

Специальные электрические машины

Ширинский С.В.

Кафедра Электромеханики, МЭИ

Содержание курса

- Введение: роль ЭМ, прогресс в электромеханике
- Емкостные электрические машины, примеры реализации
- Синхронные ЭМ
 - ПМ, гибридное возбуждение, реактивный двигатель
 - Индукторные машины, асинхронизированные СМ
- Вентильно-индукторный двигатель (+ расчетное задание)
- Машины постоянного тока
 - Сварочные генераторы, генератор с поперечным возбуждением
 - Электромашинные усилители
 - Униполярный двигатель постоянного тока
 - Магнетогидродинамическая машина постоянного тока
 - Вентильный двигатель постоянного тока / генератор
- Коллекторные машины переменного тока
 - Репульсионный коллекторный двигатель переменного тока
 - 3-фазный коллекторный двигатель Шраге-Рихтера

Содержание курса

- Асинхронные электрические машины
 - с неподвижным / массивным / полым ротором
- Трансформаторы
 - Измерительные трансформаторы
 - Сварочные трансформаторы
 - Трансформаторы с плавным регулированием напряжения
- Авиационные электрические машины
- Судовые электрические машины
- Высокоскоростные электрические машины
- Машины с высокой удельной мощностью
- Новые типы электрических машин

Содержание курса

- Лекции
 - elmech.mpei.ac.ru/Spec-EM
- Расчетное задание
 - Эскизный проект вентильно-индукторного двигателя
 - elmech.mpei.ac.ru/books/edu/SRM_design/
 - В приложении - задание на проектирование (30 вариантов)
- Лабораторные работы
 - «Исследование индукторного генератора»
 - «Исследование электромашинного усилителя поперечного поля»
 - «Исследование магнитного поля ВИД с помощью МКЭ»
 - «Выбор оптимальной электромеханической системы»
- Экзамен

БАРС 2020

КМ	что	когда	вес
КМ-1	Контрольная работа (номинальные данные ЭМ)	4 н	10%
КМ-2	Защита лаб. работы 1/2	8 н	25%
КМ-3	Защита лаб. работы 2/1	10 н	25%
КМ-4	Защита лаб. работы 3	12 н	25%
КМ-5	Расчетное задание	14 н	15%

Литература

Основная

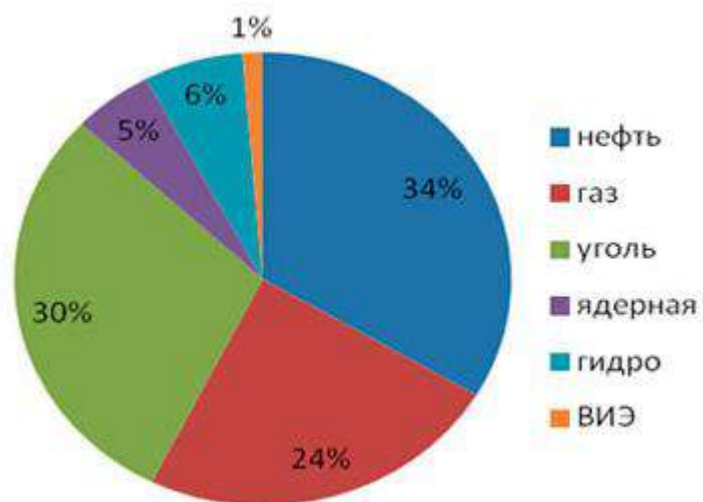
- Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов.– М.: Издательство МЭИ, 2004. Том 1., Том 2.
- Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. – М.: Высшая школа, 1990.
- Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. – Питер, 2010.
- Фисенко В.Г., Попов А.Н. Проектирование вентильных индукторных двигателей. Методическое пособие. – М.: Изд-во МЭИ, 2005.
- Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. – М.: Изд-во МЭИ, 2002.

Дополнительная

- Jacek F. Gieras Advancements in Electric machines – Springer, Power Systems, 2009, xii, 280p.

Введение: роль электрических машин, прогресс в электромеханике

Структура потребления первичных энергетических ресурсов в мире



BP Statistical Review of World Energy, 2011

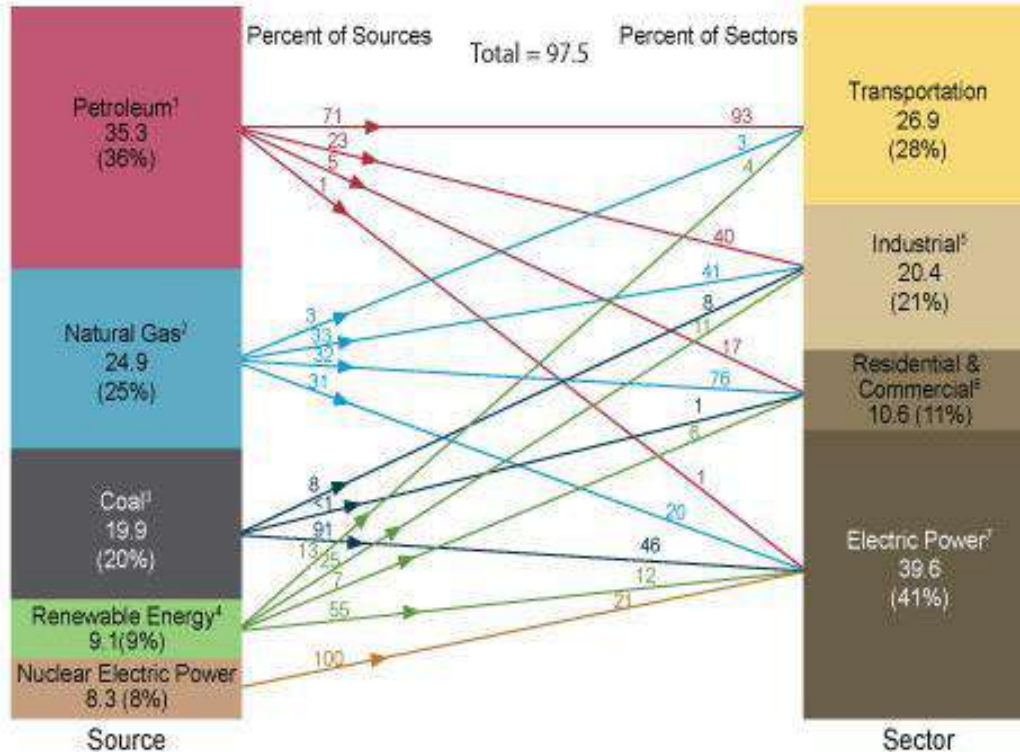


Shell Energy Scenarios to 2050

На что тратятся ПЭР?

Введение

Структура потребления первичных источников энергии (США)



Электрическая машина –
основной преобразователь энергии

¹ Does not include biofuels that have been blended with petroleum—biofuels are included in "Renewable Energy."

² Excludes supplemental gaseous fuels.

³ Includes less than 0.1 quadrillion Btu of coal coke net exports.

⁴ Conventional hydroelectric power, geothermal, solar/PV, wind, and biomass.

⁵ Includes industrial combined-heat-and-power (CHP) and industrial electricity-only plants.

⁶ Includes commercial combined-heat-and-power (CHP) and commercial electricity-only plants.

⁷ Electricity-only and combined-heat-and-power (CHP) plants whose primary business is to sell electricity, or electricity and heat, to the public. Includes 0.1 quadrillion Btu of electricity net imports not shown under "Source."

Note: Primary energy in the form that it is first accounted for in a statistical energy balance, before any transformation to secondary or tertiary forms of energy (for example, coal is used to generate electricity).

• Sum of components may not equal total due to independent rounding.

Sources: U.S. Energy Information Administration, Monthly Energy Review (March 2012), Tables 1.3, 2.1-2.5, preliminary 2011 data.

Введение

Структура потребления электроэнергии (в России)



В промышленности до 80% электроэнергии потребляют электродвигатели

На транспорте до 90% преобразуется в механическую энергию

В ЖКХ и у населения велика доля электромоторов

Электромеханическое преобразование энергии – основа индустриального/постиндустриального общества

Но современная электромеханика не ограничивается 4 типами электрических машин

Введение

Электромеханика развивается более 170 лет

Факторы, способствующие дальнейшему развитию:

- Новые материалы: тонкие изоляционные материалы, электротехническая сталь, аморфная сталь, постоянные магниты, порошковая металлургия, высокотемпературные сверхпроводники, пьезоэлектрическая керамика, магнитострикционные сплавы, магнитные сплавы с памятью формы, клейкое покрытие проводов, активируемое при нагреве.
- Новые области применения: электрические и гибридные автомобили, скоростной наземный транспорт, морской транспорт, авиационные, космические, подводные аппараты, опасная среда (вакуум, высокое давление, радиация), роботы, микроэлектромеханические системы, компьютеры, бытовая электроника, линейные ускорители, энергетическое оружие

Введение

Факторы, способствующие дальнейшему развитию:

- Влияние силовой электроники: вентильные двигатели, привод переменной частоты вращения, встроенные контроллеры, вентильно-индукторные двигатели.
- Новые стратегии управления: интеллектуальный привод, бездатчиковое управление, самонастраивающиеся системы, контроллеры на нечеткой логике.
- Экологические требования: энергосбережение и снижение вредных выбросов, повторная переработка.
- Новые источники энергии: фотоэлектрические, электрохимические – особые параметры электроэнергии.
- Повышенные требования к качеству: шумы и вибрации, пульсации момента, радиочастотный шум; удельная мощность, удельный момент, КПД/стоимость; надежность, большой срок службы, минимальное обслуживание.

Введение

Факторы, способствующие дальнейшему развитию:

- Новые топологии ЭМ: гистерезисные ЭМ с подмагничиванием (written pole motors), ЭМ с поперечным потоком (transverse flux motors), гибридные (ОВ + ПМ), пьезоэлектрические, резонансные, колебательные, возвратно-поступательные.
- Высокоскоростные машины большой мощности (энергетическое оружие на борту самолета)
- Тихоходный безредукторный привод (лифт, ветрогенератор)
- Интегрированный электропривод: двигатель, датчик, редуктор, конвертор, защитное реле, контроллер, компьютерный интерфейс.
- Мехатроника: синергия электромеханических модулей с силовой электроникой и компьютерным управлением.
- Развитие методов анализа: полевые расчеты переходных процессов, анализ 3-мерных полей – улучшение качества ЭМ.
- Развитие методов оптимизации.

Введение

Факторы, способствующие дальнейшему развитию:

- Новые вызовы и крупные проекты: электрический корабль, электрический самолет, электрический танк, «еще более электрический самолет», гибридизация транспорта и строительной техники, умный дом, биомедицинское и клиническое оборудование.
- Противостояние новых устройств и усовершенствованных старых: линейный привод vs. вращающийся привод с червячной передачей (удельная сила, стоимость изготовления/эксплуатации)

Введение

Инновационное развитие (экономики/электромеханики) – современная идеология

Большей частью идет непрерывное (эволюционное) развитие – doing things better – позволяет компании «оставаться в деле»

Иногда происходят прорывы (скачки в развитии) – doing things differently – позволяет компании выходить в лидеры

Электромеханика – медленно изменяющаяся отрасль с эволюционным развитием, но есть и прорывы:

- 3-фазный АД – М. Доливо-Добровольский, 1889
- СГ с цилиндрическим ротором – С. Brown, 1901
- Силовая электроника для управления ЭМ (1970-е)
- Редкоземельные магниты SmCo (1970-е), NdFeB (1980-е)
- Векторное управление электроприводом (1970-е)
- ВТСП материалы (1980-е)
- Memory shape materials (1980-е)
- Углеродные нанотрубки (прочность, электропроводность)

Введение

Физические основы работы ЭМ неизменны (закон электромагнитной индукции), развитие идет за счет новых материалов. Но не только эволюционное: новые материалы – новые физические основы (сверхпроводимость, пьезоэффект, магнитострикция, magnetic memory shape)

Другое направление – мехатроника

Ближайшее будущее:

- Повышенная вдвое электропроводность при комнатной температуре → снижение электрических потерь вдвое либо увеличение плотности тока и линейной нагрузки в $\sqrt{2}$ → кпд/габариты
- Повышенная вдвое индукция насыщения → увеличение вдвое индукции в зазоре → габариты
- Система охлаждения: непосредственное водяное ($J = 30 \text{ А/мм}^2$); сжиженный газ → можно применять сверхпроводники



Использование DriveConstructor

Введение

Онлайн курс (программа + учебник + задачник) – driveconstructor.com

Учебный комплекс по системам преобразования энергии и электроприводу, основанный на примерах практических применений (applications). Разработчики: А.В. Матвеев и А.А. Гаврилов

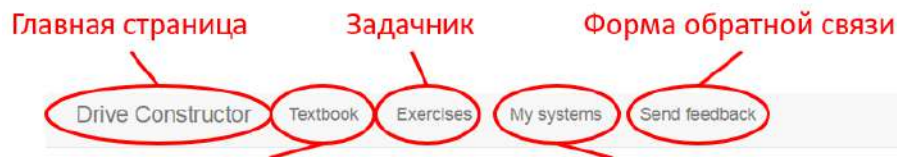
Система привода (drive train) обеспечивает работу механизма (насос, конвейер, лебедка) при питании от электрической сети либо преобразование энергии ветра/воды в электроэнергию

Система может содержать трансформатор, преобразователь частоты, электрическую машину, редуктор

Программа автоматически собирает системы привода из каталогов реальных компонентов, отслеживая их совместимость

Использование DriveConstructor

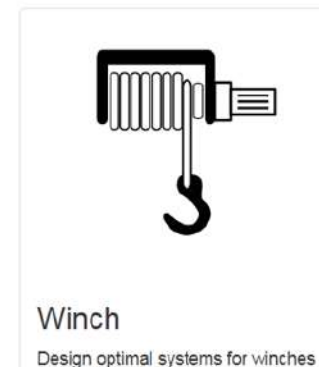
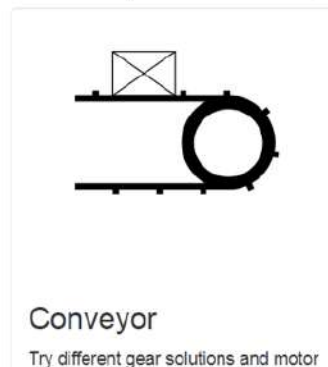
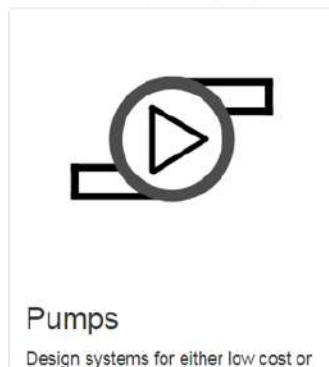
Главное меню



Учебник Архив выполненных работ

Welcome to DriveConstructor!

Discover the beauty and complexity of the world of standard components. Watch the complete list of tutorials on [our YouTube channel](#).



Totally in English!

- Руководство пользователя переведено на русский
- Учебник и задачник выполнены двуязычными (англ/рус)

Только для студентов-электромехаников МЭИ [на сайте кафедры]

Использование DriveConstructor

4 типа задач (применений / applications)

- **Pumps** – насосы
- **Conveyor** – конвейер
- **Wind/tidal mill** – ветряная / приливная турбина (свободно-поточная турбина)
- **Winch** – лебедка

Drive Constructor Textbook Exercises My systems Send feedback

Welcome to DriveConstructor!

Discover the beauty and complexity of the world of standard components. Watch the complete list of tutorials on our [YouTube channel](#).

Pumps
Design systems for either low cost or for low energy consumption for various pump type.
[Select](#) [Help](#)

Открыть раздел электронного учебника

Conveyor
Try different gear solutions and motor speeds to design for lowest cost and compactness.
[Select](#) [Help](#)

Wind/tidal mill
Experiment with different drive train topologies, design systems for lowest cost of energy.
[Select](#) [Help](#)

Winch
Design optimal systems for winches with both motoring and generating operation modes.
[Select](#) [Help](#)

Выбрать данное применение и перейти к выбору схемы привода

Использование DriveConstructor

Для каждого применения – несколько схем системы привода


Разные схемы для насоса:

насос –
[редуктор] –
эл.двигатель –
кабель –
преобразователь частоты –
[трансформатор] –
авт. выключатель –
сеть

Drive Constructor Textbook Exercises My systems Send feedback

Select topology for your system

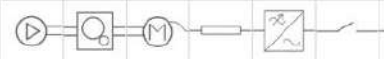
All the topologies include frequency converters (FC) to ensure variable speed operation. The FC provides full motor and pump controllability and protection. The switch is usually an automatic circuit breaker, though in certain cases it can be just a manual connector with fuses.



Drive train with just variable speed drive

This simple system topology can be used when it is possible to find a motor matching speed of the pump and when both, the motor and the FC, have similar voltage rating to that of the supply network (the grid).


[New system](#) [Help](#)



Drive train with speed gearing

This solution can be used when for example the pump has too low rated speed to be matched by an available electric motor and the motor and the FC, have similar voltage rating to that of the supply network.


[New system](#) [Help](#)



Drive train with voltage step down

In this solution the transformer is used for matching the voltage in the grid and FC's rated voltage and/or for galvanic insulation. It is possible to find a motor matching speed of the pump without any gearbox.

[New system](#) [Help](#)



Drive train with voltage step-down and speed gearing

This solution can be used when the pump has too low rated speed to be matched by an electric motor, and the transformer is used for matching the voltage in the grid and FC's and/or for galvanic insulation.

[New system](#) [Help](#)

Открыть раздел электронного учебника

Выбрать данное применение и перейти к выбору схемы привода

Использование DriveConstructor

Система привода, содержащая только регулируемый привод

Вначале задайте параметры
нагрузочного механизма

Кликните на пиктограммах
для задания параметров компонентов

The screenshot shows the DriveConstructor interface. At the top, there are navigation tabs: Drive Constructor, Textbook, Exercises, My systems, and Send feedback. The main title is "Drive train with just variable speed drive". Below the title is a schematic diagram of a drive train: a motor (circled in red), a centrifugal pump (circled in red), a gearbox, a VFD, a switch, and a motor. Below the diagram are configuration panels for the pump and the VFD. The pump panel includes fields for Type (centrifugal), Head, m (200), Flow, l/s (50), Rated speed, rpm (1450), Minimal speed, rpm (0), and Rated efficiency, % (81). There are also sliders for various parameters. A "More..." button is circled in red. The VFD panel has a "Show report" button circled in red. To the right is a graph of Torque (Nm) vs Speed (rpm). The graph shows two curves: a blue curve for the motor (IM-132-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1500-B3-IE4) and a grey curve for the pump (Pump). The motor curve is a straight line up to 800 rpm, then levels off. The pump curve is a curve that increases with speed. A red arrow points from the text "Почитайте про нагрузочные характеристики в разделе «Принципы подбора компонентов» учебника" to the graph.

Drive Constructor Textbook Exercises My systems Send feedback

Drive train with just variable speed drive

Type: centrifugal

Head, m: 200

Flow, l/s: 50

Rated speed, rpm: 1450

Minimal speed, rpm: 0

Rated efficiency, %: 81

More...

Show report

Torque (Nm)

Speed (rpm)

Pump IM-132-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1500-B3-IE4

Почитайте про нагрузочные характеристики в разделе «Принципы подбора компонентов» учебника

Нажмите, чтобы
увидеть все параметры

Кнопка имеет светлый оттенок и не нажимается в случае,
когда выбраны не все компоненты системы

Использование DriveConstructor

Система привода, содержащая только регулируемый привод

Программа старается подобрать все компоненты автоматически, обеспечивая согласование нагрузочных характеристик

Пользователь задает нагрузку и может уточнять параметры компонентов (напряжение сети, тип ПЧ, класс эффективности ЭМ и способ охлаждения и т.д.)

Иногда приходится выбирать из предложенных вариантов

Frequency converter candidates

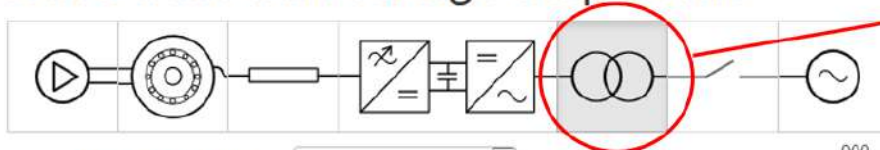
More...

Select	Type	Price, EUR	Rated power, kW	Voltage, V	Working voltage, V	Rated current HO, A	Cooling	Efficiency @100% load	Mounting variant	Height, m	Width, m	Depth, m	Volume, m3	Footprint, m2	Weight, kg	Designation
<input checked="" type="radio"/>	2Q-2L-VSC-6p	8990	160	360-420	400	198.38	air	98	wall	1	0.4165	0.4	0.1666	0.4165	83.3	2Q-2L-400-160-IP2x-AC-W-6p
<input type="radio"/>	2Q-2L-VSC-6p	13187	200	360-420	400	240.46	air	98	floor	2.2	0.1578	0.6	0.2083	0.3472	104.12	2Q-2L-400-200-IP2x-AC-F-6p

Использование DriveConstructor

Система привода с понижением напряжения

Drive train with voltage step down



Параметры трансформатора определяют остальную часть системы привода

Rated power, kVA: <any>

Voltage (HV): 6000

Transformation ratio: 8.9

Voltage (LV): <any>

Integrated or stand-alone: stand-alone

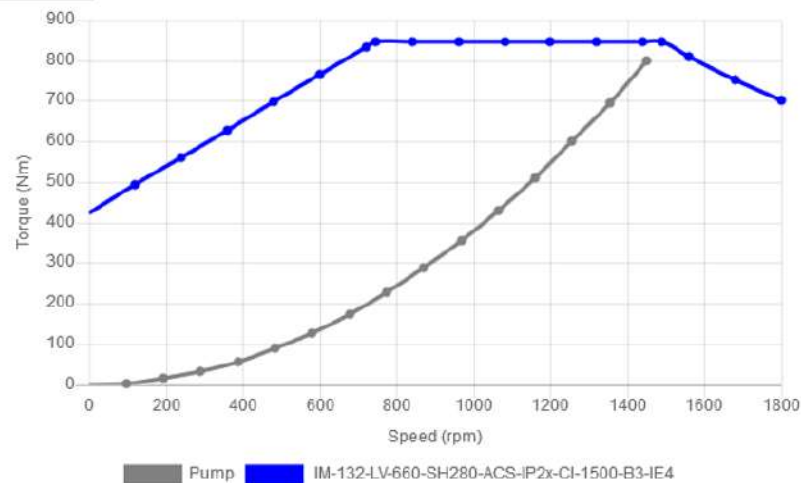
Dry or oil-immersed: dry

Windings: 2-winding

Cooling: air

Protection (IP rating): IP54/55

Altitude, m: 1000



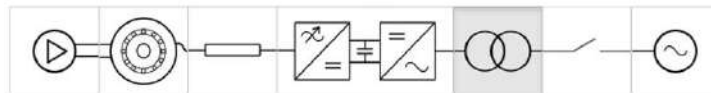
Это напряжение (НН) определяет напряжение преобразователя частоты и электрической машины

Использование DriveConstructor

Система привода с понижением напряжения

Можно не только выбирать уровень напряжения (НН), но и корректировать его (выбирать ступени регулирования)

Drive train with voltage step down



Rated power, kVA: <any>

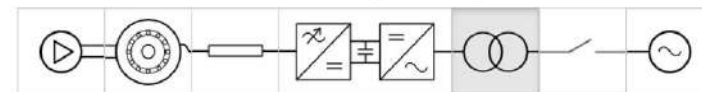
Voltage (HV): 6000

Tappings: 0

Transformation ratio: 14.71

Voltage (LV): 380-440

Drive train with voltage step down



Rated power, kVA: <any>

Voltage (HV): 6000

Tappings: 0

Transformation ratio: +2.5%

Voltage (LV): -2.5%

Integrated or stand-alone: stand-alone

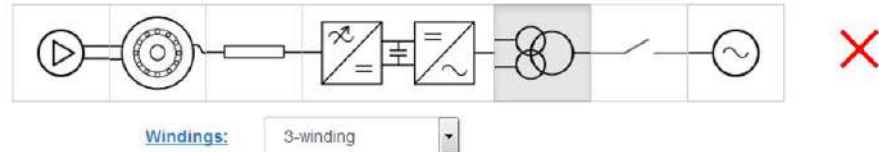
Ступени регулирования

Использование DriveConstructor

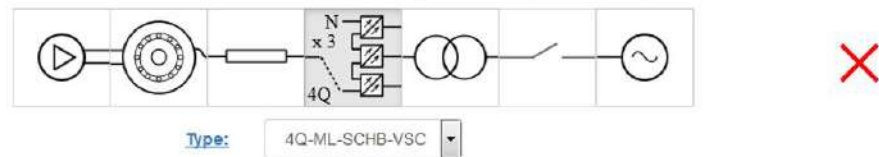
Система привода с понижением напряжения

Разные типы трансформаторов и ПЧ должны быть согласованы друг с другом!

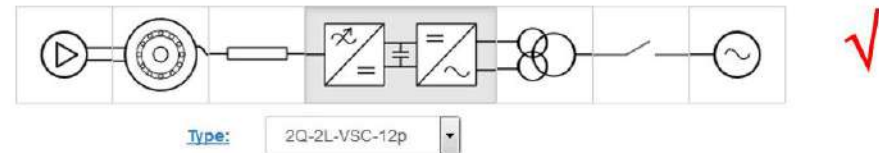
Drive train with voltage step down



Drive train with voltage step down



Drive train with voltage step down



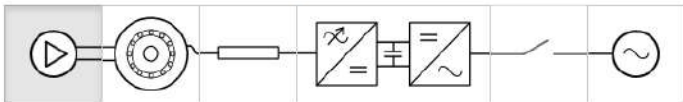
Использование DriveConstructor

Просмотр отчета по готовой системе привода

Когда все компоненты системы привода выбраны, становится доступной кнопка Show report

Drive Constructor Textbook Exercises My systems Send feedback

Drive train with just variable speed drive



Type: centrifugal

Head, m: 200

Flow, l/s: 50

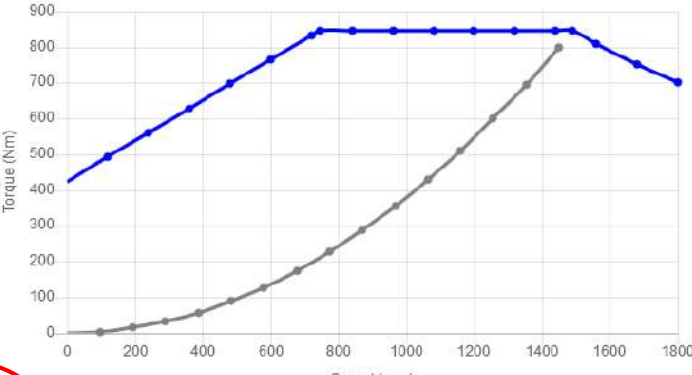
Rated speed, rpm: 1450

Minimal speed, rpm: 0

Rated efficiency, %: 81

More...

Show report



The graph shows the torque characteristics for a pump and a motor. The x-axis is Speed (rpm) from 0 to 1800, and the y-axis is Torque (Nm) from 0 to 900. The pump curve (grey) shows torque increasing with speed. The motor curve (blue) shows torque increasing to a peak of about 850 Nm at 1450 rpm, then decreasing.

