size and weight of the battery which limits the operating range and it is desirable therefore that any control-circuit losses should be kept to a minimum. The armature voltage must be reduced for starting and speed control, and if this is done by series resistance, there will be appreciable power losses. A few discrete speeds can be obtained economically by switching the battery cells into series, series-parallel or parallel groups, but intermediate speeds still pose problems. Considerable saving in losses is affected by employing switching control which continually interrupts the battery circuit several times per second, reducing the average applied voltage in direct proportion to the ON/OFF (mark/space) ratio. The motor inductance smoothes out the current waveform and the circuit can be arranged with a by-pass diode to maintain the motor current flow during the OFF period. This «chopping» action is usually performed by a series thyristor, and to vary the average voltage the durations of the ON or OFF periods, or the chopping frequency itself, are all possible variables. This system has also been applied to railway traction.

### **Text 3. Starters for D.C. motors**

There is a simplified diagram of a shunt-motor starter for manual control and it includes the usual two protective devices. When the starter handle is moved from the “off” position, connection is made to the starting resistors causing the armature to be energized through the overload coil; the field being energized through the “no volt” coil and any external regulating resistance. The “no volt” magnet is sufficiently strong to hold the starting handle against the force of the return spring, provided the field current is not lower than the designed minimum. Should the supply fail, the handle will be released, so ensuring that full voltage is not applied directly to the armature when the supply is restored. This device also affords some protection against field failure

and the consequent rise of speed. For motors with a wide range of field control, the “no-volt” coil is excited directly across the supply. The second protective device is the overload relay carrying the line current and arranged to short out the “no-volt” coil if the load becomes excessive. This causes the starter to be tripped as soon as the “no-volt” magnet becomes weak enough.

A series-motor starter is similar but there are fewer steps and the “no-volt” coil is connected across the supply. The overload protection must then be arranged to open circuit the “no-volt” coil. Automatic starting for either motor can be arranged for push-button control. This initiates a sequence of switching operations, shorting out the starting resistors in turn at pre-arranged time intervals or in accordance with specified speed or current values.

#### **Text 4. Winding Factors for Commutator Winding**

The induced voltages in a commutator winding are alternating and between any two points the resultant is obtained by vectorial summation. The winding factors apply as just derived but usually the slot angle is small and is used for the distribution factor. Consider, for example, two diametral tappings on a 2-pole winding. The vectorial summation assuming a sinusoidal distribution is proportional to the diameter and the arithmetic summation is proportional to the half periphery.

The a.c. voltage picked up at the tappings and through them to the slip rings, if fitted, would be passing through its maximum value, the r.m.s. value of the slip ring voltage being 0.707 times this. As far as the commutator voltage is concerned, diametral brushes in quadrature with the stationary poles would pick up this maximum voltage as a substantially constant value, there being a small superimposed high-frequency pulsation or ripple, due to the commutator bars and slots.

For a d.s. machine, a sinusoidal flux waveform is of no value. In order to get the maximum output voltage, the flux density is arranged to be as high as possible over the pole pitch, bearing in mind other design considerations such as commutation performance. This leads to a field from which approaches a rectangular shape. A vector summation, though feasible when the brushes are symmetrically disposed about the pole, is rather complicated in view of the large number of space harmonics, so a simpler method is used. Since only an average value, i. e. the d. s. voltage, is required, the e. m. f. calculation is based on the average flux density  $B_{av}$ , which gives the average voltage per conductor. The number of conductors in series  $z_s$ , which is equal to  $Z/2$  for a wave winding and  $Z/2p$  for a lap winding, is multiplied by the average voltage per conductor to find the total d. c. brush voltage. Except in special cases, the chording on d.c. machines is too small to have any noticeable effect on the output voltage.

The voltage at the brushes will be alternating if there is continuous relative movement between poles and brushes, as will be explained in Chapter 9. In

this case the fundamental-frequency r.m.s. voltage appearing between brushes separated by an angle  $\theta$ , will be equal to the arithmetic sum of the conductor r.m.s. voltages in series between the brushes multiplied by the distribution factor  $(\sin \theta/2)/(\theta/2)$ ,  $\theta$  being measured in electrical radians. the chording factor may be neglected in the chording angle is small.

### **Text 5. Winding factors**

A winding circuit consist of many conductors in series, for which the e.m.f.s, in general, are not all phase. This phase displacement occurs for two reasons:

- (i) distribution of the winding in several slots,
- (ii) coil pitch not equal to a pole pitch on the average; two-layer windings only.

Since the sum of these conductor e.m.f.s. must be carried out vectorially, both effect reduce the machine voltage but this is not an overall disadvantage. The time variation of e. m. f. for a single conductor correspond to the spatial variation of air gap flux density. This is not purely sinusoidal, being often particularly rich in lower- order harmonics. By suitable winding design, the percentage reduction of the fundamental. Consequently, the waveform of the circuit voltage approaches more nearly to a pure sine shape. The winding factors express mathematically the per- unit reduction of fundamental and of each harmonic which takes place as a result of distribution and chording. In practice the fundamental is rarely reduced by as 10%, whereas the harmonics are often reduced to negligible proportions. The same winding factors apply to the space distribution of m.m.f. and so reduce the m.m.f. space harmonics.