Speed (rpm)	Pump Torque (Nm)	Motor Torque (Nm)
0	0	420
200	20	550
400	40	680
600	60	780
800	80	850
1000	100	850
1200	120	850
1400	140	850
1450	150	850
1600	160	800
1800	180	700

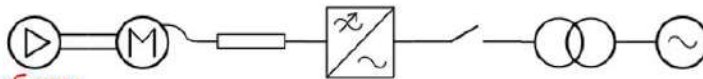
Legend: Pump (grey), IM-132-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1500-B3-IE4 (blue)

Использование DriveConstructor

Просмотр отчета по готовой системе привода

Drive Constructor Textbook Exercises My systems Send feedback

Report:



Возврат к выбору
компонентов

Go back Save system

Основные параметры
готовой системы



System

Price, EUR:	41129
Efficiency @ rated load:	92.42
Efficiency @ 75% load:	92.3
Efficiency @ 50% load:	90.57
Efficiency @ 25% load:	85.4
Volume, m3:	1.37
Footprint, m2:	2.37
Weight, kg:	1954
THD(u), %:	16

Trafo

Rated power, kVA:	190
Price, EUR:	6025
Integrated or stand-alone:	stand-alone
Dry or oil-immersed:	dry
Windings:	2-winding
Cooling:	air
HV side voltage (max):	6600
LV side voltage (max):	440

Frequency converter

Type:	2Q-2L-VSC-6p
Price, EUR:	8990
Rated power, kW:	160
Voltage, V:	360-420
Working voltage, V:	407.8
Rated current HO, A:	198.38
Rated current LO, A:	240.46
Cooling:	air
Efficiency @100% load:	98

Electric machine

Type:	SCIM
Price, EUR:	25093
Rated power, kW:	132
Rated speed:	1488
Rated synchronous speed, rpm:	1500
Maximum speed, rpm:	1800
Voltage, V:	360-440
Efficiency class:	IE4
Efficiency @100% load:	96.7

Использование DriveConstructor

Сохранение системы для последующего сравнения

Report:



Go back

Save system

Сохранение готовой системы для последующего сравнения

System	Trafo	Frequency converter	Electric machine
Price, EUR:	41129	Type:	2Q-2L-VSC-6p
Efficiency @ rated load:	92.42	Price, EUR:	8990
Efficiency @ 75% load:	92.3	Rated power, kW:	160
Efficiency @ 50% load:	90.57	Voltage, V:	360-420
Efficiency @ 25% load:	85.4	Working voltage, V:	407.8
Volume, m3:	1.37	Rated current HO, A:	198.38
Footprint, m2:	2.37	Rated current LO, A:	240.46
Weight, kg:	1954	Cooling:	air
THD(u), %:	16	Efficiency @100% load:	98
	Rated power, kVA:		Type:
	190		SCIM
	Price, EUR:		Price, EUR:
	6025		25093
	Integrated or stand-alone:		Rated power, kW:
	stand-alone		132
	Dry or oil-immersed:		Rated speed:
	dry		1488
	Windings:		Rated synchronous speed, rpm:
	2-winding		1500
	Cooling:		Maximum speed, rpm:
	air		1800
	HV side voltage (max):		Voltage, V:
	6600		360-440
	LV side voltage (max):		Efficiency class:
	440		IE4
			Efficiency @100% load:
			96.7


Данные сохраняются только до конца сеанса работы с программой

Использование DriveConstructor

Сохранение системы для последующего сравнения

Drive Constructor Textbook Exercises **My systems** Send feedback

My systems

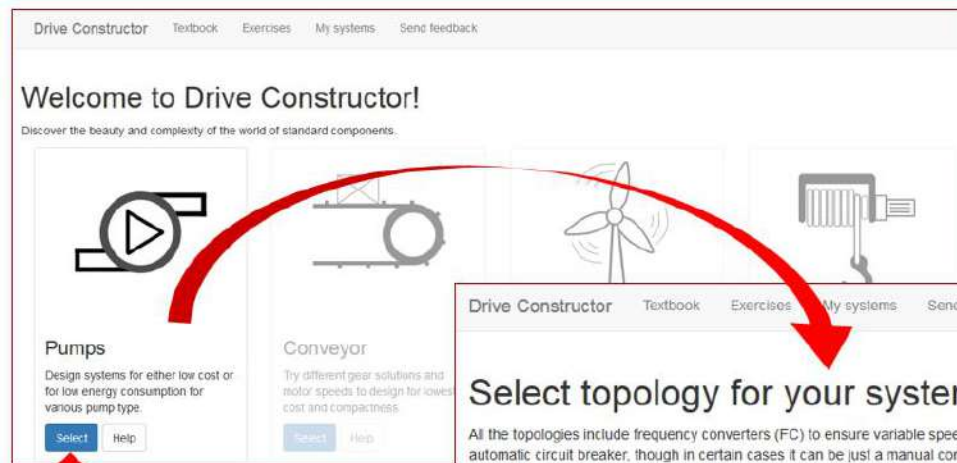
Select	Name	Topology	Time update	Price, EUR	Efficiency @ rated load	Efficiency @ 75% load	Efficiency @ 50% load	Efficiency @ 25% load	Volume, m3	Footprint, m2	Weight, kg	THD(u), %	THD(i), %
<input type="checkbox"/>	sys1		12/17/2017, 4:44:50 PM	40663	92.52	92.4	90.66	85.49	1.39	2.42	1958.07	16	28

Доступны основные параметры системы

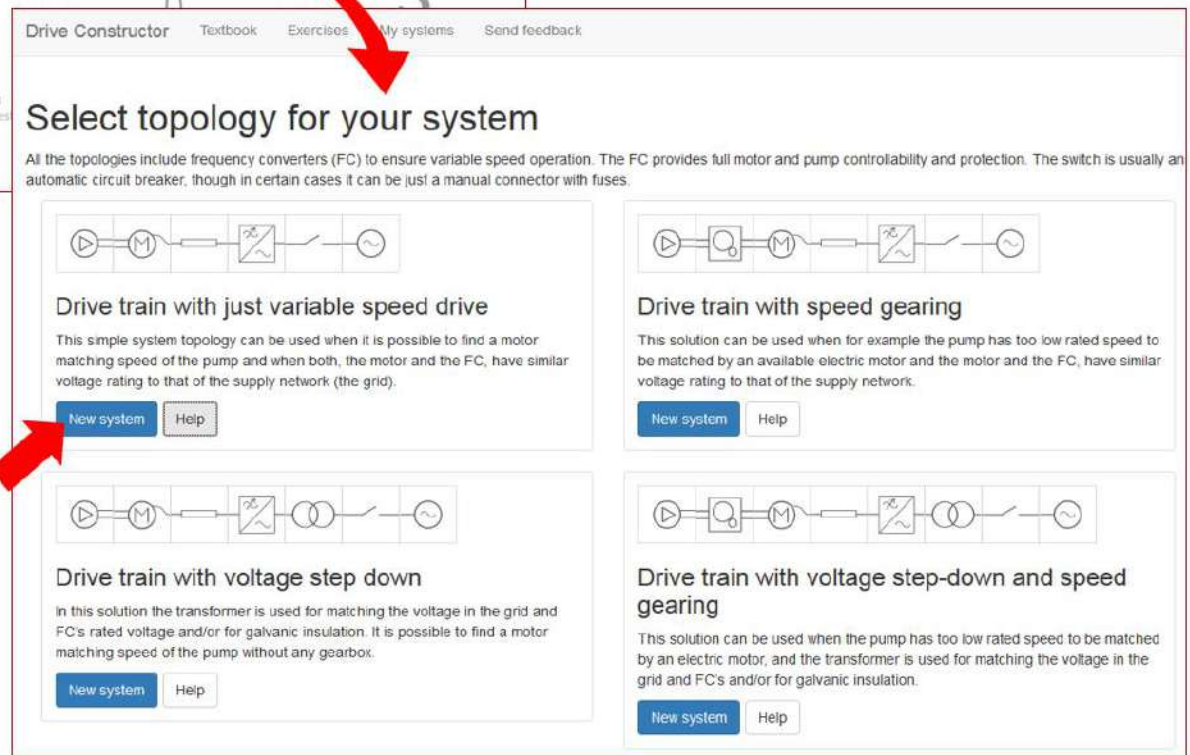
Подробности (report) – при нажатии на имя сохраненной системы

Использование DriveConstructor

Создание новой системы для последующего сравнения



DriveConstructor →
application → topology
→ components →
Save system



Использование DriveConstructor

Сравнение систем

Drive Constructor Textbook Exercises **My systems** Send feedback

My systems

Select	Name	Topology	Time update	Price, EUR	Efficiency @ rated load	Efficiency @ 75% load	Efficiency @ 50% load	Efficiency @ 25% load	Volume, m3	Footprint, m2	Weight, kg	THD(u), %	THD(i), %
<input type="checkbox"/>	system1		12/17/2017, 5:04:14 PM	40663	92.52	92.4	90.66	85.49	1.39	2.42	1958.07	16	28
<input type="checkbox"/>	system2		12/17/2017, 5:04:49 PM	41826	92.52	92.4	90.66	85.49	1.43	2.46	2003.56	9.6	15

Delete Compare

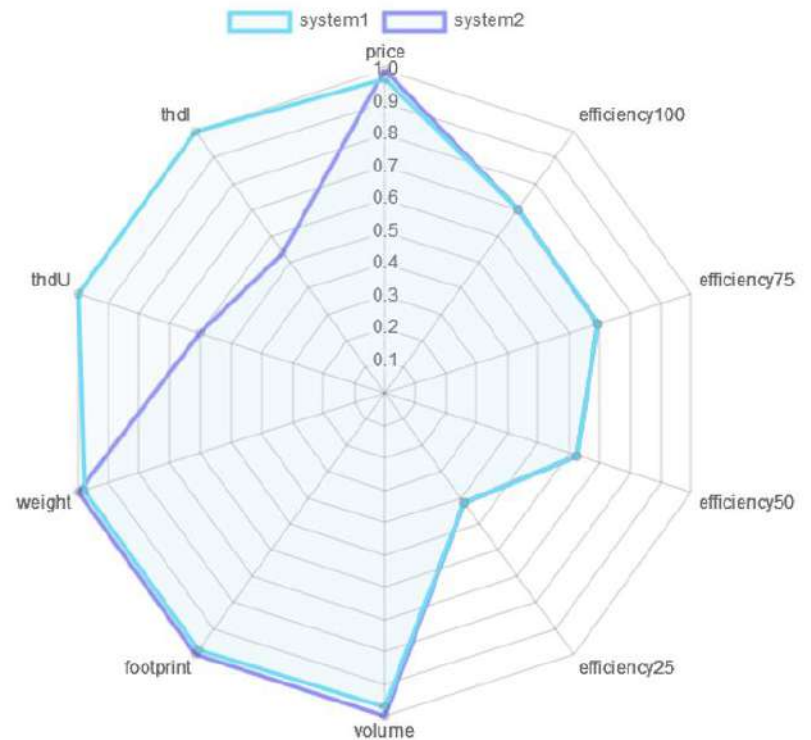
- Выбрать системы для сравнения
- Отметить параметры для сравнения
- Нажать “Compare”

Использование DriveConstructor

Сравнение систем

Наглядное сравнение – паутинная диаграмма

Comparison:



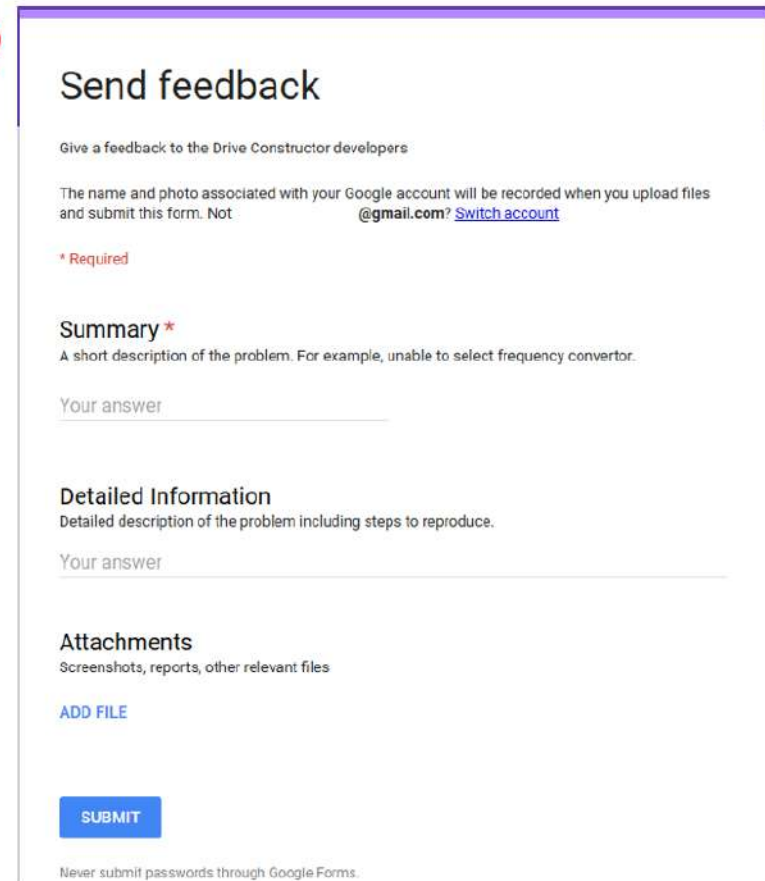
Для оформления отчета может
понадобиться выписать более
подробные параметры систем
(вручную)

Использование DriveConstructor

Форма обратной связи



Используется для отправки сообщений разработчикам курса



Send feedback

Give a feedback to the Drive Constructor developers

The name and photo associated with your Google account will be recorded when you upload files and submit this form. Not [@gmail.com?](#) [Switch account](#)

*** Required**

Summary *
A short description of the problem. For example, unable to select frequency convertor.

Your answer

Detailed Information
Detailed description of the problem including steps to reproduce.

Your answer

Attachments
Screenshots, reports, other relevant files

[ADD FILE](#)

SUBMIT

Never submit passwords through Google Forms.

Использование DriveConstructor

Лабораторная работа №4

«Выбор оптимальной электромеханической системы»

4 бригады – 4 задания

- Влияние номинальной скорости на вес, размер и момент инерции машины
- Класс эффективности, анализ жизненного цикла машины
- Влияние способа охлаждения на размер и стоимость машины
- Снижение мощности в зависимости от высоты и температуры

Самостоятельное выполнение исследования

Оформление отчета и презентации (постановка задачи, метод исследования, результаты, выводы)

Презентация и защита работы по расписанию 4 лаб. работы



DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Разработать систему привода для трех вариантов конвейера, различающихся диапазоном скоростей: **40-200; 180-200; 180-220** об/мин

- один приводной барабан
- номинальный момент 5 кНм
- Редуктор с 1-ступенчатой косозубой передачей (helical) 1:5
- Расстояние между барабаном и преобразователем частоты 30 м
- Напряжение сети 400 В
- Чистая силовая станция с кондиционированным воздухом, хорошие условия отвода тепла
- Охлаждающая жидкость недоступна, возможно воздушное охлаждение IC411 (self ventilation) или IC416 (air forced ventilation)

Сравнить вес и стоимость двигателя, ПЧ, всей системы

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Drive Constructor Textbook Exercises My systems Send feedback

Welcome to DriveConstructor!

Discover the beauty and complexity of the world of standard components. Watch the complete list of tutorials on our [YouTube channel](#).

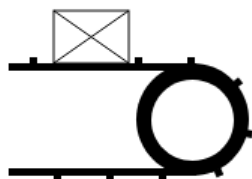


Pumps

Design systems for either low cost or for low energy consumption for various pump type.

Select

Help

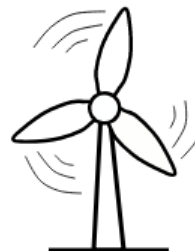


Conveyor

Try different gear solutions and motor speeds to design for lowest cost and compactness.

Select

Help

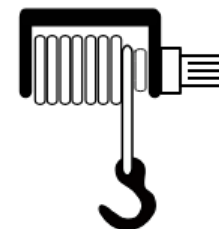


Wind/tidal mill

Experiment with different drive train topologies, design systems for lowest cost of energy.

Select

Help



Winch

Design optimal systems for winches with both motoring and generating operation modes.

Select

Help

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Drive Constructor Textbook Exercises My systems Send feedback

Select topology for your system



Drive train with just variable speed drive

This simple system topology can be used when it is possible to find a motor matching speed of the conveyor drum and when both, the motor and the FC, have similar voltage rating to that of the supply network (the grid).

New system

Help



Drive train with speed gearing

This solution can be used when for example the conveyor drum has too low rated speed to be matched by an available electric motor and the motor and the FC, have similar voltage rating to that of the supply network.

New system

Help

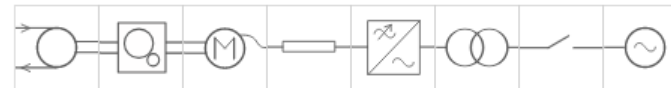


Drive train with voltage step down

In this solution the transformer is used for matching the voltage in the grid and FC's rated voltage and/or for galvanic insulation. It is possible to find a motor matching speed of the conveyor drum without any gearbox.

New system

Help



Drive train with voltage step-down and speed gearing

This solution can be used when the conveyor drum has too low rated speed to be matched by an electric motor, and the transformer is used for matching the voltage in the grid and FC's and/or for galvanic insulation.

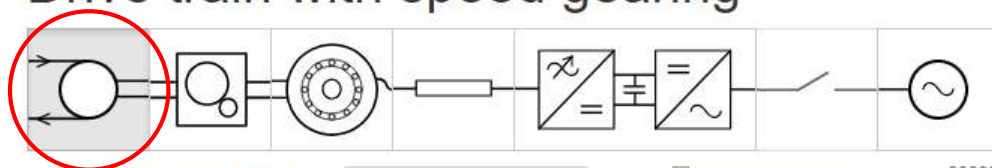
New system

Help

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Drive train with speed gearing



Rated torque, kNm:

Max speed, rpm:

Min speed, rpm:

Starting torque as $\cdot T_{rated}$:

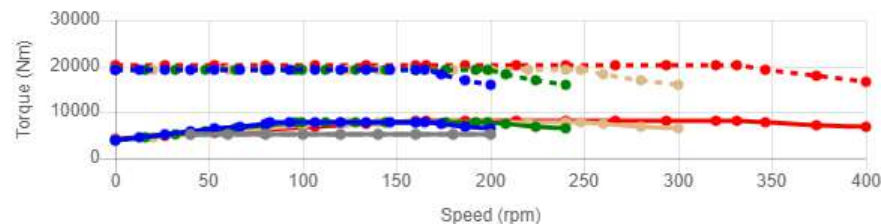
Duty cycle period, min:

Duty, %:

Overload duration, sec:

Overload amplitude, %:

Overload cycle period, sec:



- conveyor
- conveyor-overload
- Gearbox+IM-132-LV-400-SH315-ACS-IP2x-CI-500-B3-IE4
- Gearbox+IM-132-LV-400-SH315-ACS-IP2x-CI-500-B3-IE4-overload
- Gearbox+IM-160-LV-400-SH355-ACS-IP2x-CI-600-B3-IE4
- Gearbox+IM-160-LV-400-SH355-ACS-IP2x-CI-600-B3-IE4-overload
- Gearbox+IM-200-LV-400-SH355-ACS-IP2x-CI-750-B3-IE4
- Gearbox+IM-200-LV-400-SH355-ACS-IP2x-CI-750-B3-IE4-overload
- Gearbox+IM-280-LV-400-SH355-ACS-IP2x-CI-1000-B3-IE4
- Gearbox+IM-280-LV-400-SH355-ACS-IP2x-CI-1000-B3-IE4-overload

Предлагаемые варианты компонентов и их механические характеристики

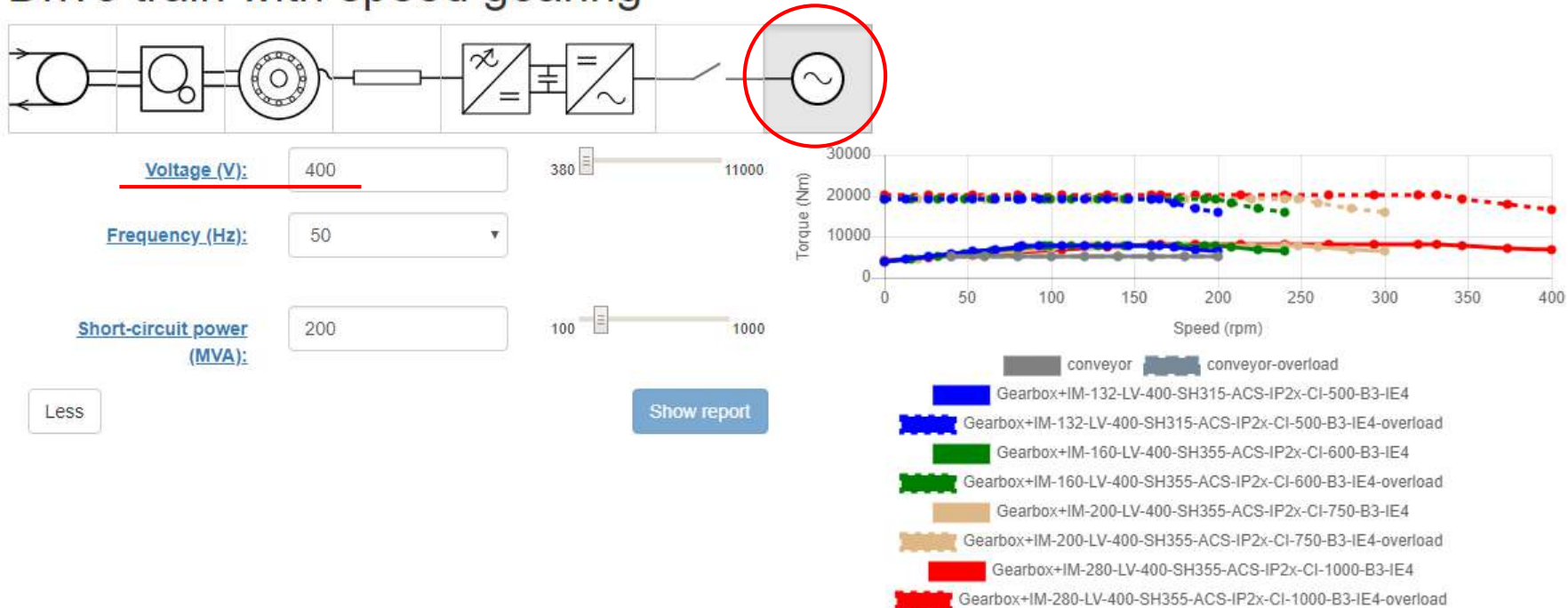
Less

Show report

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

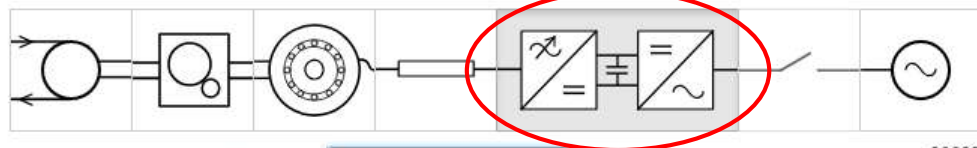
Drive train with speed gearing



DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Drive train with speed gearing



Type: 2Q-2L-VSC-6p

Rated power (low overload), kW: <any>

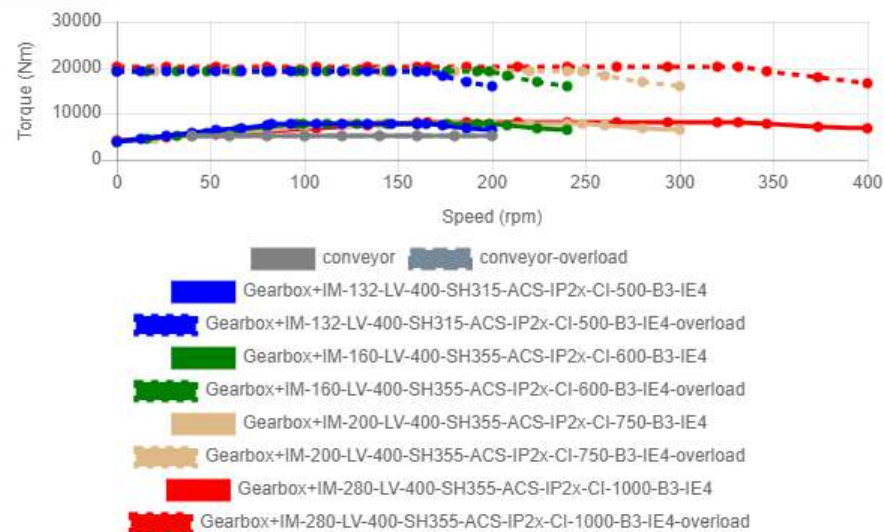
Grid side filter: choke

Machine side filter: no

Cooling: air

Mounting variant: <any>

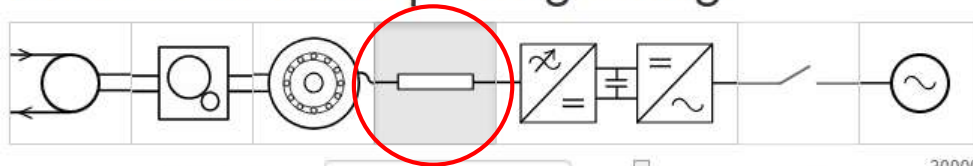
Protection: IP21/31



DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Drive train with speed gearing



Length (m): 30

0 5000

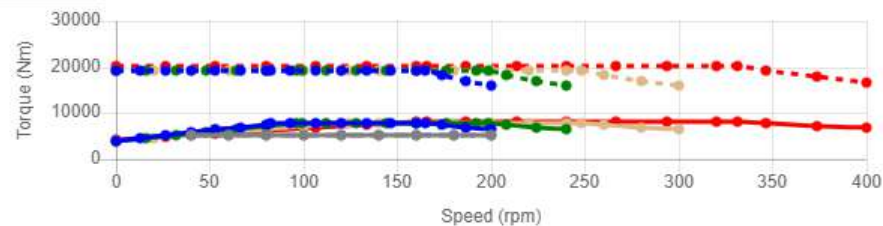
Conductor material: copper

Cross-section of phase conductor (mm²): auto

Number of runs: auto

Less

Show report

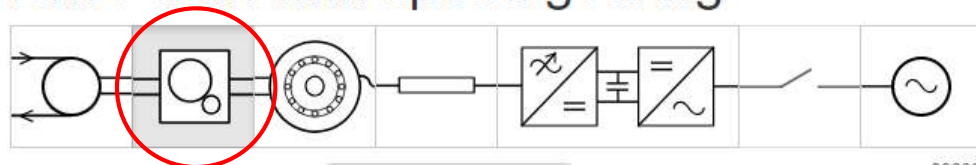


- conveyor
- conveyor-overload
- Gearbox+IM-132-LV-400-SH315-ACS-IP2x-CI-500-B3-IE4
- Gearbox+IM-132-LV-400-SH315-ACS-IP2x-CI-500-B3-IE4-overload
- Gearbox+IM-160-LV-400-SH355-ACS-IP2x-CI-600-B3-IE4
- Gearbox+IM-160-LV-400-SH355-ACS-IP2x-CI-600-B3-IE4-overload
- Gearbox+IM-200-LV-400-SH355-ACS-IP2x-CI-750-B3-IE4
- Gearbox+IM-200-LV-400-SH355-ACS-IP2x-CI-750-B3-IE4-overload
- Gearbox+IM-280-LV-400-SH355-ACS-IP2x-CI-1000-B3-IE4
- Gearbox+IM-280-LV-400-SH355-ACS-IP2x-CI-1000-B3-IE4-overload

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Drive train with speed gearing



Number of stages:

1

Stage 1 type:

helical

Stage 1 ratio:

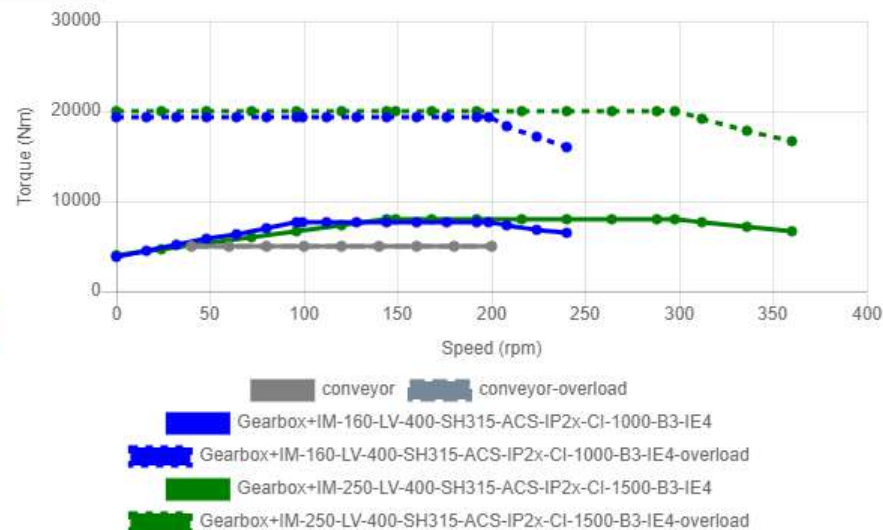
5

3

8

Less

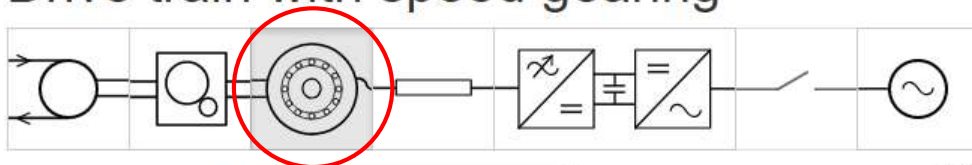
Show report



DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Drive train with speed gearing



Type: SCIM

Rated power, kW: <any>

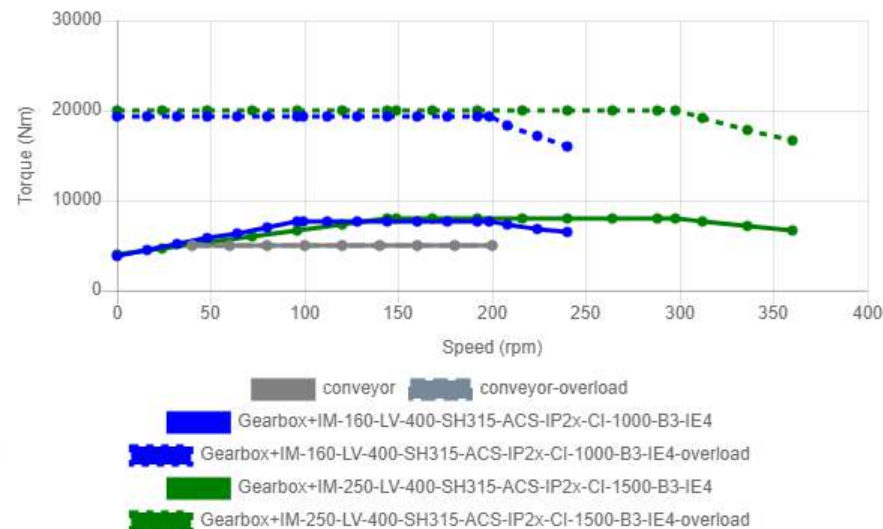
Efficiency class: IE4

Mounting: B3

Altitude, m: 1000

Cooling: self-ventilation

0 5000



DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Gearbox candidates

Дополнительная информация

More.

Select	Price, EUR	Input rated torque (KNm)	Output rated torque (KNm)	Number of stages	Stage 1 type	Stage 1 ratio	Gear ratio	Efficiency @ rated load	Efficiency @ 75%	Efficiency @ 50%	Efficiency @ 25%	Height, m	Width, m	Length, m	Weight, kg	Designation
<input checked="" type="radio"/>	11001	5	0.99	1	helical	5	5	99	98.97	98.21	96.52	0.5404	0.3753	0.4504	132.44	H-5

Electric machine candidates

Дополнительная информация

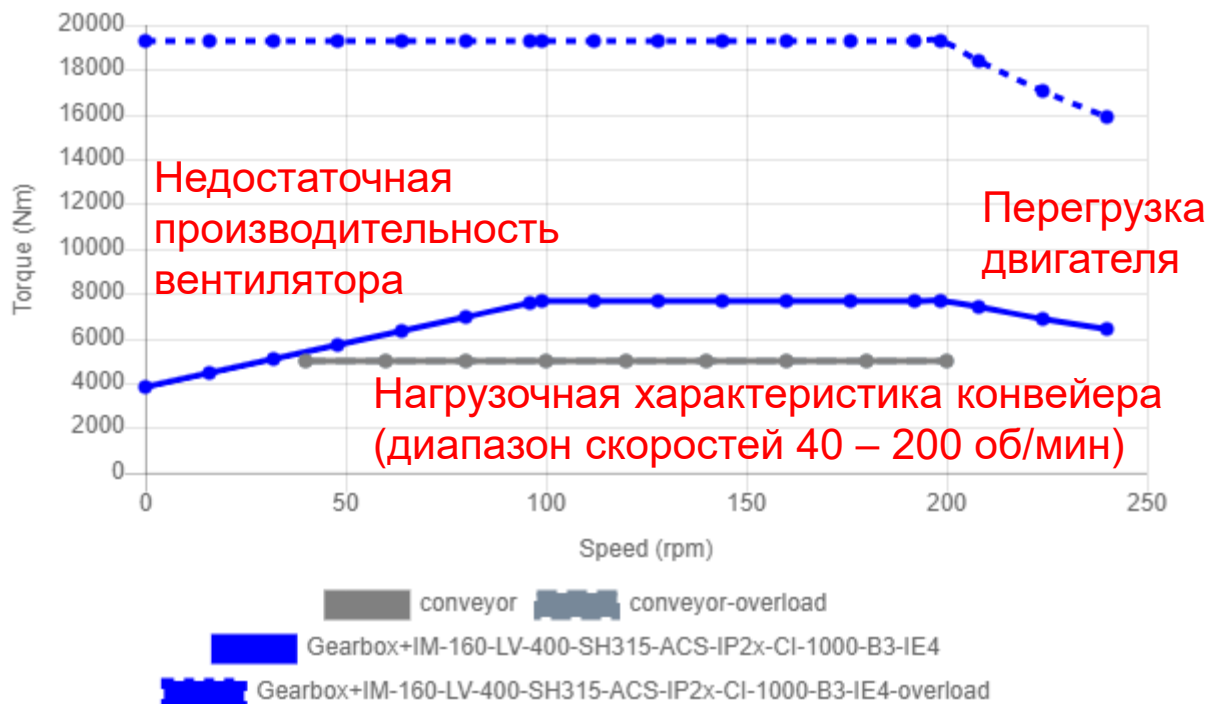
More.

Select	Type	Price, EUR	Rated power, kW	Rated speed	Voltage, V	Efficiency @100% load	Rated current, A	Working current, A	Cooling	Protection	Frame material	Volume, m3	Footprint, m2	Weight, kg	Designation
<input checked="" type="radio"/>	SCIM	36136	<u>160</u>	<u>992.3</u>	360-440	96.6	328.82	215.2	IC411	IP21/23	cast iron	0.3959	0.8001	1382	IM-160-LV-400-SH315-ACS-IP2x-CI-1000-B3-IE4
<input type="radio"/>	SCIM	37752	<u>250</u>	<u>1490</u>	360-440	96.9	481.36	201.62	IC411	IP21/23	cast iron	0.4582	0.9261	1601	IM-250-LV-400-SH315-ACS-IP2x-CI-1500-B3-IE4

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Для выбранного двигателя 160 кВт, 992 об/мин



DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Cable candidates

Select	Length	Price, EUR	Conductor material	Cross-section of phase conductor (mm2)	Voltage rating (kV)	Number of runs	Losses, kW	Efficiency, %	Price per meter	Voltage drop	Reactance (PerHz)	Resistance per meter	Designatio
<input checked="" type="radio"/>	30	1021	copper	150	1	1	0.5377	99.66	34.03	1.67	0.004477	0.000129	CU-3x150-01kV

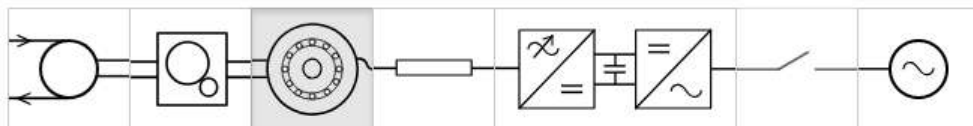
Frequency converter candidates

Select	Type	Price, EUR	Rated power, kW	Voltage, V	Working voltage, V	Rated current HO, A	Cooling	Efficiency @100% load	Mounting variant	Height, m	Width, m	Depth, m	Volume, m3	Footprint, m2	Weight, kg	Designation
<input checked="" type="radio"/>	2Q-2L-VSC-6p	10989	200	360-420	400	240.46	air	98	wall	1	0.5206	0.4	0.2082	0.5206	104.12	2Q-2L-400-200-IP2x-AC-W-6p
<input type="radio"/>	2Q-2L-VSC-6p	13187	200	360-420	400	240.46	air	98	floor	2.2	0.1578	0.6	0.2083	0.3472	104.12	2Q-2L-400-200-IP2x-AC-F-6p

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Drive train with speed gearing



Type: SCIM

Rated power, kW: <any>

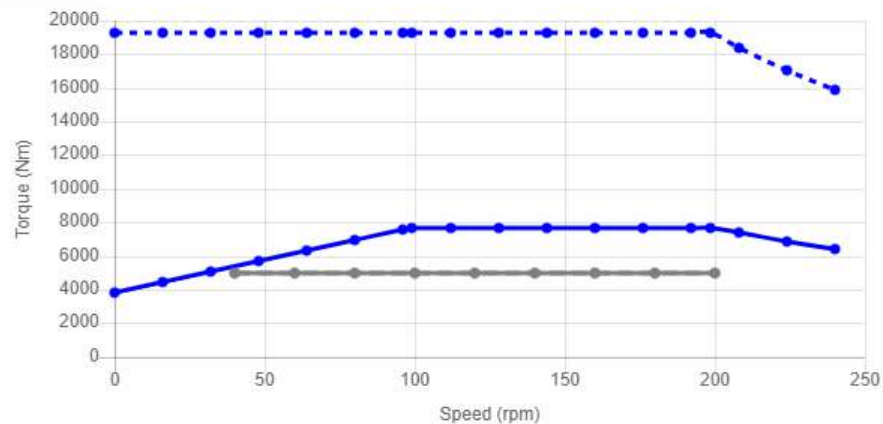
Cooling: self-ventilation

Protection: IP21/23

Frame material: cast iron

More...

Show report



conveyor conveyor-overload

Gearbox+IM-160-LV-400-SH315-ACS-IP2x-CI-1000-B3-IE4

Gearbox+IM-160-LV-400-SH315-ACS-IP2x-CI-1000-B3-IE4-overload

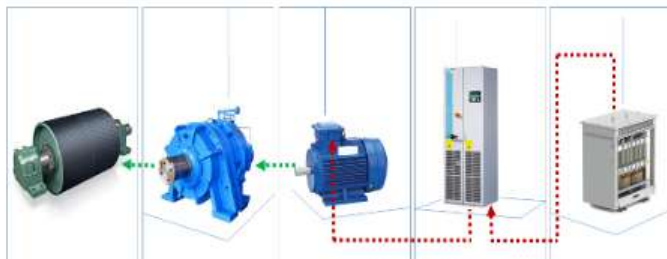
DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Report:



Go back Save system



System

Price, EUR:	59147
Efficiency @ rated load:	93.41
Efficiency @ 75% load:	93.48
Efficiency @ 50% load:	91.28
Efficiency @ 25% load:	85.05
Volume, m3:	0.7
Footprint, m2:	1.52
Weight, kg:	1619

Frequency converter

Type:	2Q-2L-VSC-6p
Price, EUR:	10989
Rated power, kW:	200
Voltage, V:	360-420
Working voltage, V:	400
Rated current HO, A:	240.46
Rated current LO, A:	300.58
Cooling:	air
Efficiency @100% load:	98
Efficiency @75% load:	98.14

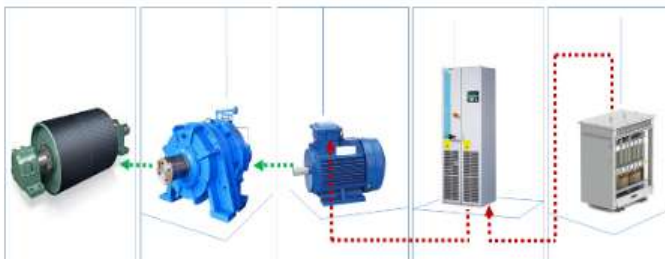
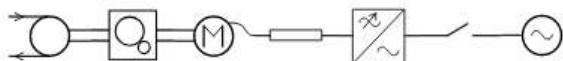
	цена, Евро	вес, кг
ЭМ	36 136	1 382
ПЧ	10 989	104
Система	59 147	1 619

Conveyor

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Report:



Go back **Save system**

System

Price, EUR:	59147
Efficiency @ rated load:	93.41
Efficiency @ 75% load:	93.48
Efficiency @ 50% load:	91.28
Efficiency @ 25% load:	85.05
Volume, m3:	0.7
Footprint, m2:	1.52
Weight, kg:	1619

Save system

Select the system name:

Cancel Save system Save system and compare

Rated current HO, A:	240.46
Rated current LO, A:	300.58
Cooling:	air
Efficiency @100% load:	98
Efficiency @75%	98.14


Conveyor

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Drive Constructor Textbook Exercises **My systems** Send feedback

My systems

Select	Name	Topology	Time update	Price, EUR	Efficiency @ rated load	Efficiency @ 75% load	Efficiency @ 50% load	Efficiency @ 25% load	Volume, m3	Footprint, m2	Weight, kg	THD(u), %	THD(i), %
<input type="checkbox"/>	<u>40-200 об/МИН</u>		03.02.2019, 17:32:28	59146.9	93.41	93.48	91.28	85.05	0.7	1.52	1618.56		

Delete Compare

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Drive Constructor

Textbook

Exercises

My systems

Send feedback

Разработка нового варианта системы – с самого начала

Welcome to DriveConstructor!

Discover the beauty and complexity of the world of standard components. Watch the complete list of tutorials on our [YouTube channel](#).

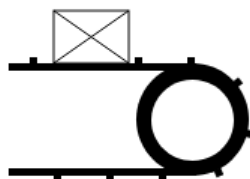


Pumps

Design systems for either low cost or for low energy consumption for various pump type.

Select

Help

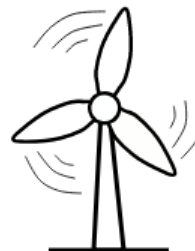


Conveyor

Try different gear solutions and motor speeds to design for lowest cost and compactness.

Select

Help

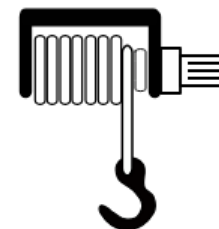


Wind/tidal mill

Experiment with different drive train topologies, design systems for lowest cost of energy.

Select

Help



Winch

Design optimal systems for winches with both motoring and generating operation modes.

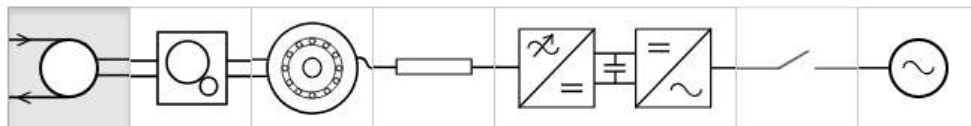
Select

Help

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Drive train with speed gearing



Rated torque, kNm:

Max speed, rpm:

Min speed, rpm:

Starting torque as \hat{T}_{rated} :

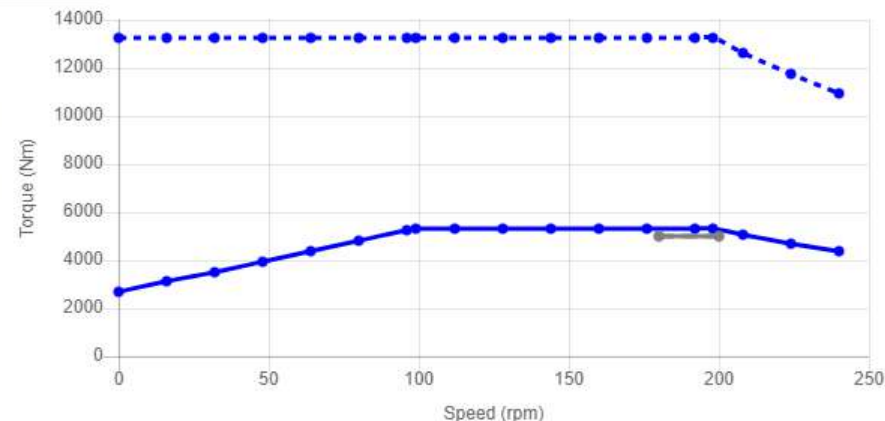
Duty cycle period, min:

Duty, %:

Overload duration, sec:

Overload amplitude, %:

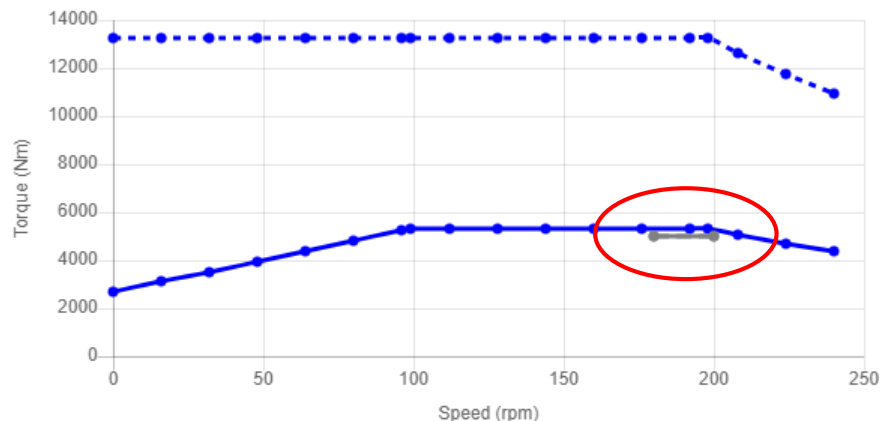
Overload cycle period, sec:



conveyor conveyor-overload
Gearbox+IM-110-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1000-B3-IE4
Gearbox+IM-110-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1000-B3-IE4-overload

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода



Electric machine candidates

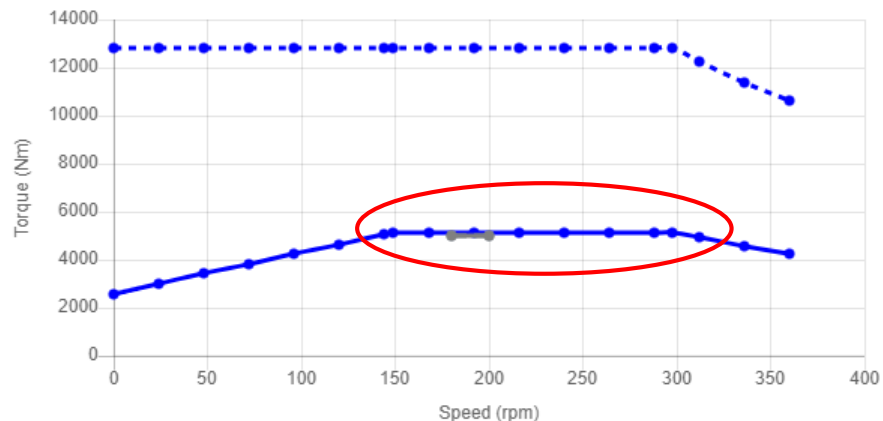
conveyor
 Gearbox+IM-110-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1000-B3-IE4
 Gearbox+IM-110-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1000-B3-IE4-overload

More...

Select	Type	Price, EUR	Rated power, kW	Rated speed	Voltage, V	Efficiency @100% load	Rated current, A	Working current, A	Cooling	Protection	Frame material	Volume, m3	Footprint, m2	Weight, kg	Designation
<input checked="" type="radio"/>	SCIM	28300	<u>110</u>	<u>991.12</u>	360-440	96.2	229.69	218.65	IC411	IP21/23	cast iron	0.2931	0.6664	1025	IM-110-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1000-B3-IE4
<input type="radio"/>	SCIM	28432	<u>160</u>	<u>1488</u>	360-440	96.8	311.09	203.59	IC411	IP21/23	cast iron	0.3202	0.728	1121	IM-160-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1500-B3-IE4

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода



Избыточная мощность ЭМ

Electric machine candidates

conveyor
 conveyor-overload
 Gearbox+IM-160-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1500-B3-IE4
 Gearbox+IM-160-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1500-B3-IE4-overload

More..

Select	Type	Price, EUR	Rated power, kW	Rated speed	Voltage, V	Efficiency @100% load	Rated current, A	Working current, A	Cooling	Protection	Frame material	Volume, m3	Footprint, m2	Weight, kg	Designation	..
<input type="radio"/>	SCIM	28300	110	991.12	360-440	96.2	229.69	218.65	IC411	IP21/23	cast iron	0.2931	0.6664	1025	IM-110-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1000-B3-IE4	..
<input checked="" type="radio"/>	SCIM	28432	160	1488	360-440	96.8	311.09	203.59	IC411	IP21/23	cast iron	0.3202	0.728	1121	IM-160-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1500-B3-IE4	..

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Frequency converter candidates

Варианты ПЧ не изменились

More...

Select	Type	Price, EUR	Rated power, kW	Voltage, V	Working voltage, V	Rated current HO, A	Cooling	Efficiency @100% load	Mounting variant	Height, m	Width, m	Depth, m	Volume, m3	Footprint, m2	Weight, kg	Designation	..
<input checked="" type="radio"/>	2Q-2L-VSC-6p	10989	200	360-420	400	240.46	air	98	wall	1	0.5206	0.4	0.2082	0.5206	104.12	2Q-2L-400-200-IP2x-AC-W-6p	..
<input type="radio"/>	2Q-2L-VSC-6p	13187	200	360-420	400	240.46	air	98	floor	2.2	0.1578	0.6	0.2083	0.3472	104.12	2Q-2L-400-200-IP2x-AC-F-6p	..

	цена, Евро	вес, кг
ЭМ	28 300	1 025
ПЧ	10 989	104
Система	51 311	1 262

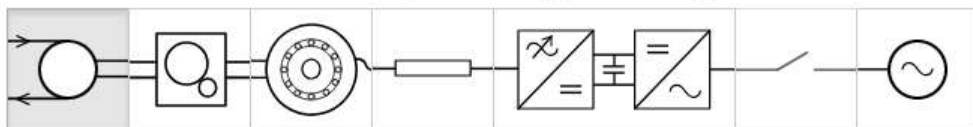
Save system

Select the system name:

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Drive train with speed gearing



Третий вариант

Rated torque, kNm:

Max speed, rpm:

Min speed, rpm:

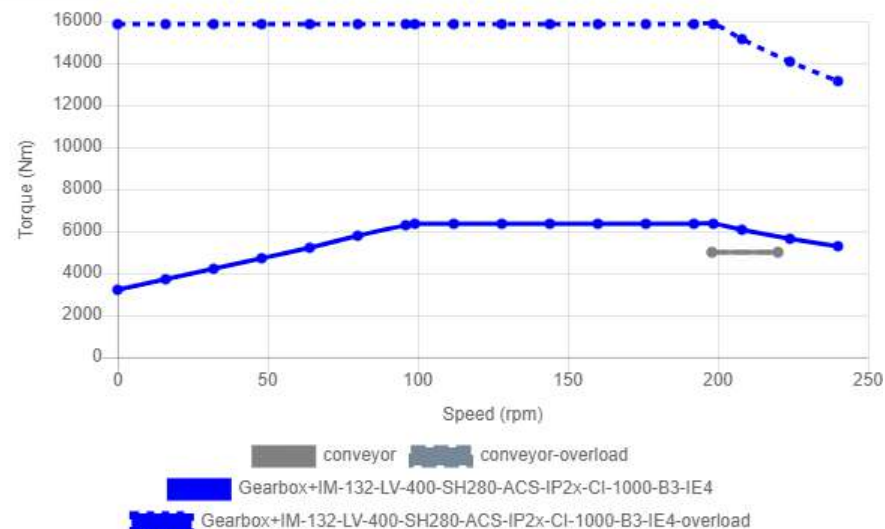
Starting torque as $\cdot T_{rated}$:

Duty cycle period, min:

Duty, %:

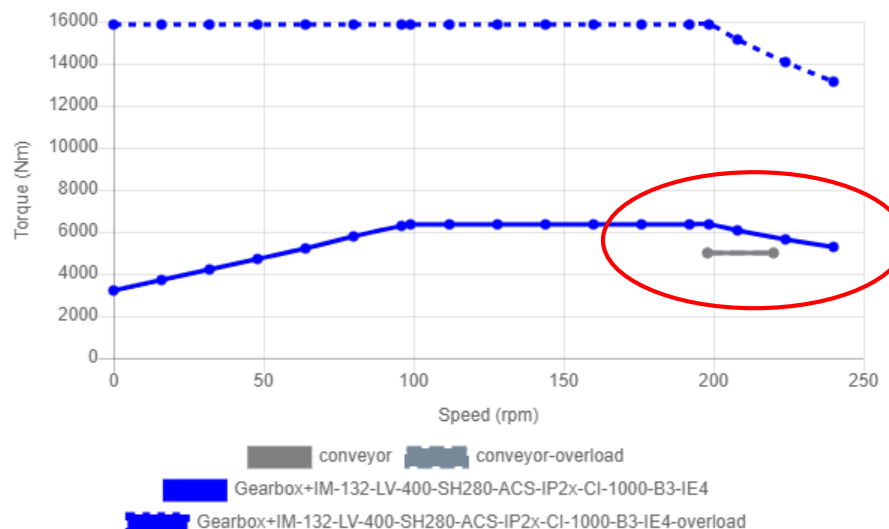
Overload duration, sec:

Overload amplitude, %:



DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода



Electric machine candidates

Select	Type	Price, EUR	Rated power, kW	Rated speed	Voltage, V	Efficiency @100% load	Rated current, A	Working current, A	Cooling	Protection	Frame material	Volume, m3	Footprint, m2	Weight, kg	Designation
<input checked="" type="radio"/>	SCIM	31895	<u>132</u>	991.71	360-440	96.5	273.2	238.39	IC411	IP21/23	cast iron	0.3399	0.7728	1185	IM-132-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1000-B3-IE4
<input type="radio"/>	SCIM	28432	<u>160</u>	1488	360-440	96.8	311.09	223.95	IC411	IP21/23	cast iron	0.3202	0.728	1121	IM-160-LV-400-SH280-ACS-IP2x-CI-1500-B3-IE4

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

	цена, Евро	вес, кг
ЭМ	31 895	1 185
ПЧ	10 989	104
Система	54 906	1 422

Save system

Select the system name:

Cancel Save system Save system and compare

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

My systems

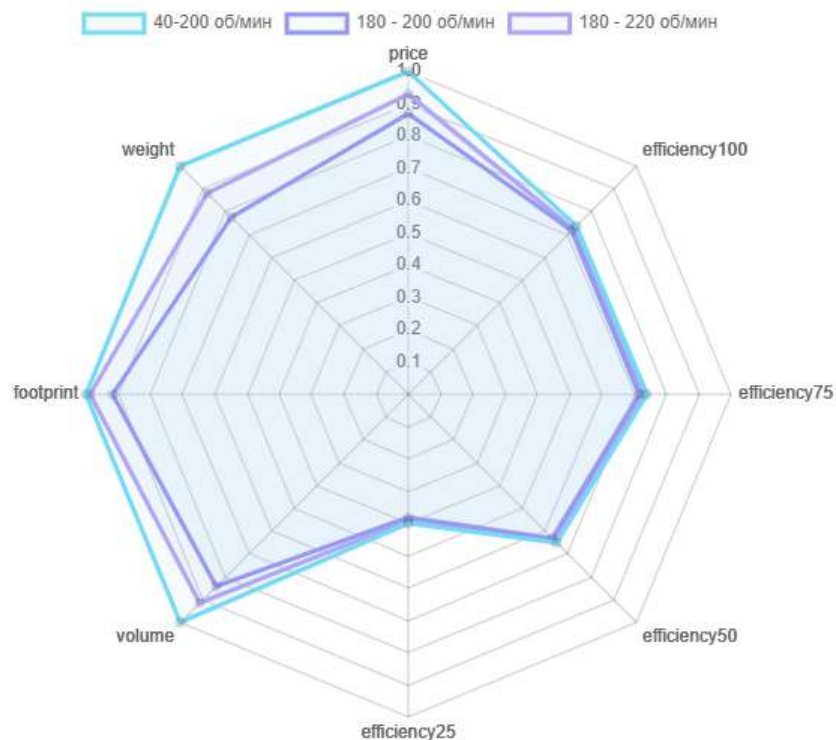
Select	Name	Topology	Time update	Price, EUR	Efficiency @ rated load	Efficiency @ 75% load	Efficiency @ 50% load	Efficiency @ 25% load	Volume, m3	Footprint, m2	Weight, kg	THD(u), %	THD(i), %
<input checked="" type="checkbox"/>	40-200 об/мин		03.02.2019, 17:32:28	59146.9	93.41	93.48	91.28	85.05	0.7	1.52	1618.56	THD(u), %	THD(i), %
<input checked="" type="checkbox"/>	180 - 200 об/мин		03.02.2019, 18:31:38	51310.9	92.86	92.94	90.75	84.55	0.59	1.39	1261.56	THD(u), %	THD(i), %
<input checked="" type="checkbox"/>	180 - 220 об/мин		03.02.2019, 18:51:10	54905.9	93.16	93.23	91.03	84.82	0.64	1.5	1421.56	THD(u), %	THD(i), %

Delete Compare

DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

Comparison:



DriveConstructor – пример расчета

Влияние диапазона скоростей конвейера на систему привода

40-200	цена, Евро	вес, кг
ЭМ	36 136	1 382
ПЧ	10 989	104
Система	59 147	1 619

180-200	цена, Евро	вес, кг
ЭМ	28 300	1 025
ПЧ	10 989	104
Система	51 311	1 262

180-220	цена, Евро	вес, кг
ЭМ	31 895	1 185
ПЧ	10 989	104
Система	54 906	1 422

Емкостные электрические машины

Индуктивные и емкостные электрические машины

Индуктивные машины – электромеханическое преобразование энергии при взаимодействии токов обмоток и магнитного поля. Конструкция – оптимальная для больших индуктивностей (обмотки и сердечник +воздушный зазор для обеспечения вращения ротора)

Поле всегда электромагнитное, но в индуктивных ЭМ электрическое поле пренебрежимо мало

Емкостные машины – взаимодействие зарядов в электрическом поле. Конструкция – на базе конденсаторов (электроды и диэлектрик +воздушный зазор для обеспечения вращения ротора)

В отсутствие стали магнитное поле пренебрежимо мало

Терминология: Capacitive Machine; Electrostatic Motor

Емкостные электрические машины

Индуктивные и емкостные электрические машины

Причина преобладания индуктивных машин – свойства материалов

Плотность энергии магнитного поля $w_m = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu_r\mu_0}$

Основная энергия магнитного поля – в зазоре: $\mu_r = 1$; $B_\delta = 1$ Тл

Тогда, плотность энергии $w_m = \frac{1^2}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} \approx 400\,000 \text{ Вт / м}^3$

Плотность энергии электрического поля $w_\varepsilon = \frac{DE}{2} = \frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 E^2}{2}$

При наличии воздушного зазора ($\varepsilon_r = 1$) достижимая напряженность электрического поля в воздухе $E_\delta = 10^7$ В/м

Тогда, плотность энергии $w_m = \frac{8.86 \cdot 10^{-12} \cdot (10^7)^2}{2} \approx 450 \text{ Вт / м}^3$

Емкостные электрические машины

Индуктивные и емкостные электрические машины

Области конкурентоспособности емкостных машин:

- новые материалы с высокой диэлектрической проницаемостью ε_r
- малые размеры: плотность момента в емкостной машине растет с уменьшением размеров, а в индуктивной машине не зависит от размеров → преимущество у микроскопических емкостных машин

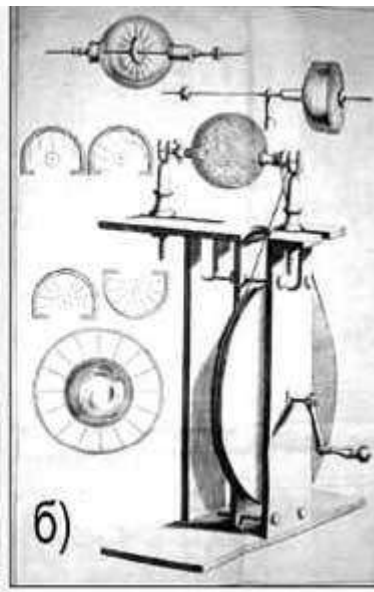
Достоинства емкостных машин:

- легкая конструкция без магнитопровода и многовитковых обмоток
- конструкция может быть двумерной