### **Text 6. Fractional- slot Windings**

These are an advanced form of winding in which the number of slots per pole per phase,  $q$ , is not an integer. If the number of slots had been 30 say, then  $q$  on the average would have been 2.5. In practice this would mean that in one pole pair, 360 electrical, the phase groups would be alternately 3 and 2 slots giving 5 slots per pole pair per phase. The bottom- layer sequence must of course be the same, but would start from a point determined by the coil pitch. Single – layer windings can be used but they impose many more restrictions than two- layer windings. It will be noticed that the pattern is repeated every two poles. If there had been 27 slots,  $q$  would have been  $27/(3 \cdot 4) = 9/4$  and the pattern would have required for a complete pattern and the numerator determines the number of slots that each phase takes up in this distance.

This type of winding permits the use of standard slotting arrangements over a wide range of pole numbers. It is necessary for three balanced phases that the total number of slots is divisible by 3, but it is no longer necessary that it should be divisible by the number of poles as well though there are some restrictions when the number of poles is itself a multiple of 3. Another

advantage is that the phase angle between the various conductor e.m.f. is reduced. As will be seen later, this in turn reduces the higher order harmonics in both e.m.f. and m.m.f. waveforms. For the case of 30 slots and poles? The slot angle is  $720/30 = 24^\circ$ . The five conductor e.m.f.s in one layer of a completed phase section are displaced in time phase. When they are series connected with the necessary and natural reversal of A and A, the phase angle between the successive e.m.f. phases is effectively  $12^\circ$ , since A and A are intermediate between A,A and A.

### **Text 7. Cylindrical rotor construction**

The term “cylindrical rotor” has a special meaning when applied to synchronous machines. It implies not only that the air gap is uniform but that the rotor m.m.f. may be taken to be distributed sinusoidally in space. It can therefore be combined vectorially with the stator m.m.f. as on the asynchronous machine, to give a sinusoidally distributed resultant m.m.f. which applied to the air gap, produces a sinusoidally distributed mutual flux. Such a rotor has a suitably distributed and chorded 3-phase winding and is excited with a direct current, usually with one phase carrying the full value and the other two, half negative value each. Thus both rotor and stator appear like those of an induction motor, though on all but the smaller sizes, open slots and two-layer windings are used for preference and the radial air gap is longer.

Reactive current is not required to magnetize the air gap of synchronous machines, so there is no restriction on the radial-gap length from this point of view as in the case of the synchronous machines. Apart from field heating limitations, the balance between the field-winding m.m.f. and full-load armature-winding m.m.f. (which determines the control exerted by each of them), is the deciding factor in fixing the radial-gap dimension as for the d.c. machine. For the largest turbo-alternators envisaged, it may be longer than 15 cm but apart from these very high-power units, air gaps are usually a good deal less than 2–5 cm, decreasing with the physical size of the machine.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	
Introduction.....	3

### Раздел I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Chapter I. GENERAL PROBLEMS OF ALTERNATING CURRENT MACHINE THEORY.....	6
1.1. Конструктивные (Basic) схемы исполнения асинхронных машин (of induction motors).....	7
1.2. Конструктивные (basic) схемы исполнения синхронных машин (SM) (synchronous machines).....	13
1.3. Принцип выполнения обмотки переменного тока (alternating current coil producing).....	17
1.4. Основные условия (conditions) получения вращающегося магнитного поля.....	18
1.5. Однофазная сосредоточенная однослойная обмотка переменного тока (one-phase concentrated one-layer alternating current winding).....	19
1.6. Распределенная однослойная обмотка переменного тока $2p = 2$ (distributed one-layer alternating current winding).....	22
1.7. Выполнение трехфазной (three-phase) трехзонной (three-zone) обмотки переменного тока (alternating current winding).....	24
1.8. Выполнение шестизонной (six-zone) трехфазной обмотки переменного тока (alternating current winding).....	26
1.9. Примеры выполнения обмоток переменного тока (alternating current winding).....	30

### Раздел II. ТЕСТЫ

Chapter II. TESTS.....	46
Test 1. Chose the correct variant.....	46
Test 2. Choose the correct variant.....	47

Test 3. Choose the correct variant.....	49
Test 4. Choose the correct variant.....	50
Test 5. Choose the correct variant.....	51
Test 6. Choose the correct variant.....	53
Test 7. Choose the correct variant.....	54
Test 8. Choose the correct variant.....	56
 Контрольные вопросы для повторения Questions for revising students' knowledge.....	 58
 Библиографический список List of reference books.....	 59
 Приложения Appendixes.....	 60

Учебное издание

*Бахарев Николай Петрович*  
*Шишкина Наталья Александровна*

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА  
AC ELECTRICAL MACHINES  
Учебное пособие

В двух частях

Часть 1

Общие вопросы теории машин переменного тока

Редактор *Т.Д. Савенкова*  
Технический редактор *З.М. Малявина*  
Вёрстка: *Л.В. Сызганцева*  
Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 12.03.2012. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 4,88.

Тираж 100 экз. (1-й з-д 1-50). Заказ № 1-35-11.

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