Емкостные электрические машины

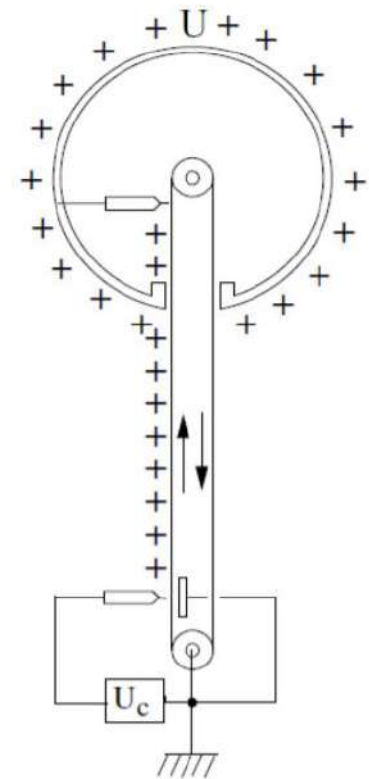
Первые электрические машины - емкостные

Период исследований и открытий



янтарь, стекло

электрофорная
машина



генератор
Ван-де-Граафа

Емкостные электрические машины

Современные реализации емкостных ЭМ



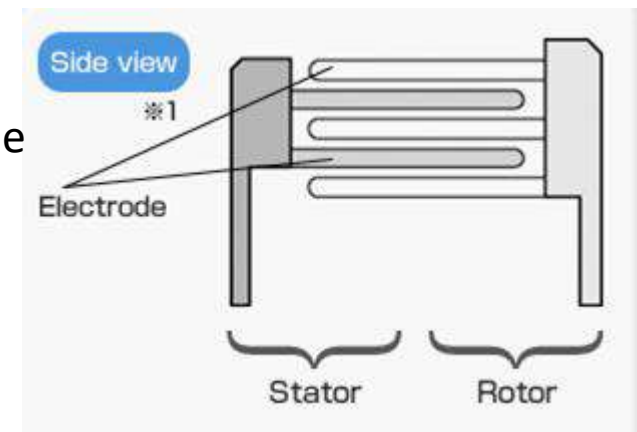
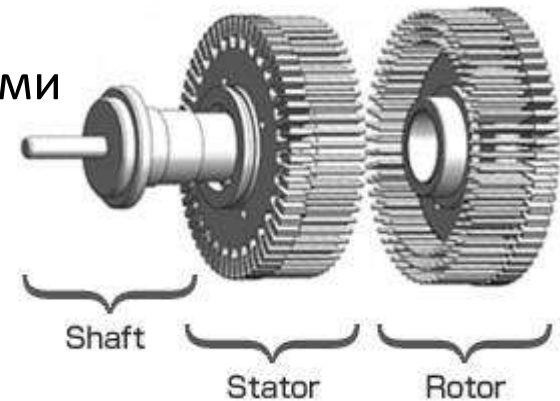
Вращение ротора за счет сил притяжения и отталкивания между заряженными электродами

- большое число пар электродов
- несколько чередующихся рядов электродов
- высокое напряжение



Проблемы:

- искрение между электродами
- аэродинамические потери



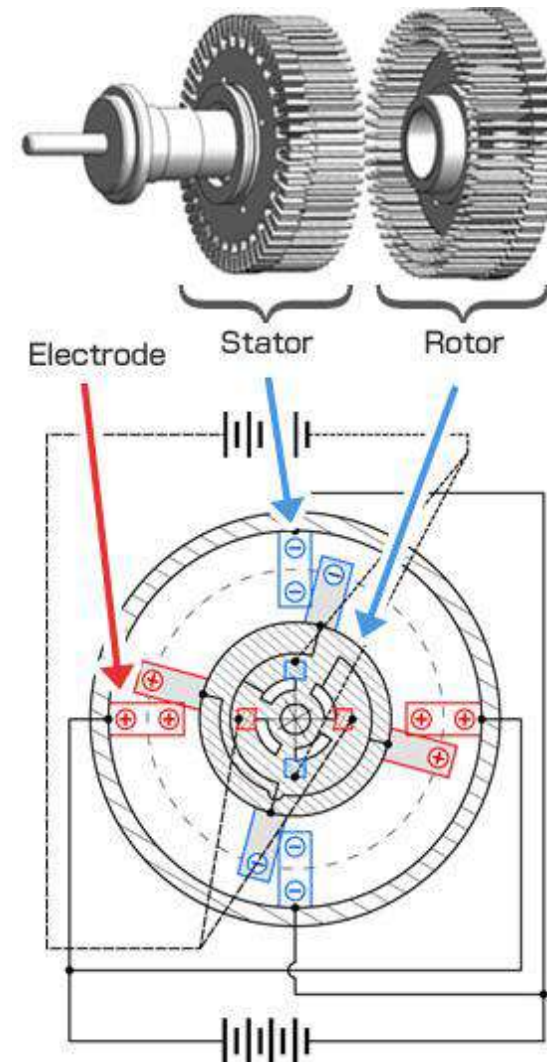
Ёмкостные электрические машины

Современные реализации ёмкостных ЭМ



коммутатор (коллектор) обеспечивает изменение полярности электродов для непрерывного вращения

Maximum Speed	10,000 [rpm]
Maximum Torque	0.1 [Nm]
Power	100 [W]
Size	Diameter:65 [mm]、 Length:65 [mm]
Weight	200 [g]
Feature	High Efficiency >95% !! in Vacuum operation is OK in High Magnetic Field is OK

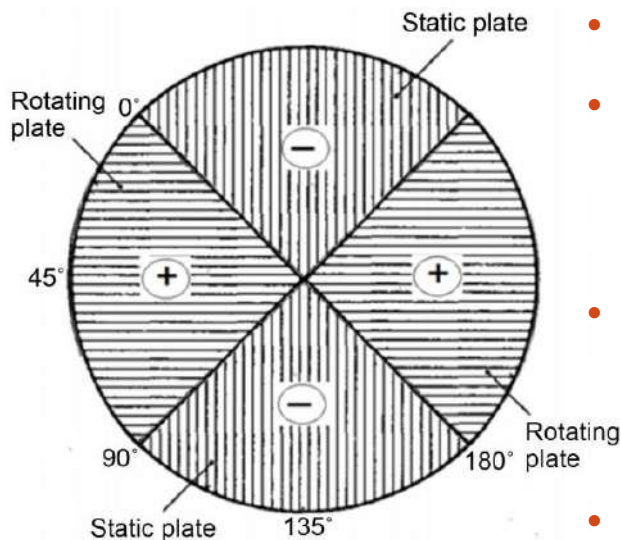


Емкостные электрические машины

Современные реализации емкостных ЭМ

Машина постоянного тока/напряжения (Sectored Capacitor)

Arie Shenkman, Saad Tapuchi, Dmitry Baimel / Shamoon College of Engineering, Beer Sheva, Israel



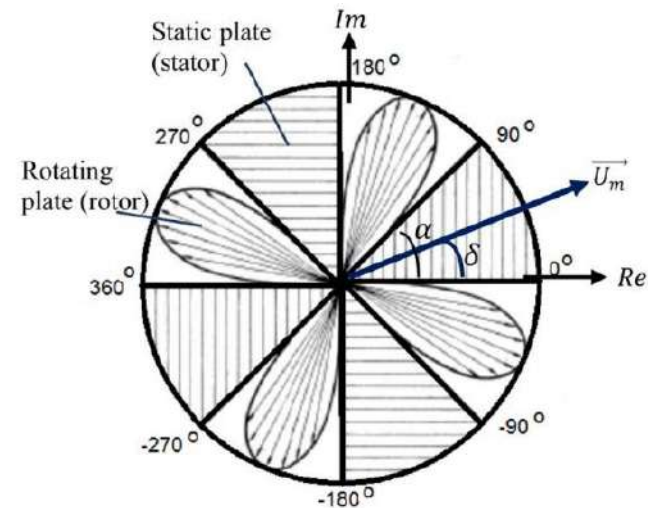
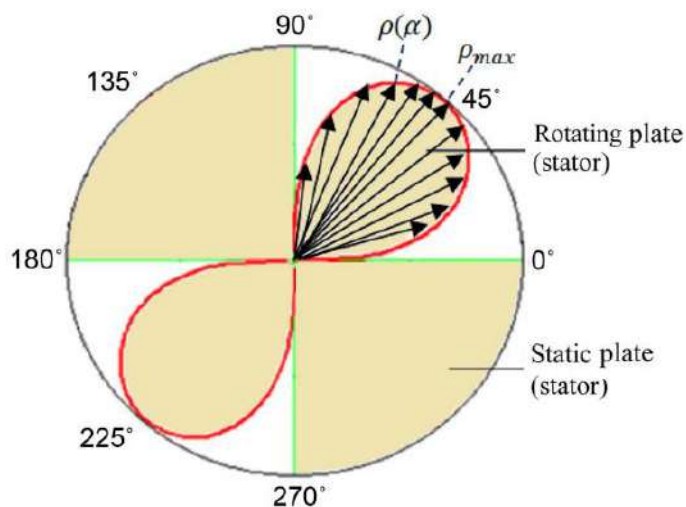
- разная полярность зарядов на статоре и роторе
- притяжение разноименных зарядов
- изменение емкости плоского конденсатора – изменение запасенной в нем энергии – вращающий момент
- для непрерывного вращения необходима коммутация зарядов на роторе (щетками и коллектором)
- для плавного вращения желательно иметь 3 пары секторов

Емкостные электрические машины

Современные реализации емкостных ЭМ

Машина переменного тока/напряжения (Sectored Capacitor)

Arie Shenkman, Saad Tapuchi, Dmitry Baimel / Shamoon College of Engineering, Beer Sheva, Israel



- форма роторного сектора обеспечивает \sin изменение емкости при повороте ротора
- при питании U_{DC} средний момент = 0
- при питании U_{\sin} средний момент зависит от угла нагрузки между U и осью ротора

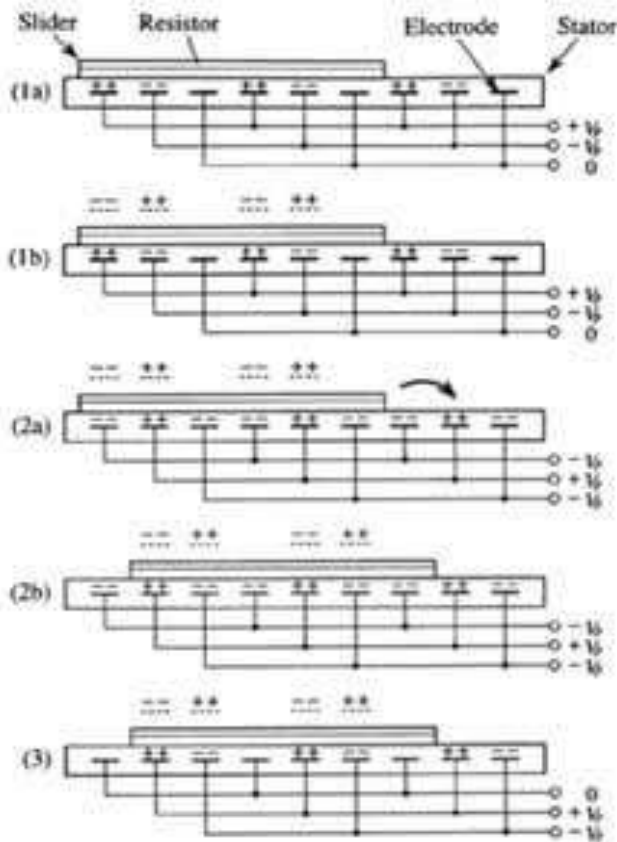
Емкостные электрические машины



Современные реализации емкостных ЭМ

Advanced Mechatronics Lab, Dep. of Precision Engineering

Импульсный двигатель



- Пленочный статор с параллельными электродами, покрытый изолятором
- Пленочный бегунок из материала с большим сопротивлением

Принцип действия:

- вкл.питания – электризация (противополож. заряды на пленке) – притяжение к статору
- коммутация - отталкивание одноименных зарядов (левитация), притяжение к следующим электродам с противополож. зарядами
- притяжение к статору в новом положении – восстановление зарядов на пленке

Шаговый двигатель

Емкостные электрические машины



Современные реализации емкостных ЭМ

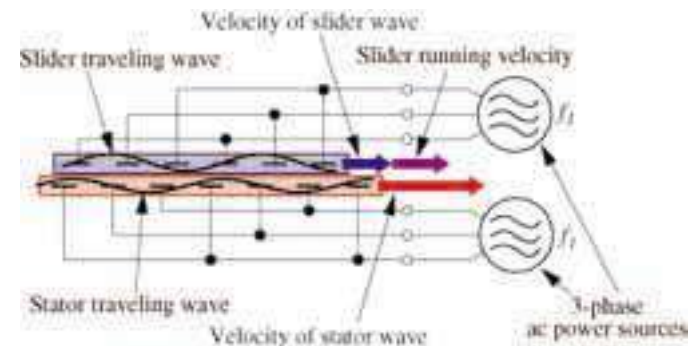
Advanced Mechatronics Lab, Dep. of Precision Engineering

Двигатель двойного питания (разной частоты)

- И статор и бегунок имеют параллельные электроды, покрытые изолятором
- Частоты 3-фазного напряжения разные

Принцип действия :

- 3-фазное напряжение – бегущая волна потенциала – притяжение волн статора и бегунка
- усилие зависит от пространственного сдвига двух волн
- синхронный двигатель: скорость бегунка $v = 3p(f_1 - f_2)$



Требуемое напряжение – около 1000 В

Для защиты от пробоя – диэлектрич.жидкость

Для скольжения – стеклянные бусины 20 мкм

Емкостные электрические машины



Современные реализации емкостных ЭМ

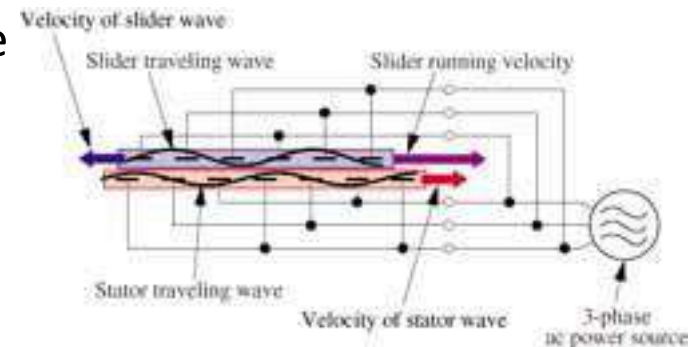
Advanced Mechatronics Lab, Dep. of Precision Engineering

Двигатель двойного питания (одной частоты)

- И статор и бегунок имеют параллельные электроды, покрытые изолятором
- Разное чередование фаз, одинаковое питание

Принцип действия :

- бегущая волна потенциала – в разные стороны на статоре и бегунке
- для взаимодействия двух волн бегунок должен двигаться вдвое быстрее волны статора
- синхронная скорость бегунка $v = 6pf$



Бегунок весом 3,5 гр
развивает усилие 4,4 Н
при $U_{rms} = 2500$ В

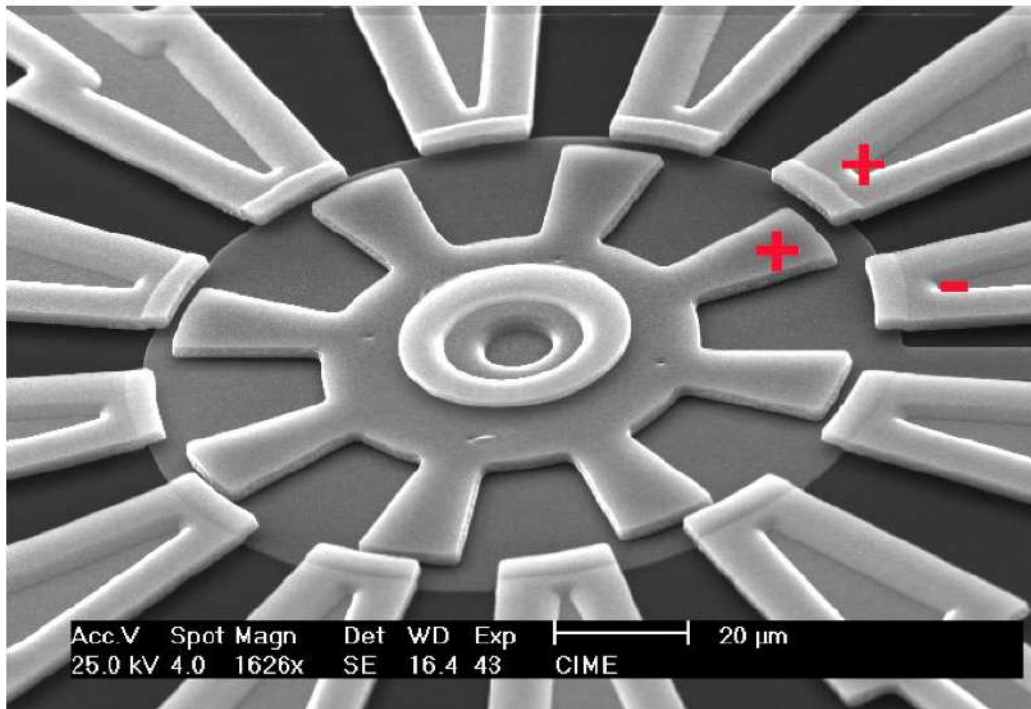
Макс.мощность 1,6 Вт
при скорости 0,53 м/с

Удельная мощность
– 230 Вт/кг!

Емкостные электрические машины

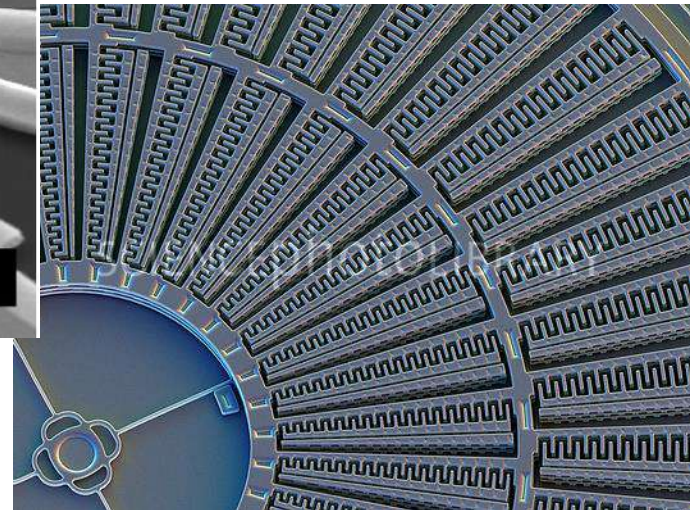
Современные реализации емкостных ЭМ

Микроэлектромеханические системы (MEMS)



Бегущая волна потенциала –
притяжение/отталкивание

Притяжение/отталкивание электродов
– волна деформации конструкции

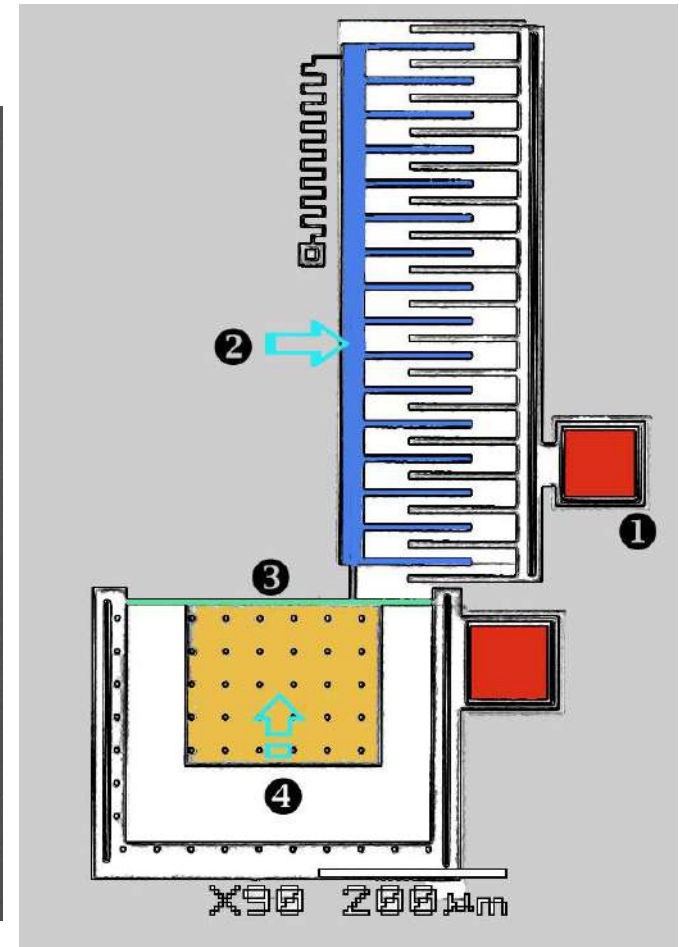
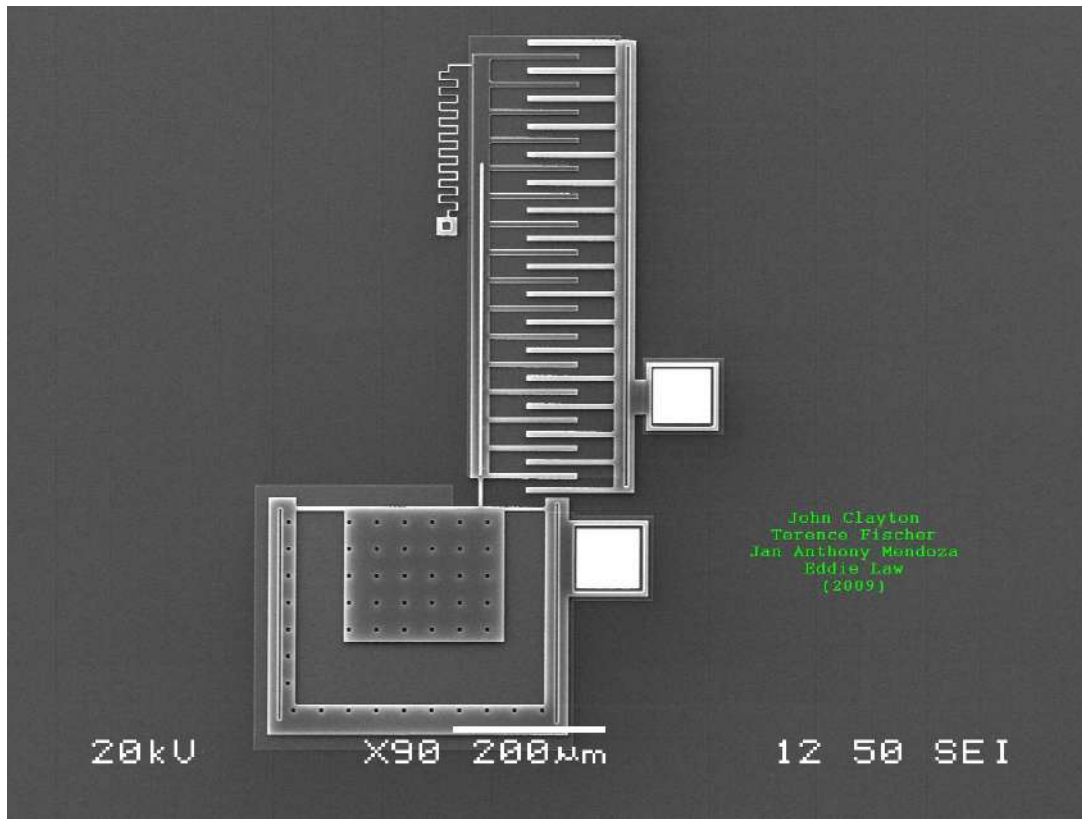


Ёмкостные электрические машины

Современные реализации ёмкостных ЭМ

Микроэлектромеханические системы (MEMS)

Микроактуатор – отклонение зеркала



Вентильно-индукторный двигатель

- Switched Reluctance Motor
- вентильно-реактивный двигатель
- управляемый вентильный реактивный двигатель
- коммутируемый реактивный двигатель с переменным магнитным сопротивлением
- шаговый двигатель в режиме постоянного вращения

«интеллектуальный» электромеханический преобразователь:

Индукторная машина +
система регулируемого
электропривода

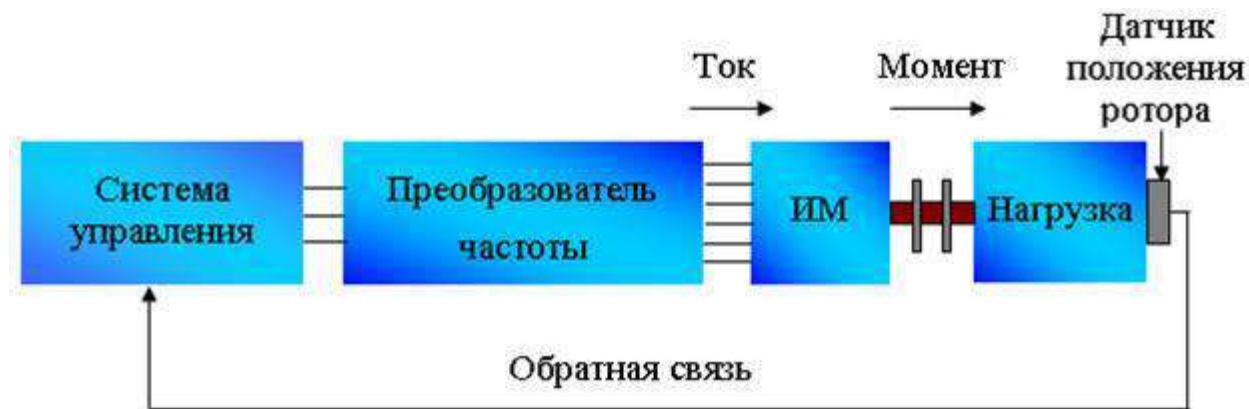


Вентильно-индукторный двигатель

- Преобразователь частоты – питание фаз индукторной машины импульсами напряжения заданной формы
- Индукторная машина – электромеханическое преобразование энергии
- Система управления – реализует алгоритм управления питанием фаз

НО индукторная машина не может работать без ПЧ и СУ

ВИД появились в 80-е благодаря развитию силовой электроники и микропроцессорного управления



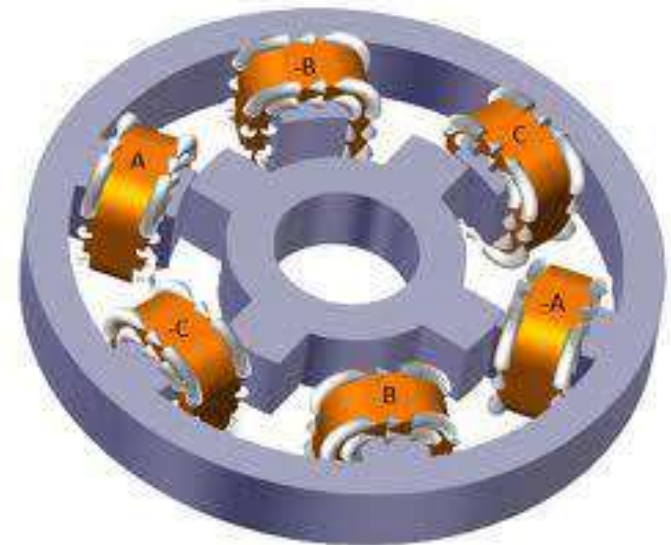
Вентильно-индукторный двигатель

Конструкция ИМ:

- Сердечники статора и ротора (шихтованные) с явно выраженными полюсами
- Правильное соотношение чисел полюсов статора и ротора: 2/2, 4/2, 6/4, 8/6, 10/8, 12/10, 14/12
- Обмотка статора на полюсах – сосредоточенная катушечная одно- или многофазная
- Фаза обмотки: 2 (или 4) катушки на диаметрально противоположных полюсах
- Пассивный ротор (нет обмоток и ПМ)



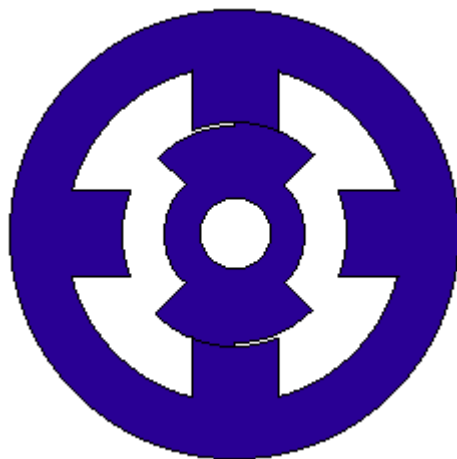
Three-phase SR Drive® stator and rotor



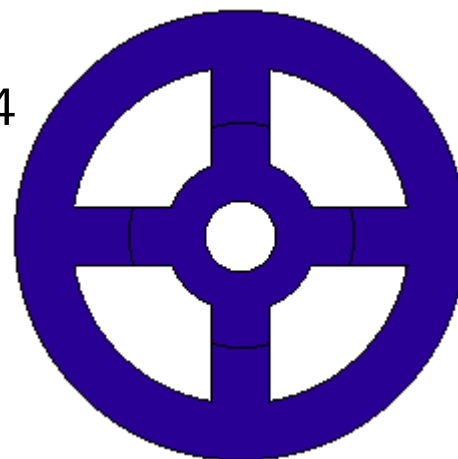
Вентильно-индукторный двигатель

Конструкция ИМ:

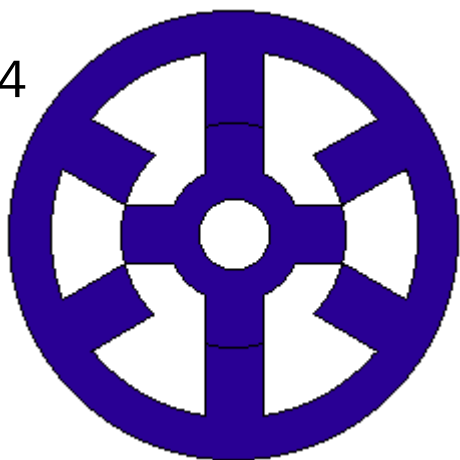
$m=1, 2/2$



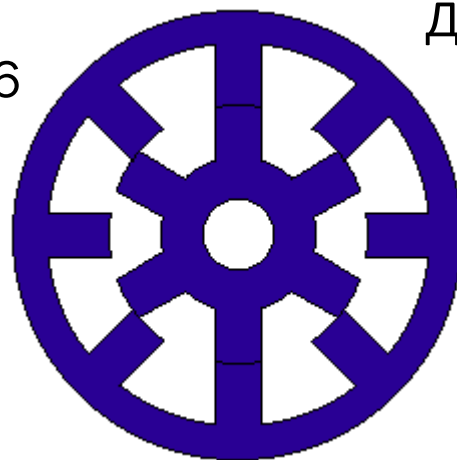
$m=2, 4/4$



$m=3, 6/4$



$m=4, 8/6$



Другие конфигурации

$m=5, 10/8$

$m=6, 12/10$

$m=7, 14/12$

Вентильно-индукторный двигатель

Шумы и вибрации

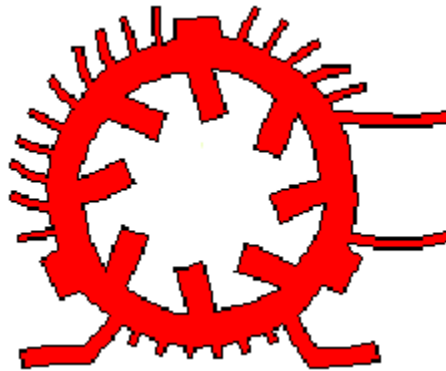
Электромагнитные силы взаимодействия сердечников:

- азимутальная составляющая → вращающий момент
- радиальная составляющая → деформация сердечника

Деформация сердечника статора → вибрации → излучение звуковых волн

При совпадении гармоники радиальной силы с частотой собственных колебаний – механический резонанс – возрастание амплитуды деформаций и излучаемого шума

Шум – один из основных недостатков ВИД



Вентильно-индукторный двигатель

Достоинства

- Простота конструкции, отсутствие скользящих контактов
- Надежность и долговечность электрической машины
- Возможность получения любой частоты вращения
- Способность подстраиваться под сложные режимы работы
- Широкий диапазон регулирования (плавно и экономично)
- Создание привода прямого действия (direct drive)

Недостатки

- Повышенный уровень шумов и вибраций (пульсации момента, радиальные тяжения)
- Необходимость в датчике положения
- Повышенный отход при штамповке листов сердечника
- Несинусоидальные токи → влияние на сеть → необходимость фильтров

Вентильно-индукторный двигатель

Учебные пособия:



Кафедра ЭМЭА

Электронная библиотека для студентов-электромехаников

- Учебно-методический комплекс **Электрические машины**
- Учебно-методический комплекс **Электрические машины автоматических устройств**
- Учебно-методический комплекс **Электромагнитные расчеты**
- Учебно-методический комплекс **Универсальный метод анализа электрических машин**
- Учебно-методический комплекс **Специальные электрические машины**

Онлайн-курсы и тренажеры

- Онлайн-курс **DriveConstructor по-русски**

Учебные пособия

- Проектирование вентильных индукторных двигателей
- ~~Вентильно-индукторные двигатели~~ *Курсовое ВД*
- Применение полевых методов в электромагнитных машинах
- Магнитогидродинамические электрические машины
- Линейные индукционные электрические машины
- Анализ электрических цепей с электронными компонентами
- Новые Информационные Технологии. Конспект лекций
- ANSYS - Пример расчета трехмерного статического поля
- Численные расчеты электромагнитных полей в электрических машинах
- Асинхронные двигатели серии 4А

elmech.mpei.acru/books/edu/SRM_design/index.html

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

В.Г. ФИСЕНКО, А.Н. ПОПОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНЫХ ИНДУКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Методическое пособие по курсу
“Специальная электромеханика”

Главная
Введение
Проектирование
Заключение
Приложение

Вентильно-индукторный двигатель

Учебные пособия:



Кафедра ЭМЭА

Электронная библиотека для студентов-электромехаников

- Учебно-методический комплекс **Электрические машины**
- Учебно-методический комплекс **Электрические машины автоматических устройств**
- Учебно-методический комплекс **Электромагнитные расчеты**
- Учебно-методический комплекс **Универсальный метод анализа электрических машин**
- Учебно-методический комплекс **Специальные электриче**

Онлайн-курсы и тренажеры

- Онлайн-курс **DriveConstructor по-русски**

Учебные пособия

- Проектирование вентильных индукторных двигателей. *Ф.*
- **Вентильно-индукторные двигатели. Кузнецов В.А., Кузьмич**
- **Применение полевых методов в электромагнитных расчетах:**
- Магнитогидродинамические электрические машины и уст
- Линейные индукционные электрические машины. Учебно
- Анализ электрических цепей с электронными компонента
- Новые Информационные Технологии. Конспект лекций. *Ш.*
- ANSYS - Пример расчета трехмерного статического магни
- Численные расчеты электромагнитных полей в электриче
- Асинхронные двигатели серии 4А

[В.А. КУЗНЕЦОВ, В.А. КУЗЬМИЧЕВ](#)

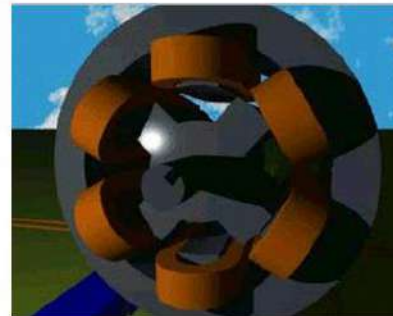
ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

по курсу

“Специальные электрические машины”

для студентов, обучающихся по направлению 180100 “электромеханика”



Вентильно-индукторный двигатель

Учебные пособия:

Учебно-методический комплекс
"Специальные электрические машины"

Содержание курса

1. Введение
2. Онлайн курс [DriveConstructor](#)
3. Емкостные электрические машины
 - [Индуктивные и емкостные ЭМ](#)
 - [Области применения емкостных ЭМ](#)
 - [Современные реализации емкостных ЭМ](#)
 - [Микроэлектромеханические системы](#)

[Рекомендуемая литература](#)

[Лабораторные работы. Часть 1.](#)
[Лабораторная работа № 4.](#)

[DriveConstructor по-русски \(сайт\)](#)

[Расчетное задание](#)

[Учебное пособие В.Г. Фисенко, А.Н. Попов "Проектирование ВПД" \(web-интерфейс\)](#)

[Учебное пособие В.Г. Фисенко, А.Н. Попов "Проектирование ВПД" \(pdf\)](#)

[Расчетный файл MathCAD \(скачать zip-архив\)](#)

Вентильно-индукторный двигатель

Принцип работы индукторной машины:

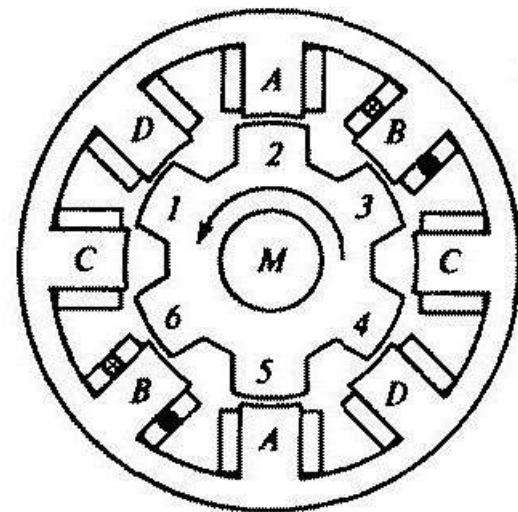
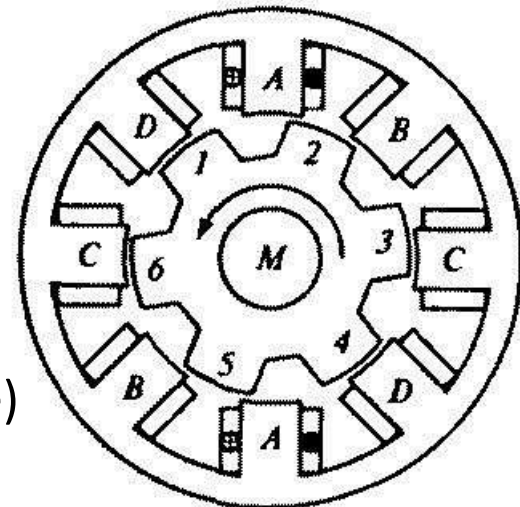
- Ротор поворачивается в положение с наибольшей магнитной проводимостью для магнитного потока

В положении 1 включается питание фазы *A*

Ротор стремится к положению, когда полюсы 2 и 5 совпадут с осью фазы *A* (согласованное положение) [в согласованном положении момент = 0 и ротор зафиксирован потоком фазы *A*]

При отключении фазы *A* и включении фазы *B* ротор стремится к положению, когда полюсы 3 и 6 совпадут с осью фазы *B*

Для сохранения непрерывного вращения и получения максимального момента лучше заранее отключить *A* и включить *B* (при этом тока фазы *A* минимален, как и накопленная магнитная энергия)



Вентильно-индукторный двигатель

Принцип работы индукторной машины:

Последовательная коммутация фаз обеспечивает однонаправленное вращение ротора (для управления коммутацией используют сигнал датчика положения ротора)

- Одиночная симметричная коммутация

$A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A \rightarrow \dots$

Аналогично индукторному двигателю: $n = \frac{60 f_1}{Z_R}$

- Парная симметричная коммутация

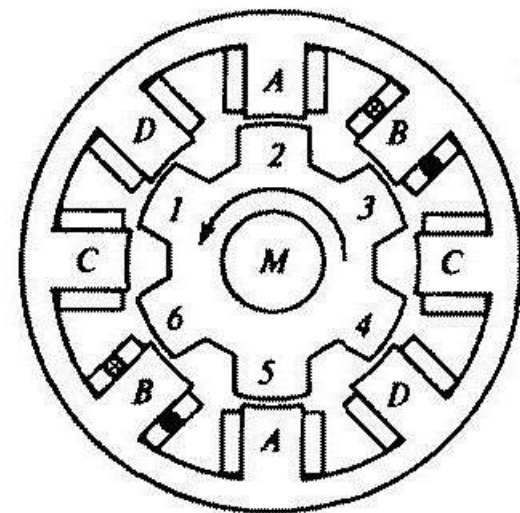
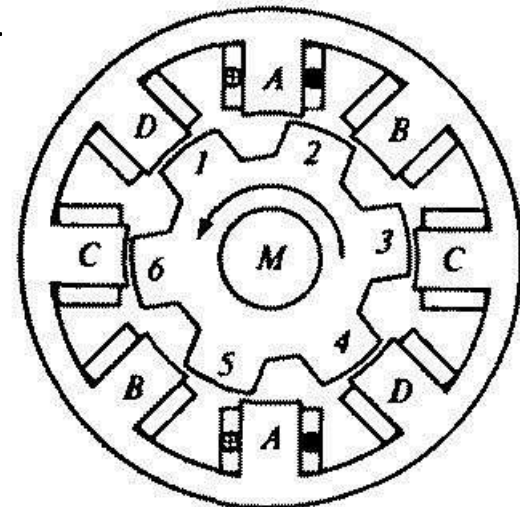
$AB \rightarrow BC \rightarrow CD \rightarrow DA \rightarrow AB \rightarrow \dots$

$$n = \frac{120 f_1}{Z_R}$$

- Несимметричная коммутация

$A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CD \rightarrow D \rightarrow DA \rightarrow A \rightarrow \dots$

$$n = \frac{90 f_1}{Z_R}$$



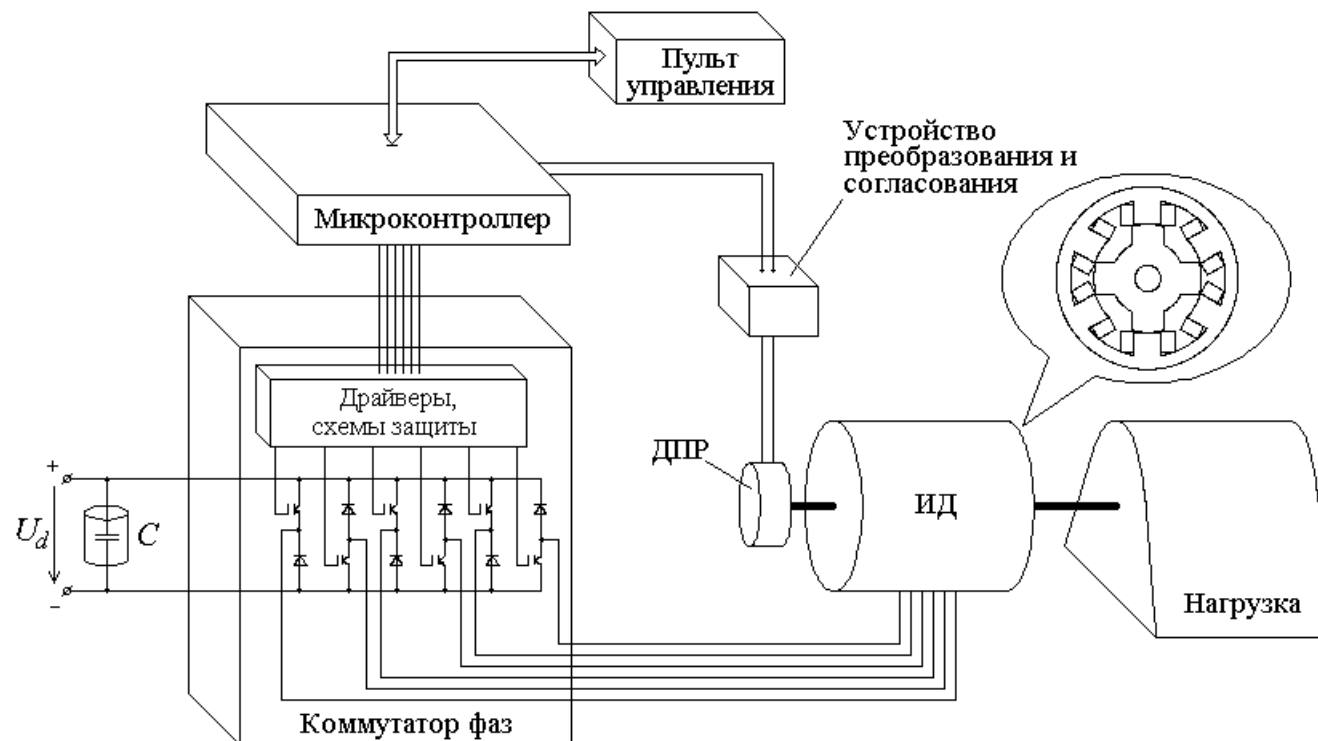
Вентильно-индукторный двигатель

Преобразователь частоты – автономный инвертор напряжения – коммутатор фаз (несимметричная мостовая схема)

Питание – от сети постоянного тока или от выпрямителя

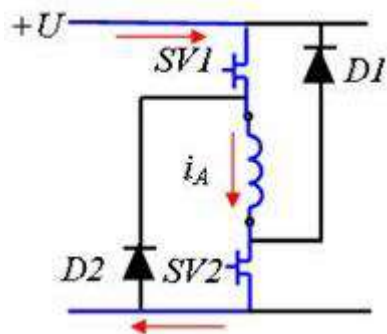
Емкость на входе – фильтр и источник реактивной мощности

ДПР – датчик положения ротора

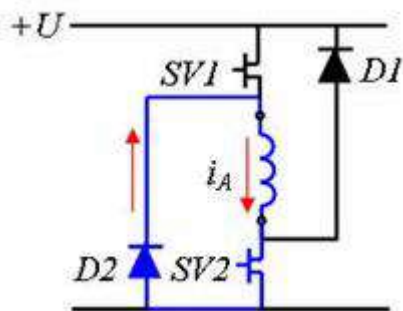


Вентильно-индукторный двигатель

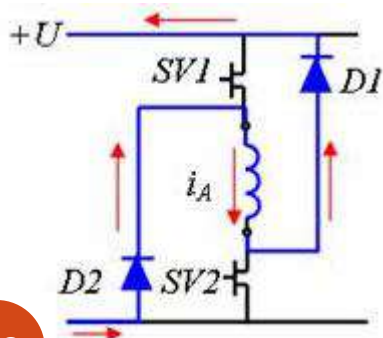
Коммутация фазы:



При включении фазы (SV1 и SV2 вкл) ток протекает по фазе, ротор движется в согласованное положение, фаза накапливает магнитную энергию



При отключении фазы (SV1 выкл) накопленная энергия не может исчезнуть → ЭДС самоиндукции создает ток, замыкающийся через встречный диод D2, ключ SV2 и питающую сеть



Ток спадет до 0, когда энергия магнитного поля выделится в виде потерь на R фазы, диода D2 и ключа SV2

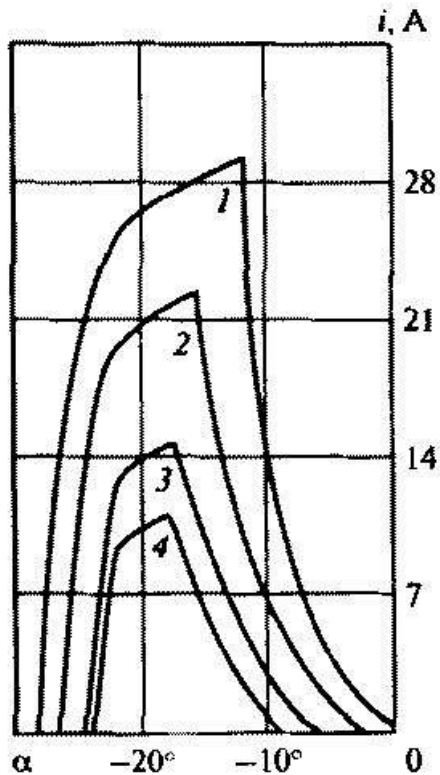
Если в согласованном положении ток $\neq 0$, создается тормозной момент

Для более быстрого гашения поля на фазу подают напряжение обратной полярности (SV1 и SV2 откл) через обратные диоды

Вентильно-индукторный двигатель

Коммутация фазы: на каждом цикле ток изменяется несинусоидально

(см. зависимость тока от угла включения)



Зона нарастания тока,

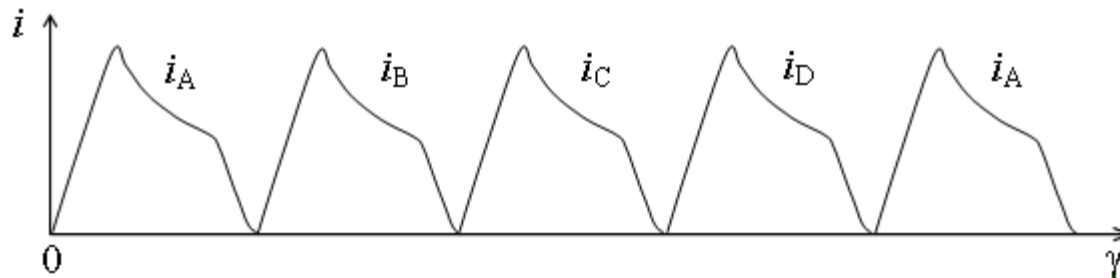
Зона замедления нарастания (возрастание противо-ЭДС),

Зона спадания тока (подача обратного напряжения)

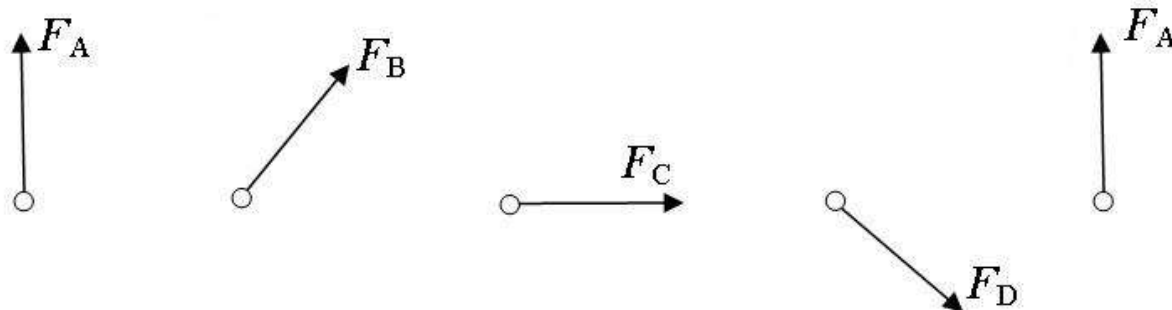
Регулирование тока и момента при высоких скоростях –
изменением углов включения и коммутации (фазовое
регулирование при увеличении n 1-2-3-4)

Вентильно-индукторный двигатель

Коммутация фазы: идеальная симметричная одиночная коммутация (токи фаз не перекрываются)



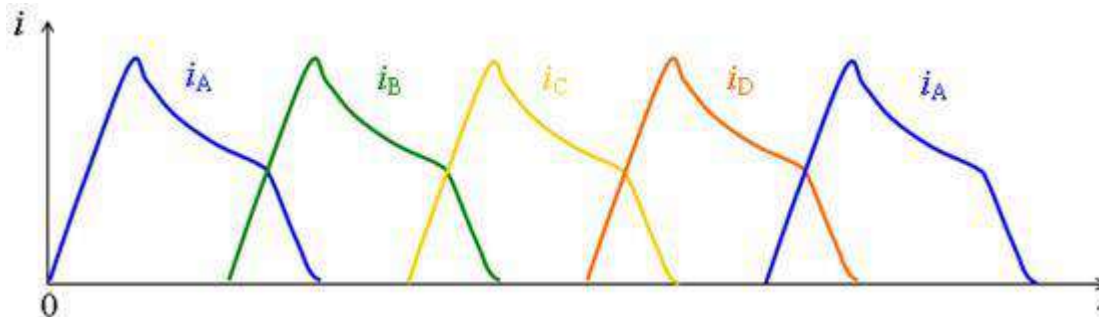
На каждом такте коммутации вектор МДС направлен в одну сторону, а его величина пропорциональна току фазы



МДС создает поле дискретно-пульсирующее

Вентильно-индукторный двигатель

Коммутация фазы: обычно токи фаз перекрываются

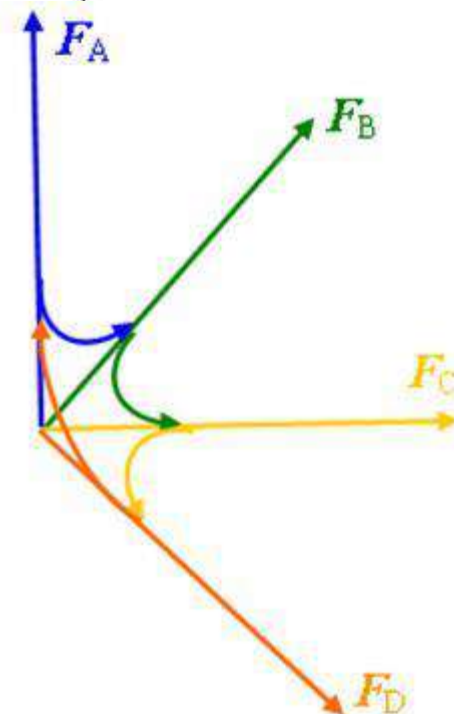


Вектор МДС изменяется по величине и направлению

Характер поля усложняется

Поле не может быть сведено к круговому, эллиптическому, пульсирующему
→ традиционные методы анализа не годятся

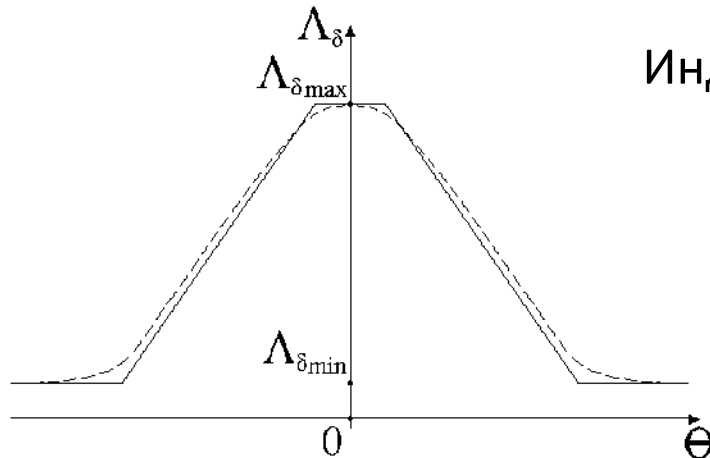
Можно использовать *метод мгновенных значений* токов, напряжений, ЭДС, потоков, потокосцеплений и сил



Вентильно-индукторный двигатель

- *Согласованное положение* – магнитная проводимость максимальна (индуктивность возбужденной фазы максимальна, положение устойчивого равновесия)
- *Рассогласованное положение* – индуктивность минимальна
- Θ - *угол рассогласования* – угловое положение ротора (относительно согласованного положения, когда $\Theta = 0$)

Проводимость воздушного зазора $\Lambda_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{F_{\delta}}$



Индуктивность фазы $L(\Theta) \rightarrow w^2 \Lambda_{\delta}(\Theta)$

Электромагнитный момент

$$M = \frac{dW}{d\Theta} = \frac{1}{2} F_{\delta} \frac{d\Lambda_{\delta}}{d\Theta} F_{\delta}$$

– определяется не величиной, но производной проводимости

Вентильно-индукторный двигатель

Рассмотрим приближенно цикл коммутации фазы

$$(\mu_{ст} = \infty \rightarrow F_{стали} = 0, R_{фазы} = 0 \rightarrow U_d = -e)$$

при $n = \text{Const}$ длительность процесса пропорциональна углу поворота $t = \frac{\gamma}{\omega}$

Коммутация: время работы фазы $t_{вкл} - t_{откл}$; t_0 – снижение Ψ до 0

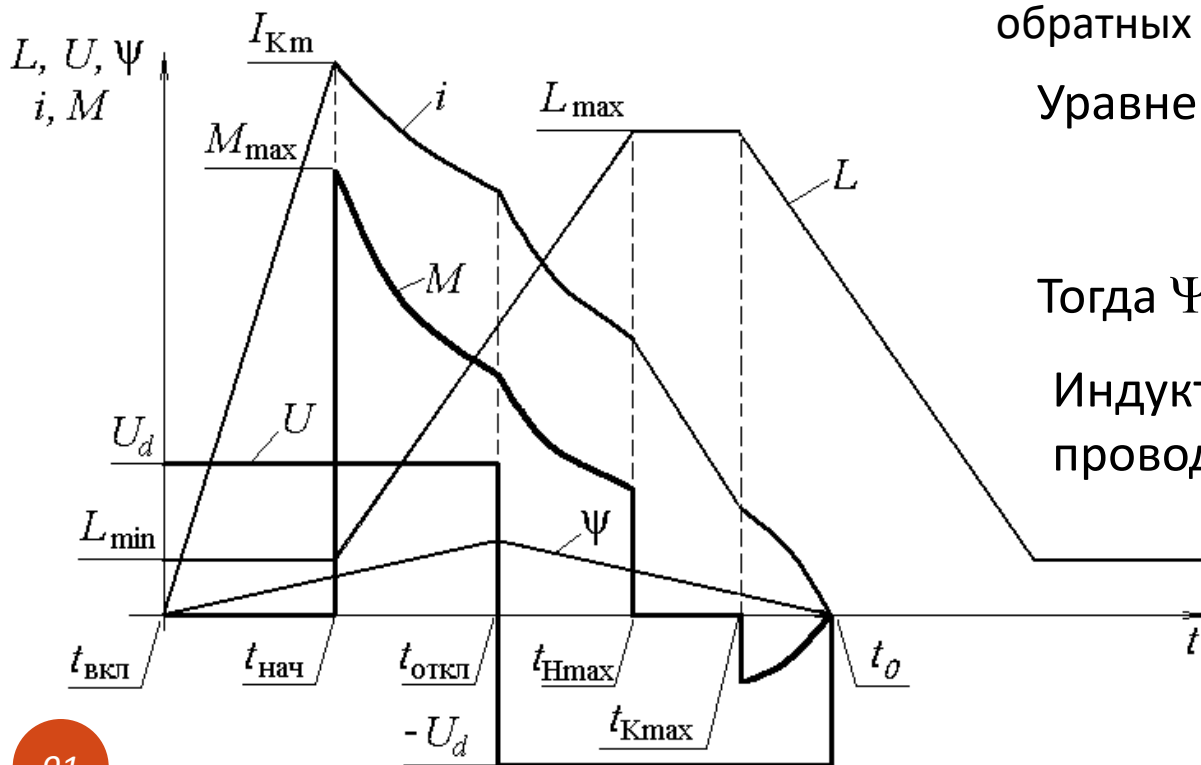
Напряжение фазы: при работе $\rightarrow U_d$, после отключения $\rightarrow -U_d$ (из-за обратных ключей коммутатора)

Уравнение баланса напряжений

$$U_d = -e = \frac{d\Psi}{dt}$$

Тогда Ψ изменяется линейно

Индуктивность L пропорциональна проводимости зазора

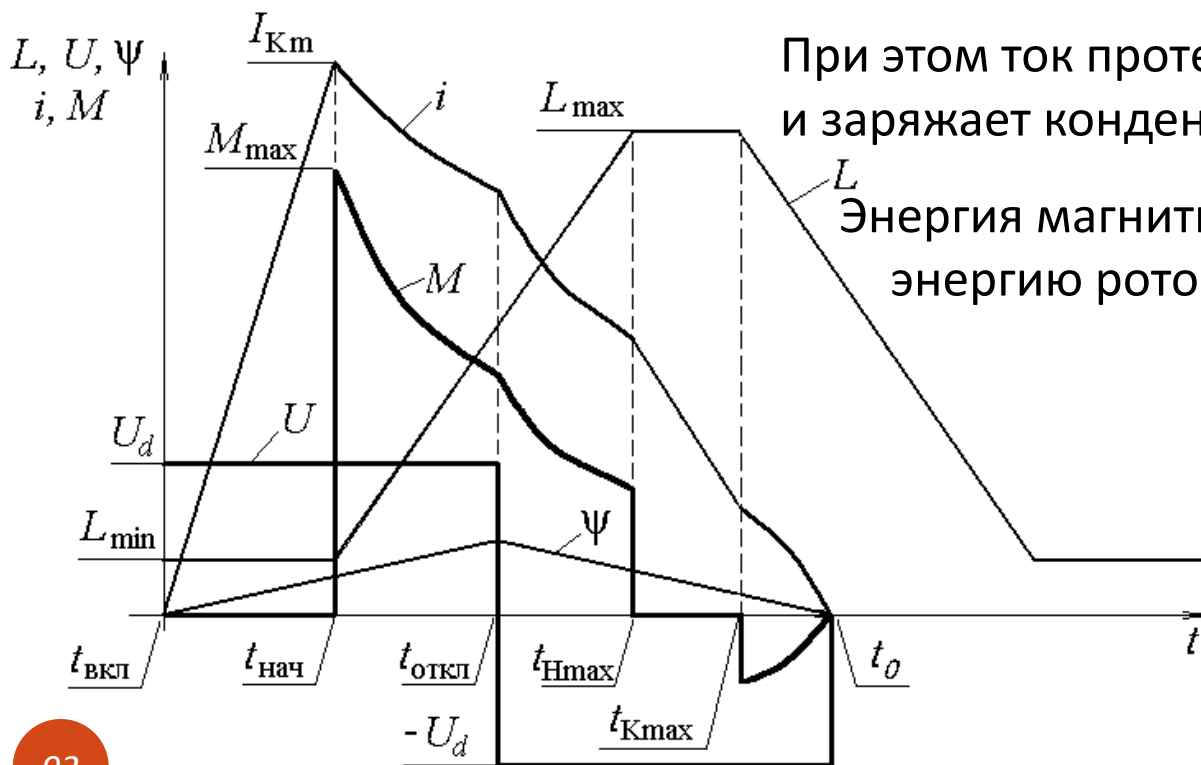


Вентильно-индукторный двигатель

Рассмотрим приближенно цикл коммутации фазы

Ток фазы (при $U=Const$ и $R=0$): $i = \frac{\Psi}{L}$

- до $t_{нач}$ (начало перекрытия зубцов и изменения L) ток линейно нарастает
- до $t_{откл}$ замедление роста или спадание тока (зависит от величин R , L и n)
- после $t_{откл}$ ток спадает (Ψ падает, L растет), на участке $L=L_{max}$ - линейно



При этом ток протекает через обратные диоды и заряжает конденсатор

Энергия магнитного поля → в механическую энергию ротора и энергию электрического поля конденсатора

Обратные диоды защищают ключи от перенапряжений при разрыве цепи с L и обеспечивают отрицательное U на фазе

Вентильно-индукторный двигатель

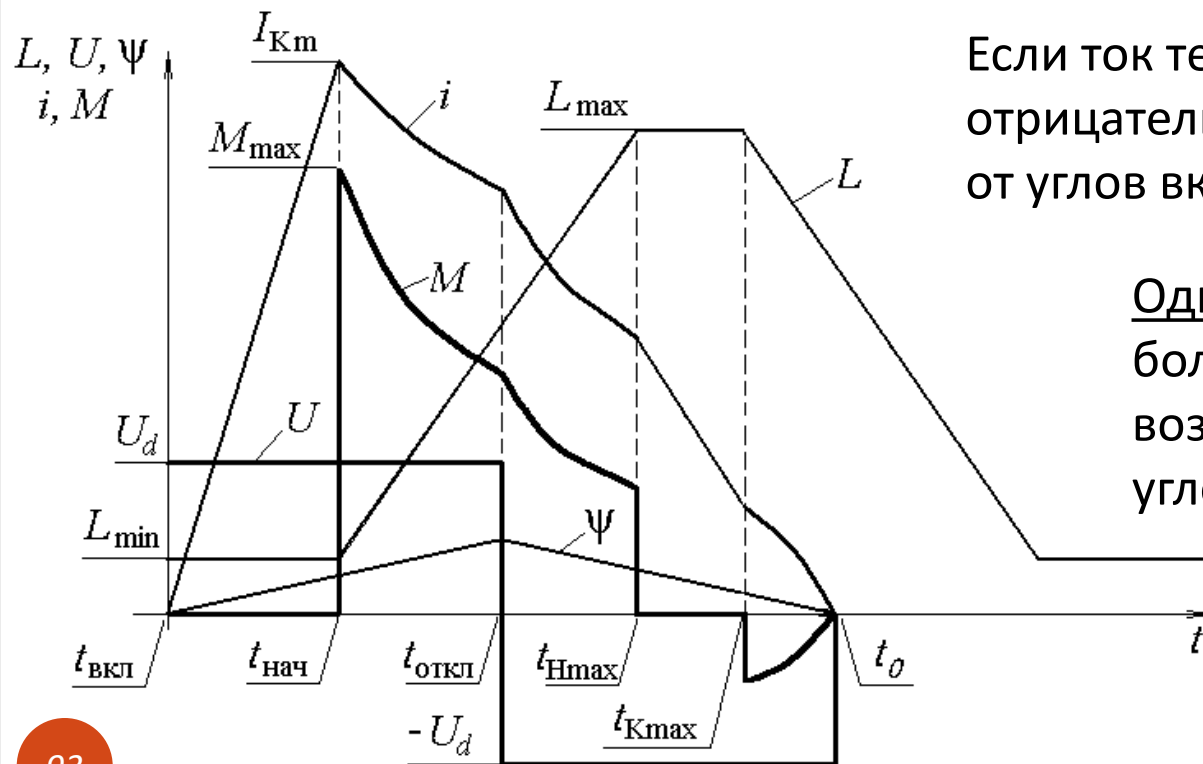
Рассмотрим приближенно цикл коммутации фазы

Электромагнитный момент (считая $F_\delta = iw$): $M = \frac{1}{2} F_\delta \frac{d\Lambda_\delta}{d\Theta} F_\delta$

– на $t_{\text{вкл}} - t_{\text{нач}}$ проводимость = Const и момент = 0

– на $t_{\text{нач}} - t_{\text{Hmax}}$ производная проводимости = Const и момент $\sim i^2$ от M_{max}

– на $t_{\text{Hmax}} - t_{\text{Kmax}}$ производная = Const и момент = 0

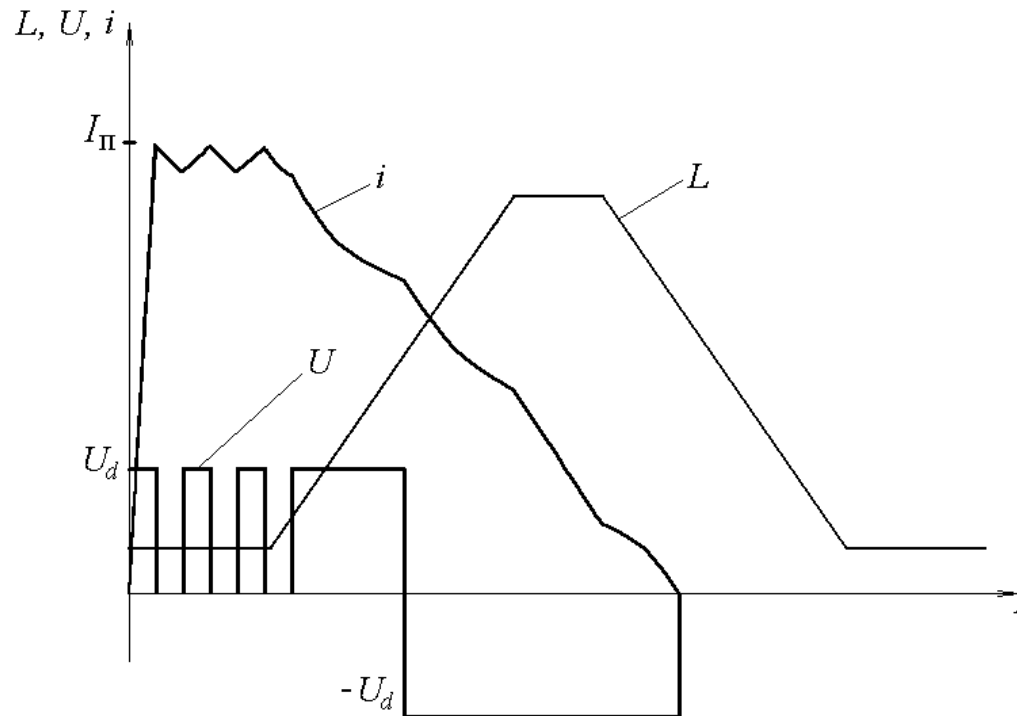


Если ток течет и после t_{Kmax} , то момент отрицательный (тормозной) – зависит от углов включения/отключения фазы

Одноимпульсный режим (при больших скоростях) с возможностью регулирования углов включения

Вентильно-индукторный двигатель

При небольших скоростях (и при пуске) ток может стать больше предельного I_{Π} → режим токоограничения путем ШИМ фазного U



Вентильно-индукторный двигатель

Особенности проектирования ВИД

Конструкция проста, но даже номинальный режим работы – комплекс переходных процессов

→ традиционные методы проектирования не годятся

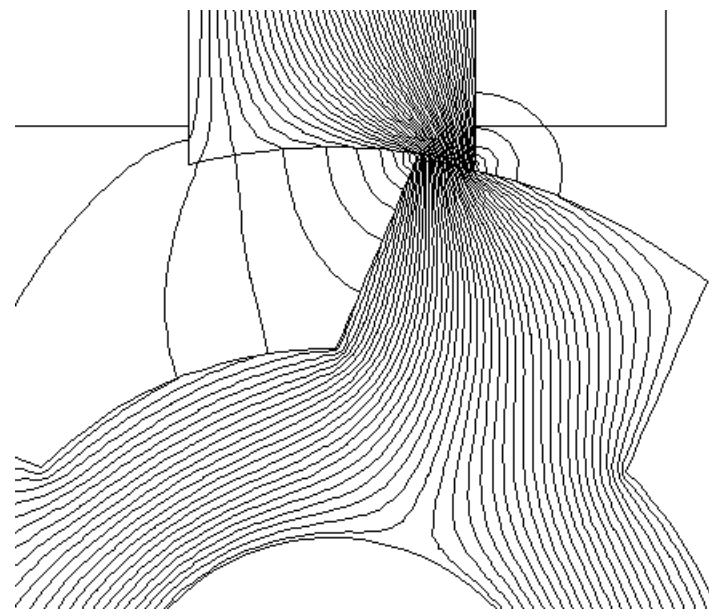
Малая зубчатость статора и ротора

→ локальное насыщение при частичном перекрытии зубцов

→ увеличение эквивалентного зазора

Кривая индукции несинусоидальна и изменяется при вращении ротора

Зубчатые сердечники – сложность вентиляционного расчета



Обязательный анализ шумов (алгоритм коммутации, угол включения фазы, размеры зубцов, собственные частоты сердечника)

Вентильно-индукторный двигатель

Особенности проектирования ВИД

Совместная работа ЭМ и преобразователя → для уточнения параметров и характеристик ВИД нужен учет взаимного влияния (Matlab, KREAN)

Изменение геометрии, насыщения зубцов при работе → полевые расчеты (FEMM, Elcut, ANSYS, Flux, Maxwell, ...)

Наиболее точный расчет – решение системы дифференциальных уравнений с одновременным анализом магнитного поля на каждом шаге интегрирования

При проектировании – упрощенные методики анализа (допущения)

- Энергетический метод
- Полевой метод
- Метод анализа переходных процессов
- их комбинация

Вентильно-индукторный двигатель

Проектирование ВИД: Энергетический метод

- Определение главных размеров с помощью машинной постоянной

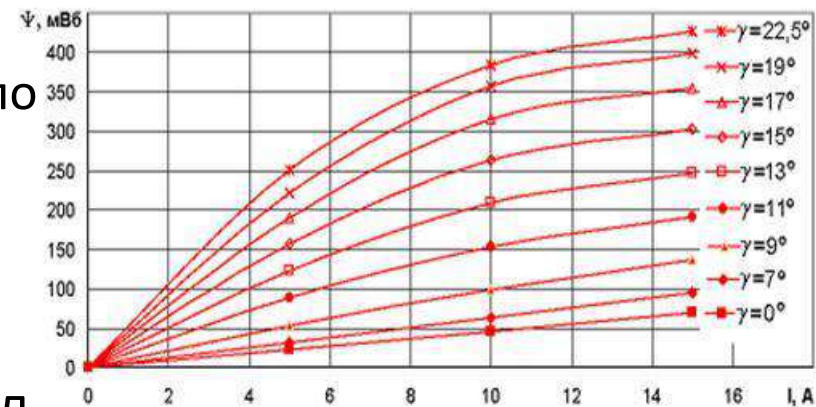
$$C_A = \frac{D^2 l_\delta \Omega_H}{P_H} = \frac{1270}{k_i^2 \eta_H B_\delta A}$$

$$k_i = 0.75 - 0.85$$

коэффициент формы тока

Для выбора электромагнитных нагрузок и соотношения размеров – опыт проектирования / справочные данные готовых ВИД

- Размеры зубцовой зоны
- Расчет кривых намагничивания $\Psi(i)$ для разных положений зубцов (аналитически или численно)
- Анализ траектории рабочей точки по кривым $\Psi(i)$ на цикле коммутации → энергия, преобразованная из электрической в механическую на цикле коммутации → средний момент и мощность ВИД



Вентильно-индукторный двигатель

Проектирование ВИД: Энергетический метод

Достоинство

- Простота учета основных явлений преобразования энергии
- Связь конструктивных параметров с энергетическими показателями

Недостаток

- Значительные допущения – заметные погрешности расчета

Энергетический метод – на этапе предварительного проектирования

Вентильно-индукторный двигатель

Проектирование ВИД: Полевой метод

- Последовательные расчеты магнитного поля → определение электромагнитных сил и моментов
- Итерационная процедура подбора размеров и токов в обмотках так, чтобы получить номинальный момент без перегрева

Достоинства

- Учет нелинейных свойств материалов
- Учет локального насыщения сердечников
- Учет вращения и динамики переходного процесса
- Высока точность расчета момента

Недостаток

- Высокая трудоемкость

Вентильно-индукторный двигатель

Проектирование ВИД: метод анализа переходных процессов

- Решение дифференциального уравнения напряжений фазы одновременно с анализом схемы замещения магнитной цепи (на цикле коммутации)

Проблемы: параметры уравнений изменяются при вращении ротора (из-за насыщения стали)

Необходимо вводить упрощающие допущения – снижается точность

Комбинированные методы проектирования

- Энергетический метод для выбора основных размеров (быстрый перебор вариантов – предварительная оптимизация)
- Расчет кривых намагничивания (численно или аналитически)
- Расчет переходных процессов на цикле коммутации (вместо анализа магнитной цепи – кривые намагничивания) → коррекция углов коммутации
- Финальный расчет момента – полевым методом

Вентильно-индукторный двигатель

Эскизное проектирование ВИД (расчетное задание)

Feasibility analysis - оценка возможности получения заданных характеристик

Выбор подходящего варианта → быстрые расчеты с приемлемой точностью

Упрощенный расчет переходного процесса:

- Нет взаимного влияния фаз
- Мгновенная коммутация ключей
- Включение фазы в положении рассогласования
- Насыщение не учитывается, $\mu_{ст} = \infty$
- Кусочно-линейная аппроксимация кривой проводимости Λ_δ
- Потери в сердечниках учитываются приближенно

Исходные данные:

- P_H, n_H, U_d

В расчетном задании

дополнительные данные:

- $D_{\sigma}, Z_S, Z_R, \delta$

Вентильно-индукторный двигатель

Эскизное проектирование ВИД – выбор конфигурации

Выбор $m, p_1 \rightarrow Z_S, Z_R$

Число зубцов статора $Z_S = 2 p_1 m q_1$ Число зубцов ротора $Z_R = \left(\frac{Z_S}{p_1} - 2 \right) p_1$

При увеличении m

- Уменьшаются пульсации M
- Увеличивается число ветвей коммутатора

При увеличении p_1

- Уменьшаются деформации статора (шум)
- Увеличивается частота тока – увеличиваются потери в стали, изменяются требования к ключам коммутатора

Частота тока в фазе $f_c = \frac{n}{60} Z_R$

Частота вращения поля $n_1 = \frac{60 f_c}{p_1}$

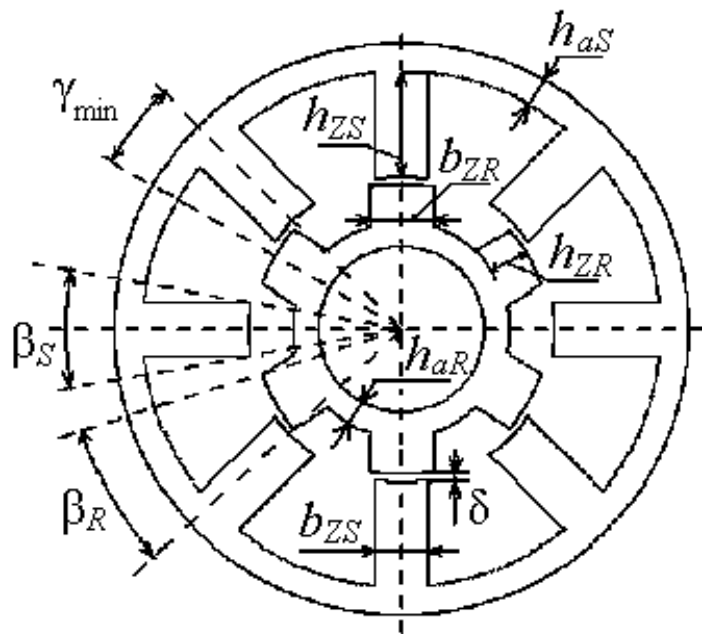
Частота перемагничивания ротора $f_R = \frac{n + n_1}{60} p_1$

Выбор Z_S, Z_R –
многокритериальная
задача (зависит от
полученной P_2, η , др.)

Вентильно-индукторный двигатель

Эскизное проектирование ВИД – зубцовая зона статора

Часто задан внешний диаметр D_a – габарит машины



Зубцовые деления (рад.) $t_{ZS} = \frac{2\pi}{Z_S}$ $t_{ZR} = \frac{2\pi}{Z_R}$

Размер зубцов $\beta_S = 0.45 t_{ZS}$ $\beta_R = 0.50 t_{ZS}$

Из геометрии ВИД:

$$h_{ZS} + h_{aS} = 0.5(D_a - D_i)$$

$$b_{ZS} = D_i \sin\left(\frac{\beta_S}{2}\right)$$

Кроме того, принимаем:

$$h_a = (0.5 \leftrightarrow 1.0)b_{ZS}$$

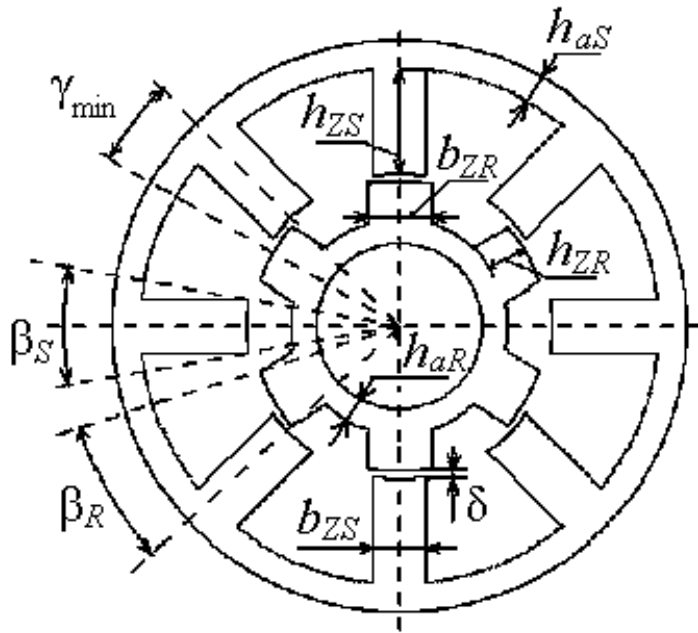
$$h_{ZS} = (0.5 \leftrightarrow 6.0)b_{ZS}$$

Находим размеры статора

Вентильно-индукторный двигатель

Эскизное проектирование ВИД – выбор воздушного зазора

Величина зазора → МДС катушек → объем меди → габариты ВИД



Традиционно желают получить мин. зазор
Но $\delta < 0,25$ потребует специальной технологии

Можно оценить зазор как $\delta = 0.005 k D_i$

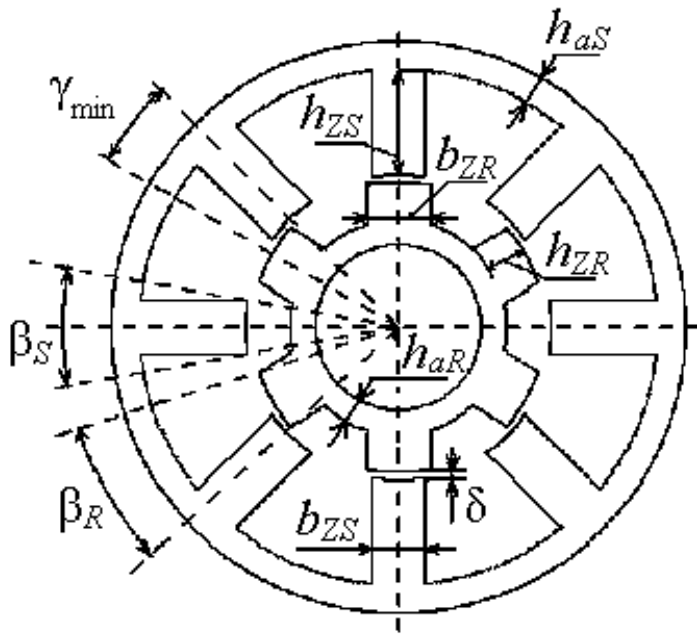
$$\text{где } k = \frac{l_\delta}{D_i} \quad (\text{при } l_\delta < D_i, k=1)$$

а l_δ можно оценить энергетическим методом

Вентильно-индукторный двигатель

Эскизное проектирование ВИД – зубцовая зона ротора

Из геометрии ВИД: $D_R = D_i - 2\delta$ $t_{ZR} = \frac{\pi D_R}{Z_R}$ $b_{ZR} = D_R \sin\left(\frac{\beta_R}{2}\right)$



Кроме того, принимаем:

$$h_{ZR} = (20 \leftrightarrow 30)\delta$$

$$h_{aR} = (0.5 \leftrightarrow 1.5)b_{ZR}$$

Для получения большого момента контролируем выполнение условий:

максимальная ширина паза ротора

$$b_{ПР \max} = D_R \sin\left(\frac{t_{ZR} - \beta_R}{2}\right) > b_{ZS}$$

минимальная ширина паза статора

$$b_{ПС \min} = D_i \sin\left(\frac{t_{ZS} - \beta_S}{2}\right) > b_{ZR}$$

Площадь паза статора

$$S_{ПС} = \frac{\pi(D_i + h_{ZS})h_{ZS}}{Z_S} - b_{ZS}h_{ZS}$$

Максимальная площадь катушки

$$S_{K \max} = \frac{S_{ПС}}{2}$$

Вентильно-индукторный двигатель

Эскизное проектирование ВИД – интервалы цикла коммутации

Максимальный интервал нарастания тока при минимальной проводимости

$$\gamma_{\text{ВКЛ max}} = 0.5(t_{\text{ZR}} - \beta_S - \beta_R) \quad \text{время } t_{\text{ВКЛ max}} = \frac{\gamma_{\text{ВКЛ max}}}{\omega_R}$$

Минимальный угол поворота ротора между согласованными положениями

$$\gamma_{\text{min}} = t_{\text{ZR}} - t_{\text{ZS}}$$

Интервал работы фазы

при $m=3$ (одиночная к.) $\gamma_{\text{раб}} = \gamma_{\text{min}}$

при $m>3$ (несимметричная к.) $\gamma_{\text{раб}} = \beta_S$

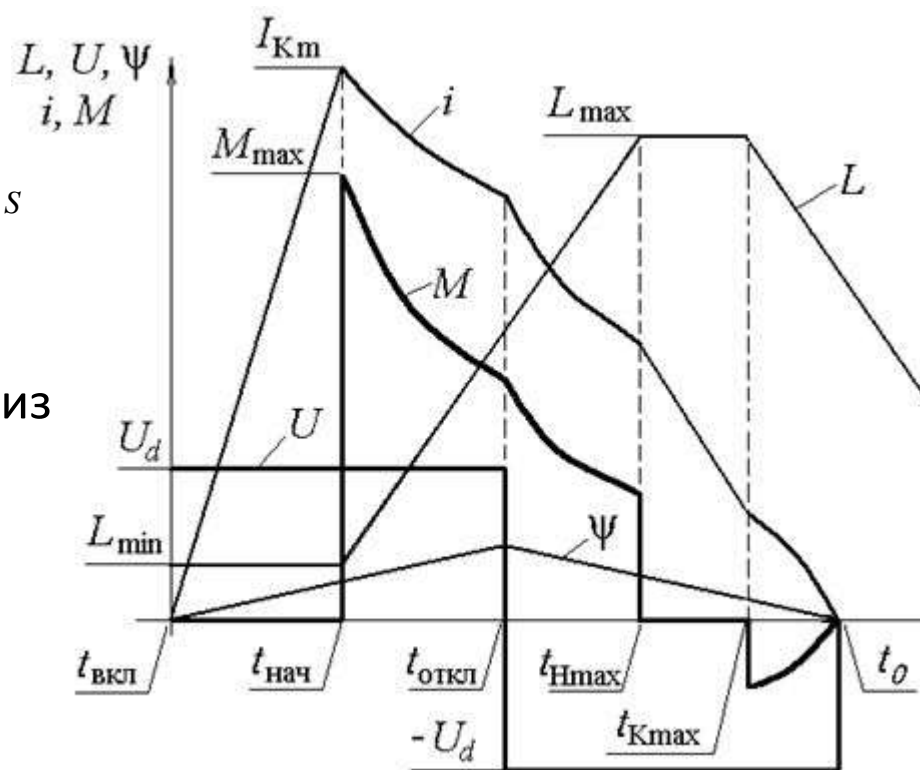
$$\text{время работы } t_{\text{раб}} = \frac{\gamma_{\text{раб}}}{\omega_R}$$

Угол перекрытия зубцов при повороте из рассогласованного положения на $\gamma_{\text{раб}}$

$$\beta_{\text{SRm}} = \gamma_{\text{раб}} - \gamma_{\text{ВКЛ max}}$$

При этом ширина перекрытия зубцов

$$b_{\text{SRm}} = 0.5\beta_{\text{SRm}} (D_i - \delta)$$



Ширинский С.В. каф.ЭМ, МЭИ

Вентильно-индукторный двигатель

Эскизное проектирование ВИД – коэффициенты проводимости

Точное значение магнитной проводимости – из полевого расчета

Но можно найти примерные значения аналитически: на основе конформного преобразования Шварца-Кристоффеля зубцовой зоны (учебное пособие Фисенко В.Г., Попов А.Н.)

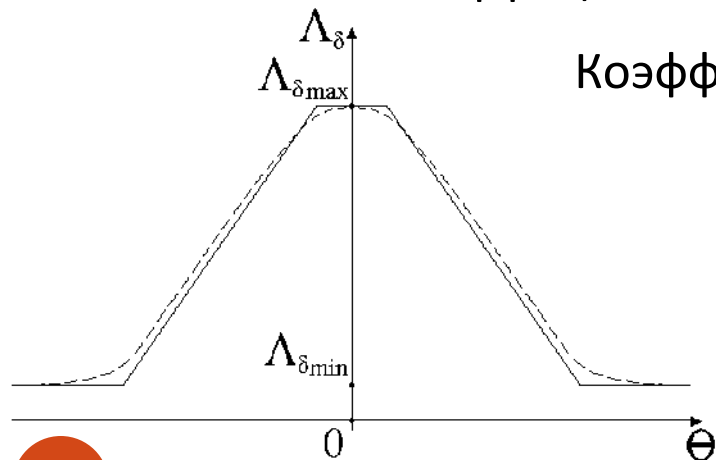
Коэффициент магнитной проводимости зоны перекрытия зубцов в положении $\gamma_{\text{раб}}$

Коэффициент максимальной магнитной проводимости $\lambda_{\delta \max}$

Коэффициент минимальной магнитной проводимости $\lambda_{\delta \min}$

Коэффициент отношения проводимостей

$$K_{\lambda} = \frac{\lambda_{\delta \max}}{\lambda_{\delta \min}}$$



Вентильно-индукторный двигатель

Эскизное проектирование ВИД – обмотка статора и токи

Число катушек в фазе $n_k = \frac{Z_s}{m}$

Число последовательно соединенных катушек $n_{KB} = \frac{n_k}{a}$

Ток на входе инвертора $I_d = \frac{P_H}{\eta(U_d - 2U_B)}$ (падение напряжения на вентиле $U_B=1$ В)

Предельное значение тока в катушке (при одиночной коммутации)

- Прямоугольная форма тока $I_{Km} = I_d / a$
- Треугольная форма тока $I_{Km} = 2.4 I_d / a$

(максимальное значение тока должно быть в этом диапазоне)

Вентильно-индукторный двигатель

Эскизное проектирование ВИД – итерационный процесс

Максимальное значение тока в катушке

(должно входить в диапазон предельных значений)

$$I_{Km} = \frac{U_{dL} t_{BKJ \max}}{n_{KB} \mu_0 l_{\delta} W_K^2 \lambda_{\min}}$$

Падение напряжения на индуктивности обмотки

– уточняется итерационно по I_K, R_K

$$U_{dL} = U_d - n_{KB} I_K R_K$$

Длина сердечника l_{δ} – уточняется итерационно по индукции в зубце (степень использования стали)

$$B_{zS} = (1.6 \leftrightarrow 1.7) \text{Тл}$$

Число витков в катушке W_K – уточняется итерационно по мощности P_2

- Ток
- Индукция
- Момент и мощность
- а также провод, k_z и R_K

Контроль значений:

- d провода → число элемент. проводников
- Коэф-т заполнения паза (для ВИД: 0,35-0,45)

- Расчет КПД, потребляемого тока
- Характеристики на цикле коммутации

Вентильно-индукторный двигатель

Эскизное проектирование ВИД – вложенные расчеты

Максимальный поток (в момент отключения) $\Phi_{\max} = \frac{U_{dL} t_{\text{раб}}}{n_{\text{кв}} W_{\text{к}}}$

Индукция в зубце $B_{ZS} = \frac{\Phi_{\max}}{b_{ZS} l_{\delta} k_c}$ (коэф-т заполнения сердечника $k_c = 0,95$)

Ток в катушке при отключении $I_{\text{Коткл}} = \frac{\Phi_{\max}}{\mu_0 l_{\delta} W_{\text{к}} \lambda_{SRm}}$

Действующее значение тока катушки $I_{\text{к}}$ – по линейной аппроксимации на трех участках цикла коммутации:

от 0 до $\gamma_1 = \gamma_{\text{ВКЛmax}}$ линейное нарастание тока

от γ_1 до $\gamma_{\text{раб}}$ изменение тока в функции от Ψ и L

после отключения – линейное спадание тока до 0

Ток фазы $I_{\phi} = I_{\text{к}} a$

Средний момент – с учетом аналогичной аппроксимации тока

Мощность ВИД $P_{\text{н}} = \omega_{\text{н}} M_{\text{ср}}$

Для проектирования катушки задаемся $j = 3-9 \text{ А/мм}^2$

Для выбранного провода считаем коэф-т заполнения паза и $R_{\text{к}}$

Вентильно-индукторный двигатель

Эскизное проектирование ВИД – завершающие расчеты

По окончании итерационных расчетов известно:
размеры магнитопровода и обмоточные данные

- Выбор стали для сердечников (с учетом частоты перемагничивания)
- Расчет массы активных материалов (обмоток и сердечников)
- Расчет электрических потерь
- Расчет магнитных потерь (для учета несинусоидальности перемагничивания – коэф-ты $k_{da}=1.8$ и $k_{dz}=2.0$)
- Оценка механических потерь
- Суммарные потери и КПД
- Ток на входе инвертора (окончательно)
- Построение зависимостей основных переменных на цикле коммутации (проводимость, напряжение, потокосцепление, ток, момент)

Вентильно-индукторный двигатель

Уточнение расчета коэффициента минимальной проводимости $\lambda_{\delta \min}$ с помощью полевого метода (лабораторная работа №3)

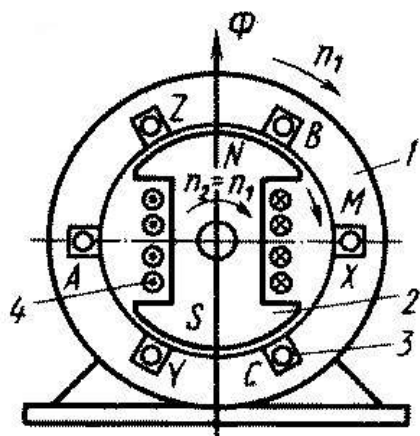
- Для спроектированной машины построить модель поперечного сечения, поместив ротор в рассогласованном положении фазы 1
- Задать ток возбуждения фазы 1
- Задать граничные условия, построить сетку, провести расчет поля
- Определить рабочий поток Φ_{δ} , Вб
- Определить МДС катушки возбужденного зубца F_{κ}
- Рассчитать коэффициент проводимости зазора $\lambda_{\delta \min} = \frac{\Phi_{\delta}}{\mu_0 l_{\delta} F_{\kappa}}$
- Сравнить со значением $\lambda_{\delta}^{\text{э}}$, полученным по эмпирической формуле при проектировании ВИД
- Найти погрешность эмпирической формулы $\varepsilon_{\lambda} = \frac{\lambda_{\delta}^{\text{э}} - \lambda_{\delta \min}}{\lambda_{\delta \min}} \cdot 100 \%$

Аналогично для коэффициента максимальной проводимости $\lambda_{\delta \max}$



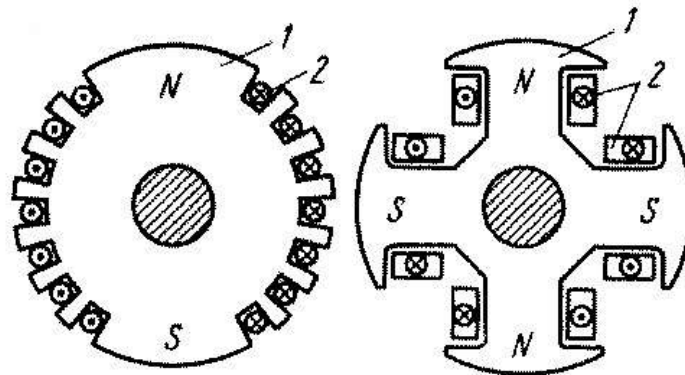
Синхронные электрические машины

Классическая синхронная машина

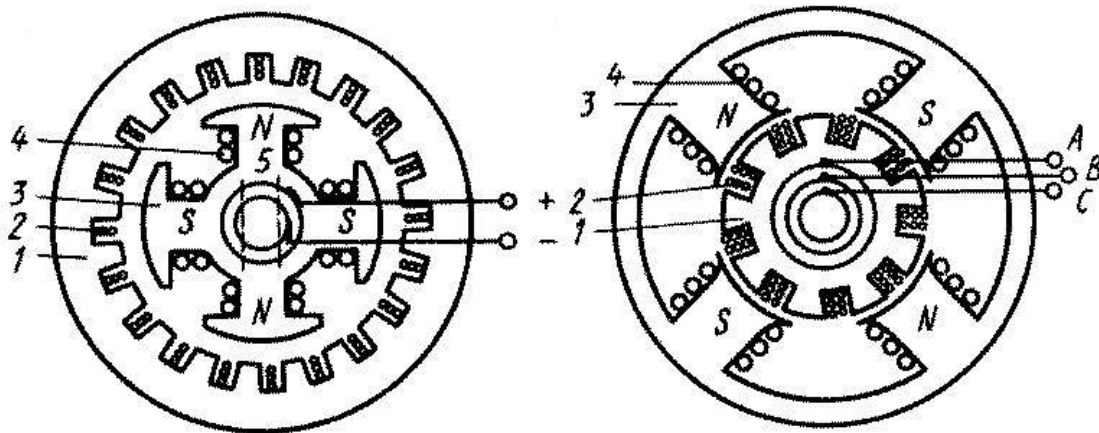


- 1 – статор
- 2 – ротор
- 3 – обмотка якоря
- 4 – обмотка возбуждения

Конструкция ротора

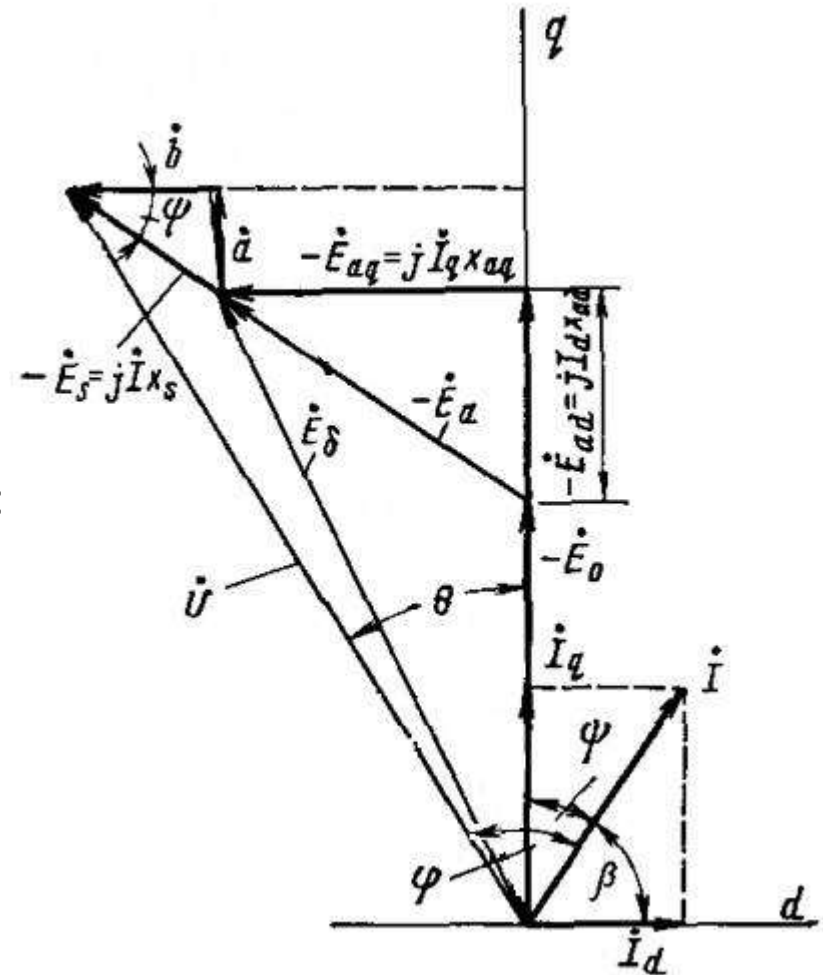
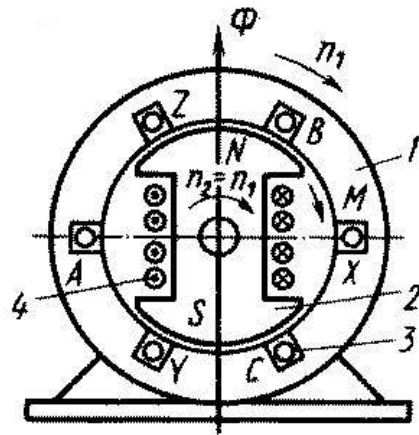


Классическая и обращенная конструкция СМ



Синхронные электрические машины

Классическая синхронная машина



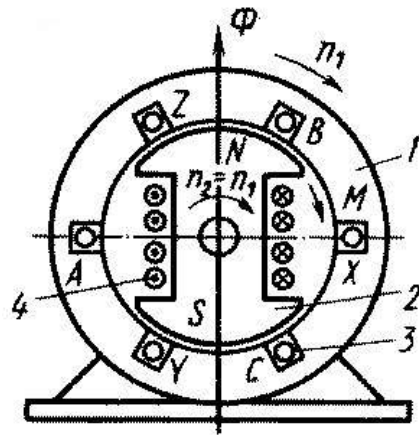
Синхронный явнополюсный двигатель:
уравнение и векторная диаграмма

$$\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_d x_{ad} + j\dot{I}_q x_{aq} + j\dot{I} x_s$$

$$(\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q)$$

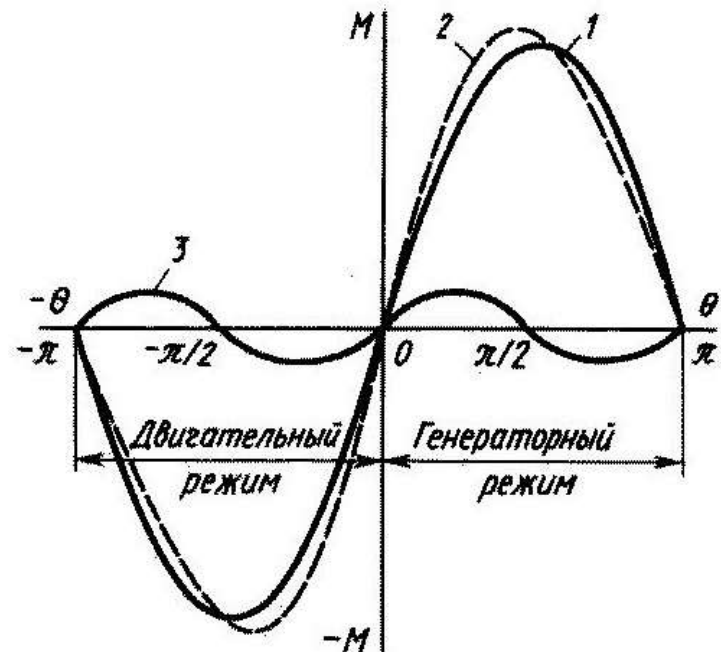
Синхронные электрические машины

Классическая синхронная машина



Синхронный явнополюсный двигатель:
электромагнитный момент

$$M = \frac{mE_0U}{\omega_c x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega_c} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

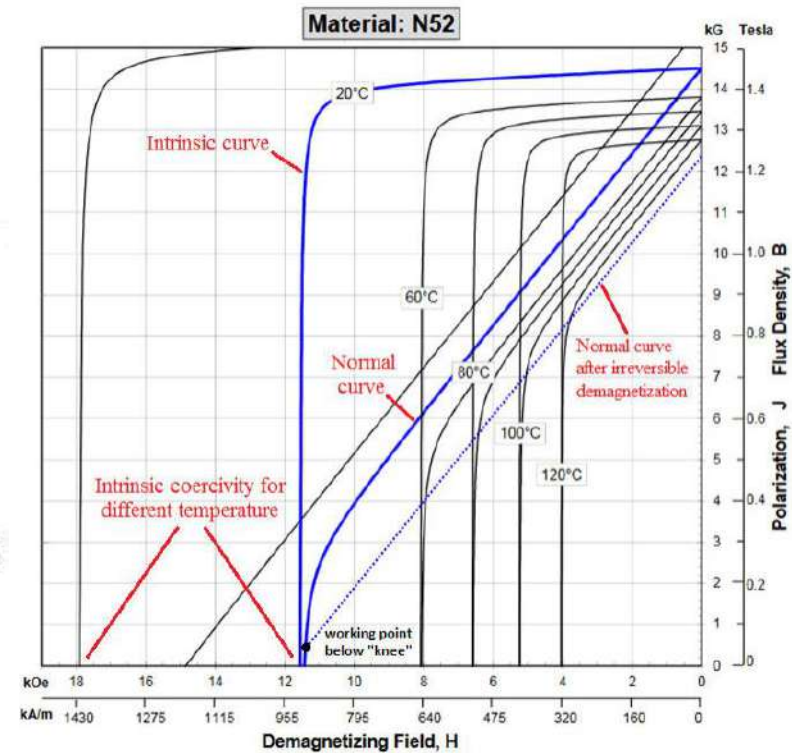
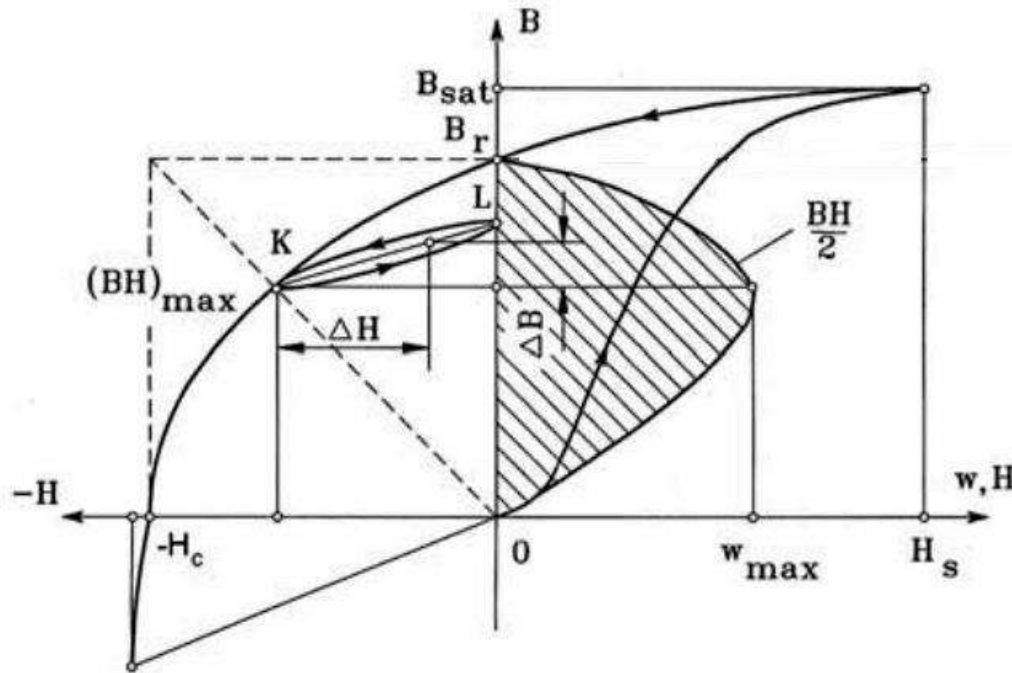


Синхронные электрические машины

Синхронный двигатель с постоянными магнитами

Постоянный магнит – источник магнитного поля возбуждения

- не требует питания / не имеет потерь на возбуждение
- не может регулировать поток



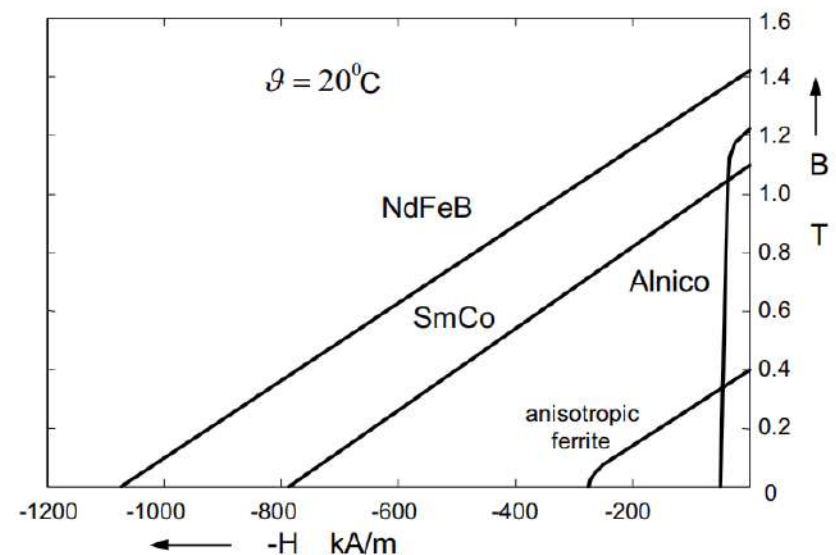
$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 H + B_i = \mu_0 (H + M)$$

Синхронные электрические машины

Синхронный двигатель с постоянными магнитами

Постоянные магниты

- [магнетит]
- Литые сплавы (ЮНДК / Alnico)
- Ферриты
- Редкоземельные магниты (SmCo, NdFeB)

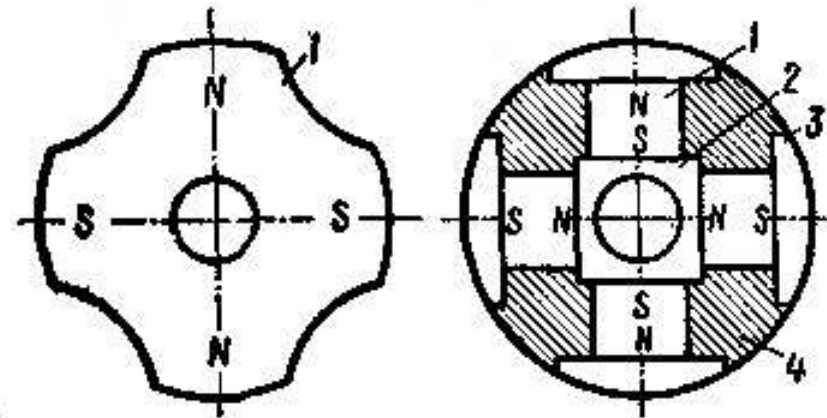
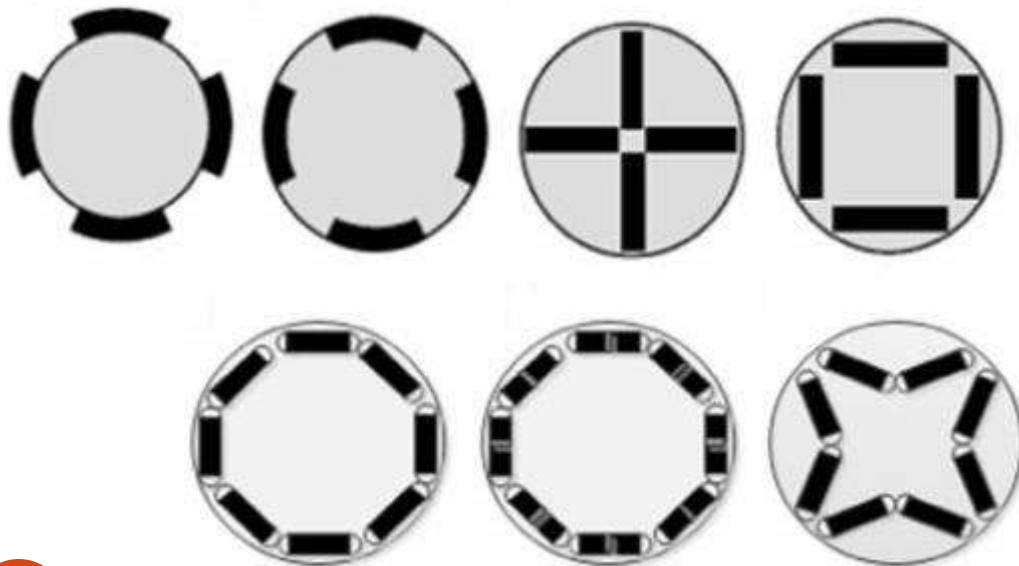


Синхронные электрические машины

Синхронный двигатель с постоянными магнитами

Работа СМ принципиально не изменяется

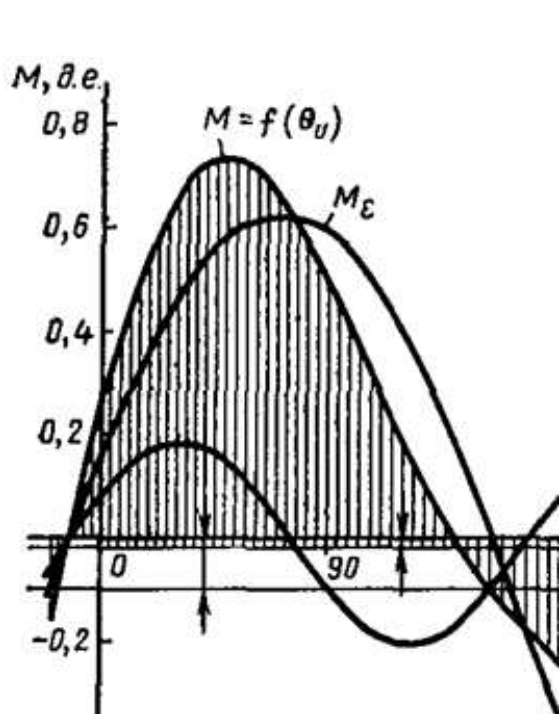
На роторе – источник магнитного поля



Синхронные электрические машины

Синхронный двигатель с постоянными магнитами

Но соотношение x_d/x_q влияет на вид угловой характеристики



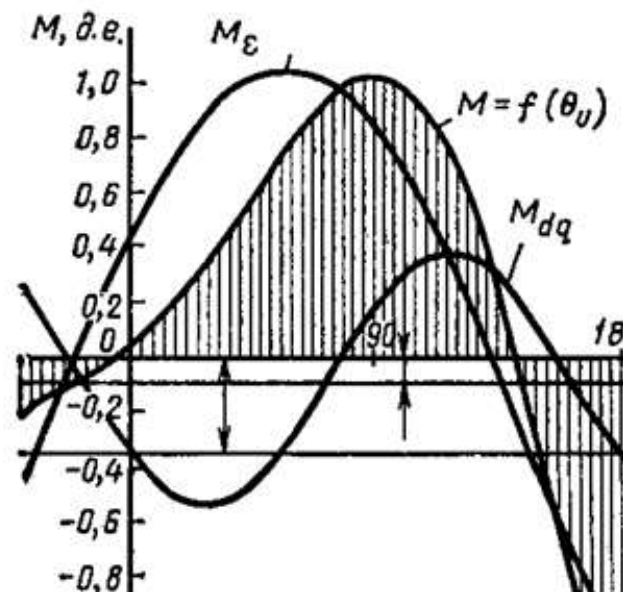
$$x_d > x_q$$



$$x_d = x_q$$



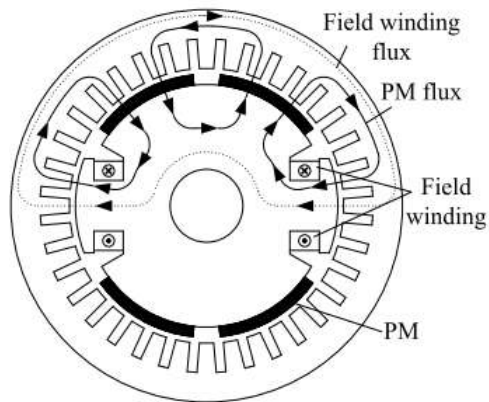
$$x_d < x_q$$



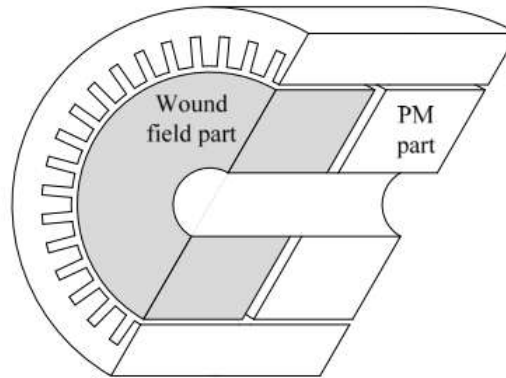
Синхронные электрические машины

Синхронный двигатель с гибридным возбуждением

Возбуждение как от ПМ (основной поток),
так и от обмотки возбуждения (регулируемый поток)

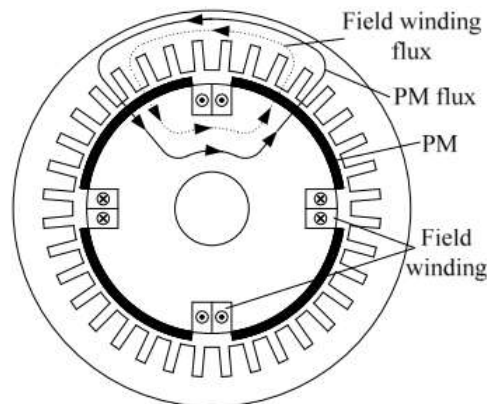


(a)

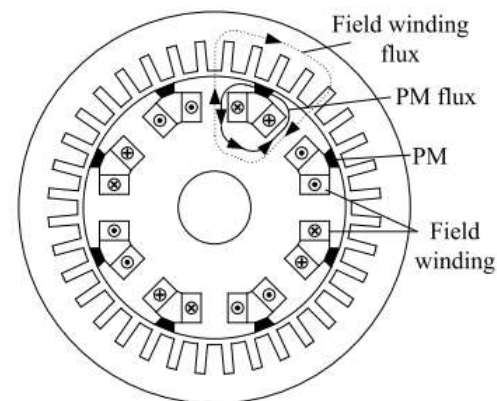


(b)

При изменении
направления тока
возбуждения можно
как увеличивать, так
и уменьшать поток
возбуждения



(c)

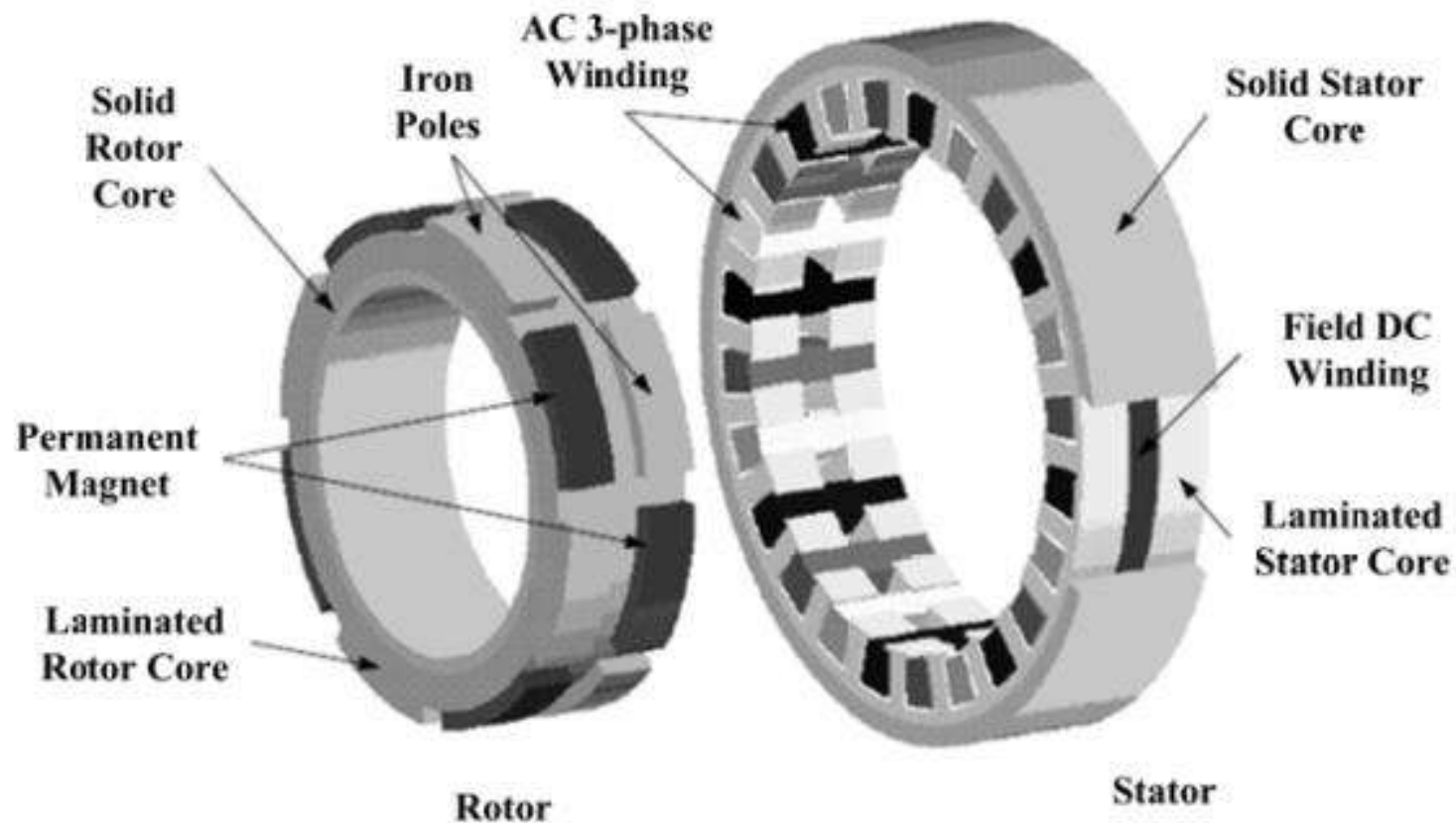


(d)

Синхронные электрические машины

Синхронный двигатель с гибридным возбуждением

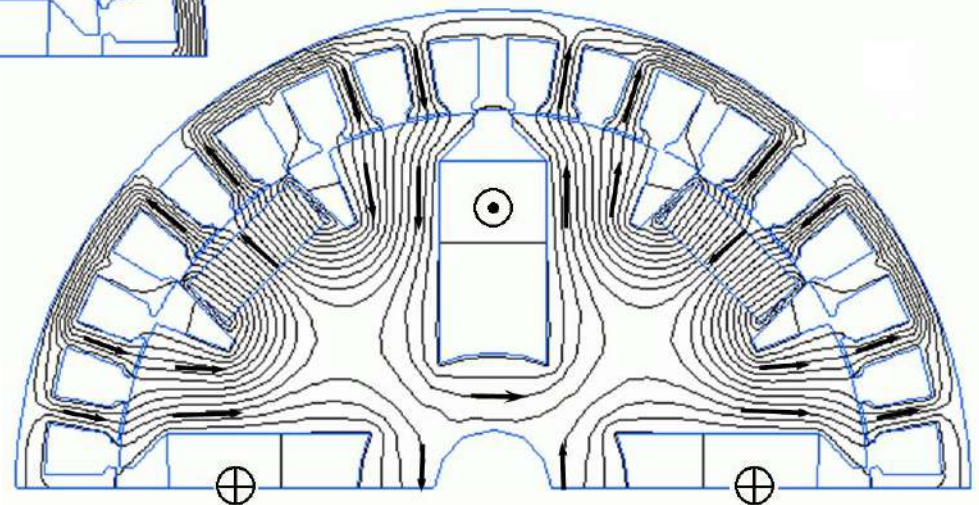
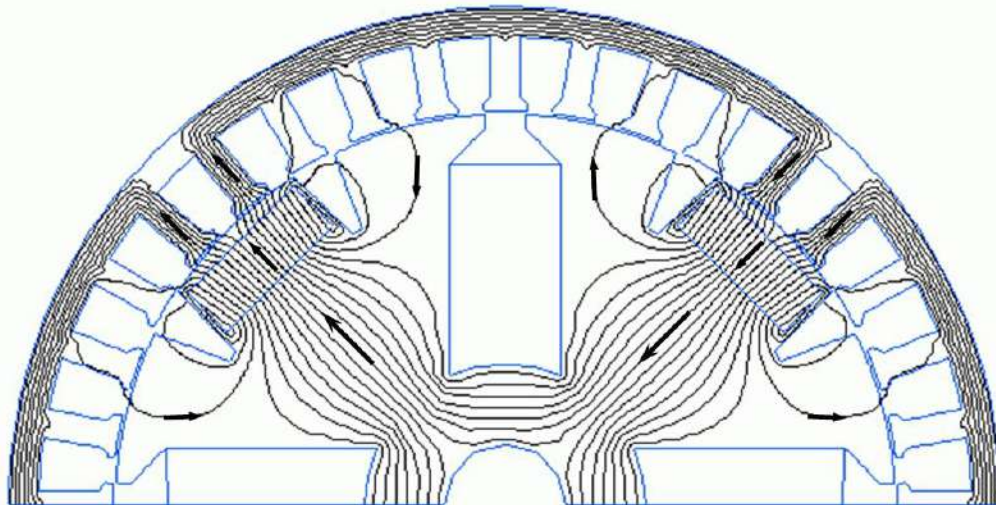
Изменяя конфигурацию результирующего поля можно изменять потокосцепление обмотки → ЭДС и выходное напряжений



Синхронные электрические машины

Синхронный двигатель с гибридным возбуждением

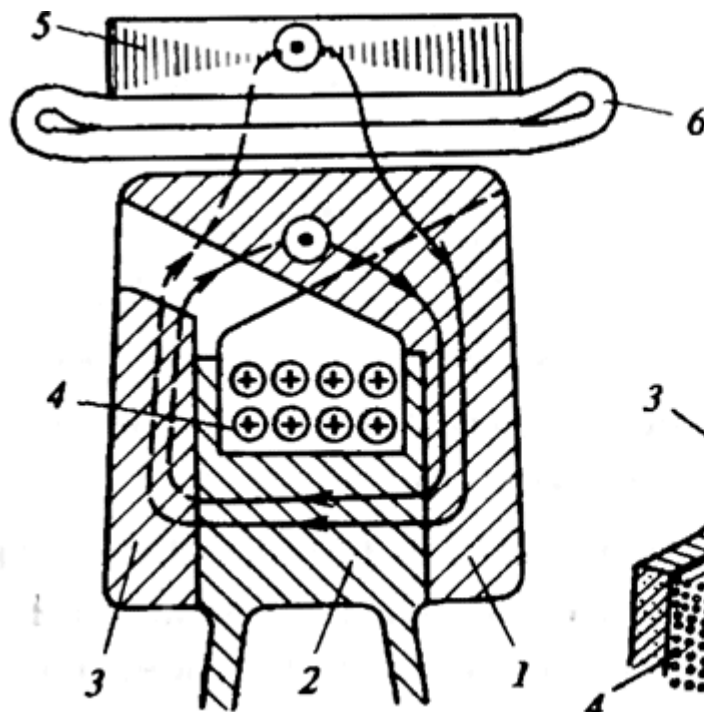
Двумерное поле с переменной полюсностью



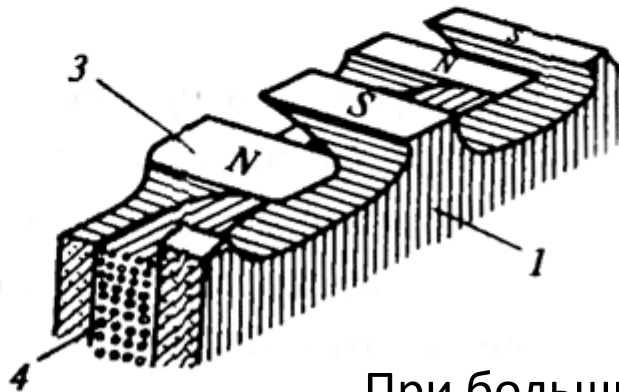
Синхронные электрические машины

Синхронная машина с когтеобразными полюсами

Простейшая обмотка возбуждения - кольцевая



- 1 – диск с южными полюсами
- 2 – ярмо
- 3 – диск с северными полюсами
- 4 – кольцевая обмотка возбуждения
- 5 – магнитопровод якоря
- 6 обмотка якоря



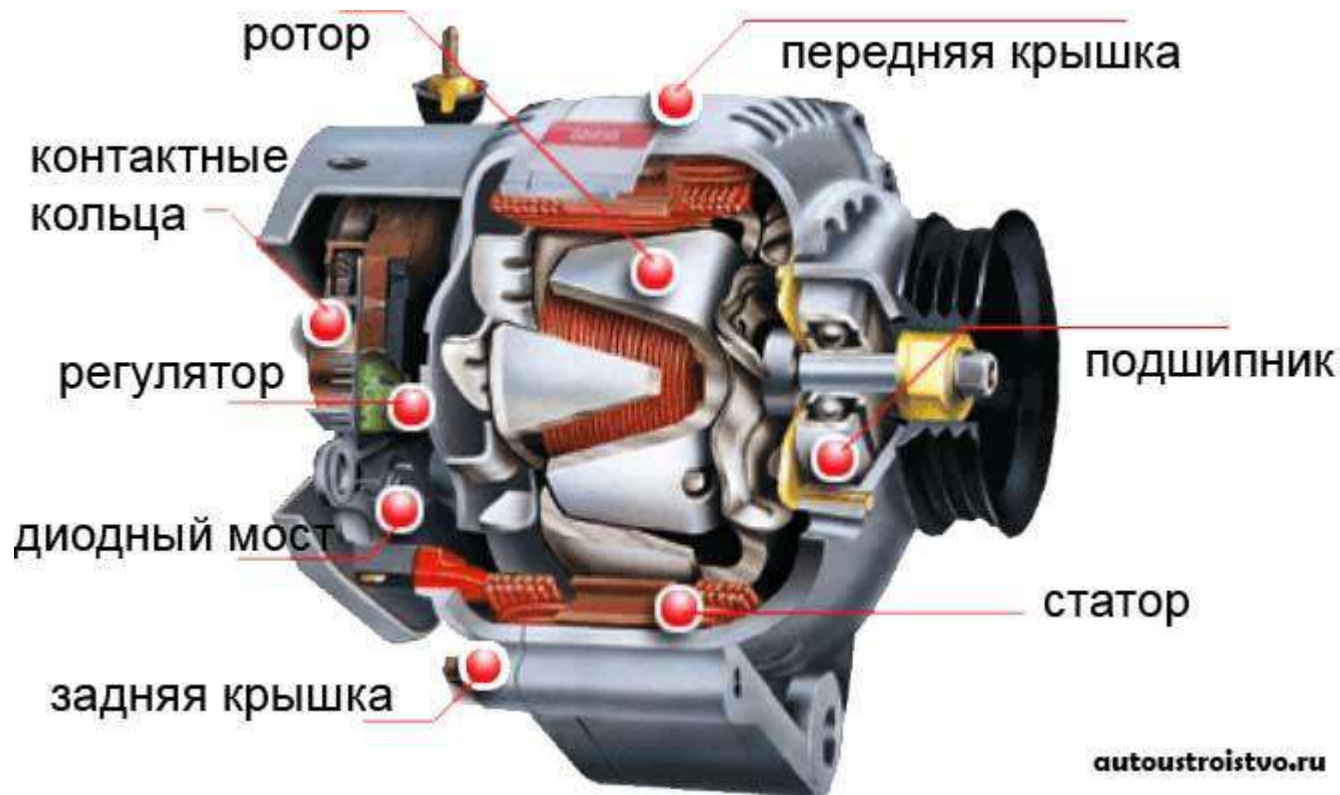
- Поток взаимной индукции
- Поток рассеяния

При больших мощностях поток рассеяния оказывается недопустимо большим

Синхронные электрические машины

Синхронная машина с когтеобразными полюсами

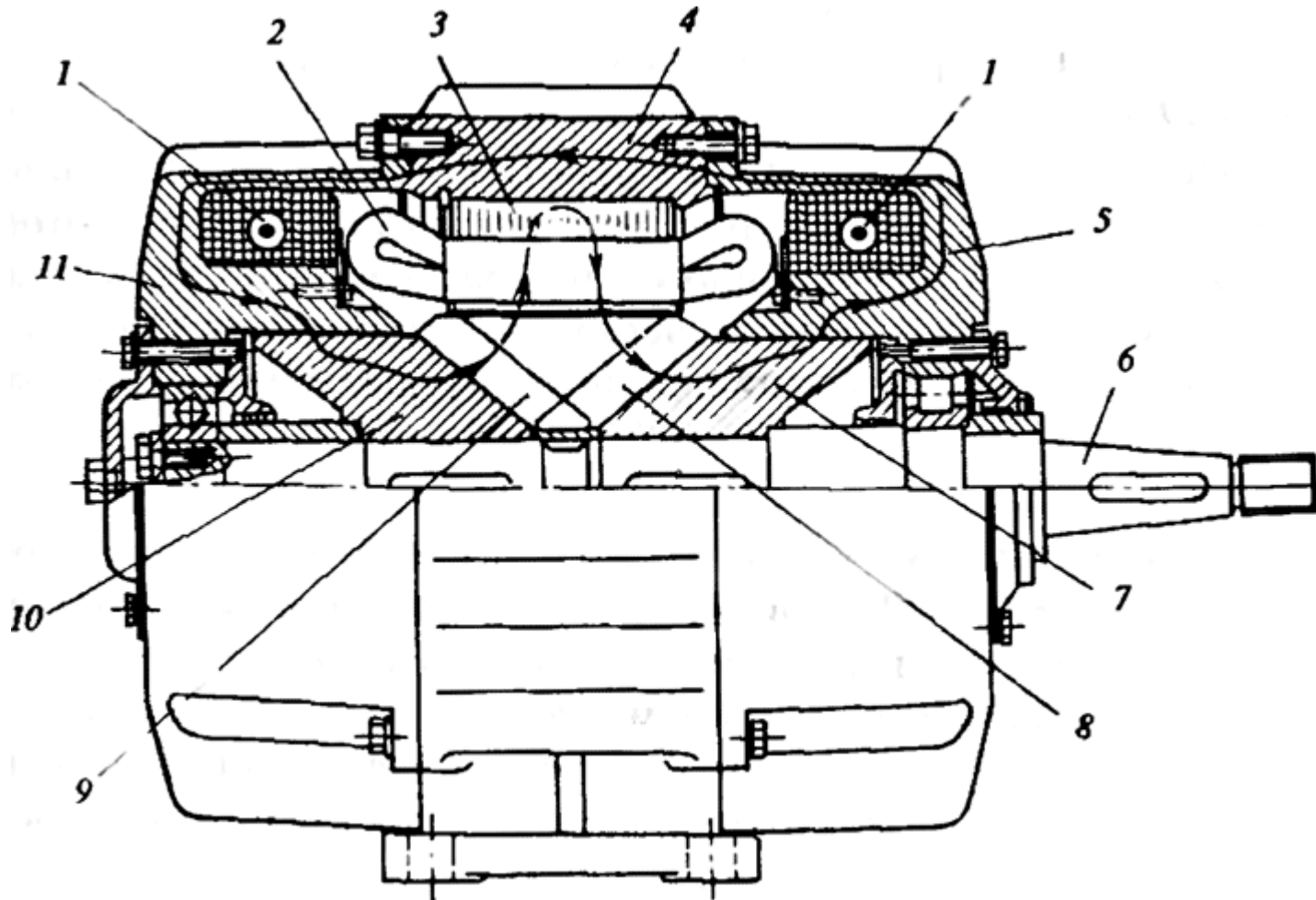
Автомобильный генератор с вращающейся ОВ



Синхронные электрические машины

Синхронная машина с когтеобразными полюсами

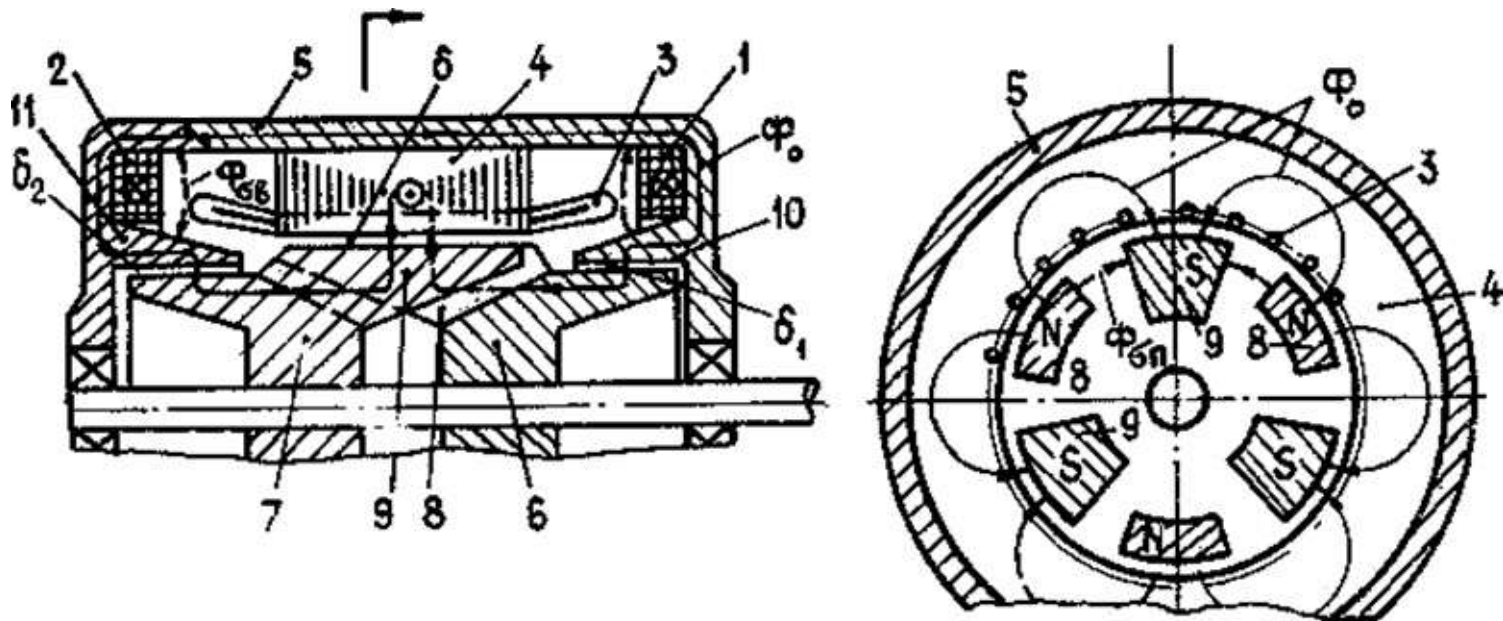
При неподвижной ОВ - бесконтактная синхронная машина



Синхронные электрические машины

Синхронная машина с когтеобразными полюсами

Пути замыкания магнитного потока

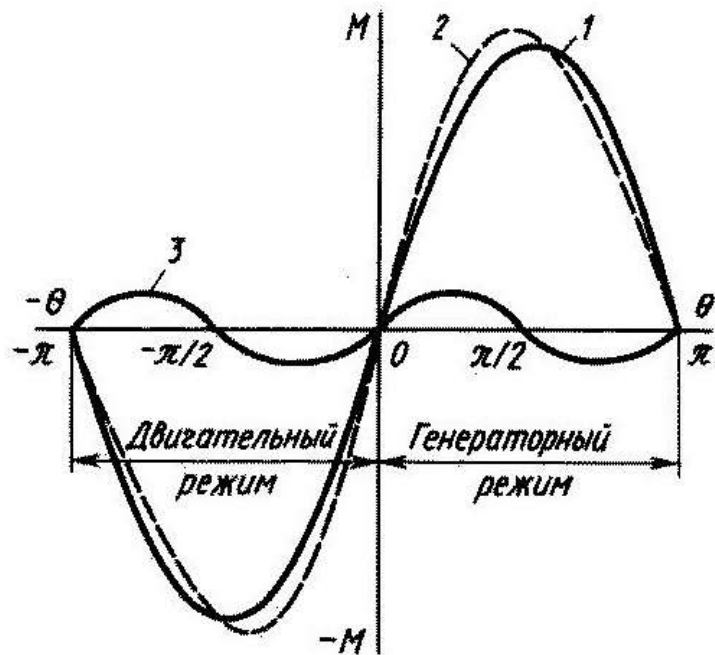


Недостаток - дополнительные зазоры на пути потока

Синхронные электрические машины

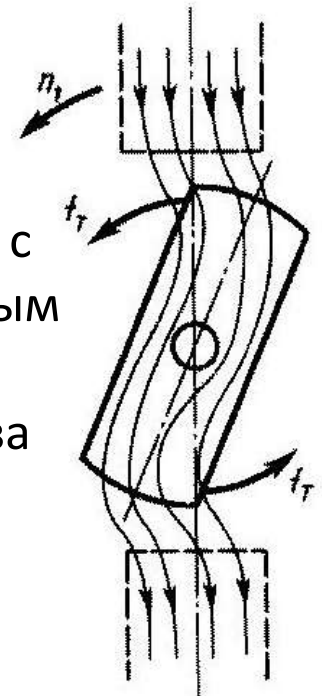
Синхронный реактивный двигатель

При наличии реактивного момента (момента явнополюсности) можно отказаться от основного (электромагнитного) момента



Магнитный поток создается реактивным током в обмотке статора

Явно выраженные полюсы стремятся к положению с минимальным магнитным сопротивлением → поворачиваются вслед за полем статора



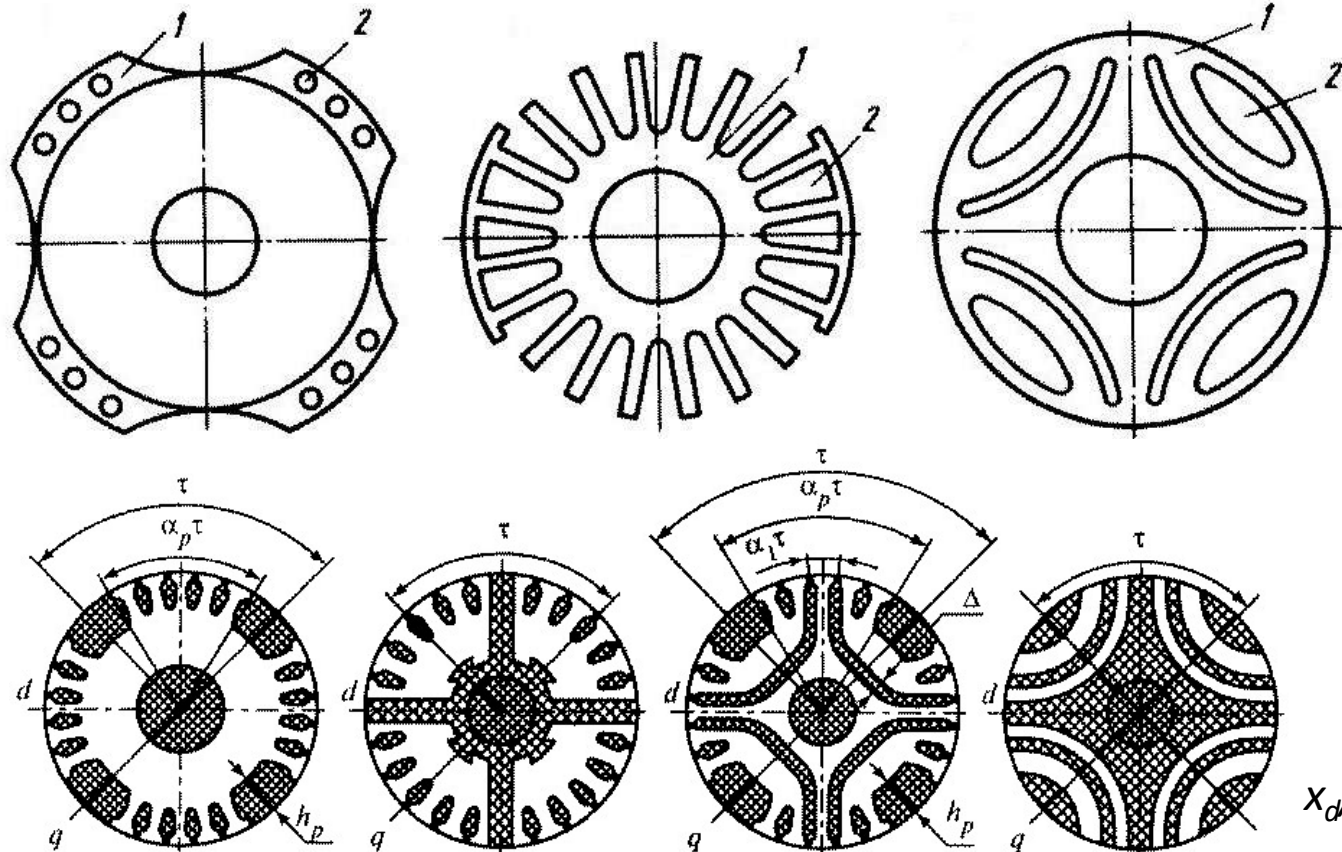
Применяются в микромашинах

Синхронные электрические машины

Синхронный реактивный двигатель

Обмотка статора – любая, создающая вращающееся поле

Конструкции ротора – явнополюсность (x_d/x_q) + пусковая обмотка



x_d/x_q до 2

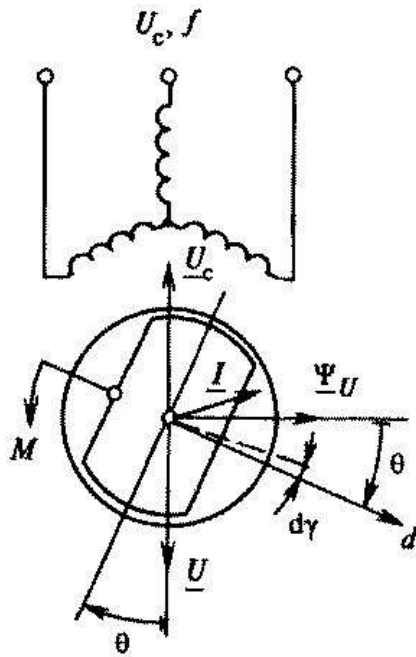
x_d/x_q до 5

Синхронные электрические машины

Синхронный реактивный двигатель

Электрохимическое преобразование энергии

$$M = \left(\frac{dW}{d\gamma} \right)_{i=\text{const}}$$



Энергия магнитного поля $W \approx i^2 L$

(ток якоря, индуктивность обмотки якоря)

При смещении ротора (d) в направлении оси МДС (поля) якоря $d\gamma > 0$

индуктивность якоря возрастает ($L_d > L_q \rightarrow dL > 0$), и приращение энергии $dW > 0$

Т.о. момент $M > 0$, т.е. направлен в сторону $d\gamma$ и стремится повернуть ротор в сторону оси поля

Синхронные электрические машины

Синхронный реактивный двигатель

Электромагнитный момент

$$M = \frac{mU^2}{2\omega_c} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

- пропорционален разнице $(x_d - x_q)$
- (с увеличением $(x_d - x_q)$ также растет $\delta_{\text{экв}}$ и потребление $Q_{\text{реакт}}$)
- зависит от квадрата напряжения (СРД чувствителен к U сети)
- [небольшой] диапазон углов нагрузки $0 - 45^\circ$

В микромашинах нельзя пренебрегать активным сопротивлением обмотки r_s . Тогда момент:

$$M_{dq} = A_{dq} \sin 2(\theta_U + \alpha_{dq}) - M_{dqT}$$

Амплитуда момента $A_{dq} = \frac{mU^2(x_d - x_q)}{2\omega_c(r_s^2 + x_d x_q)^2} \sqrt{(x_d x_q - r_s^2)^2 + r_s^2(x_d + x_q)^2}$

Тормозной момент $M_{dqT} = \frac{mU^2}{2\omega_c(r_s^2 + x_d x_q)^2} r_s (x_d - x_q)^2$

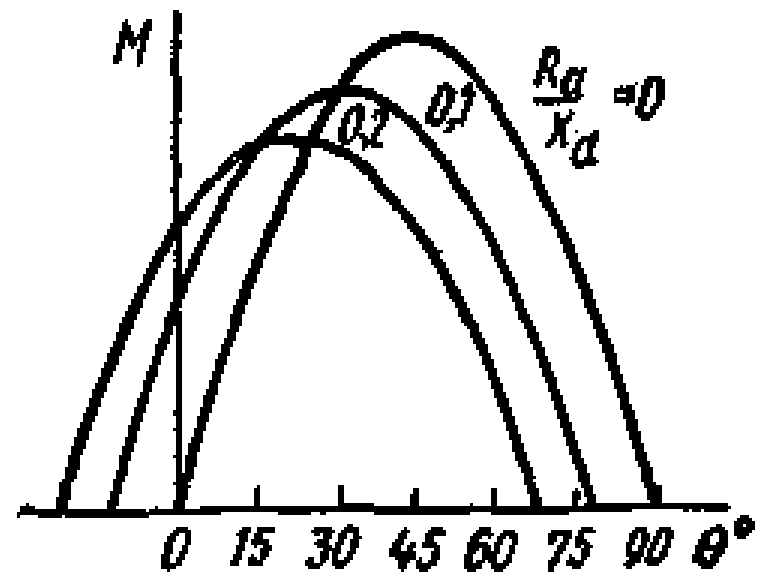
Синхронные электрические машины

Синхронный реактивный двигатель

С увеличением r_s

максимальный момент уменьшается
(растет тормозной момент) и
максимальный угол нагрузки
уменьшается (растет фазовый сдвиг)

$$M_{dq} = A_{dq} \sin 2(\theta_U + \alpha_{dq}) - M_{dqT}$$



Как и у всех синхронных двигателей прямой пуск невозможен

В микромашинах применяют асинхронный пуск (нужна короткозамкнутая пусковая обмотка на роторе)

Синхронные электрические машины

Синхронный реактивный двигатель

Достоинства:

- Простая конструкция
- Дешевизна
- Надежность
- Не требуется источник постоянного тока для возбуждения

Недостатки:

- Малый коэффициент мощности (до 0,5)
- Малый пусковой момент (асинхронный)

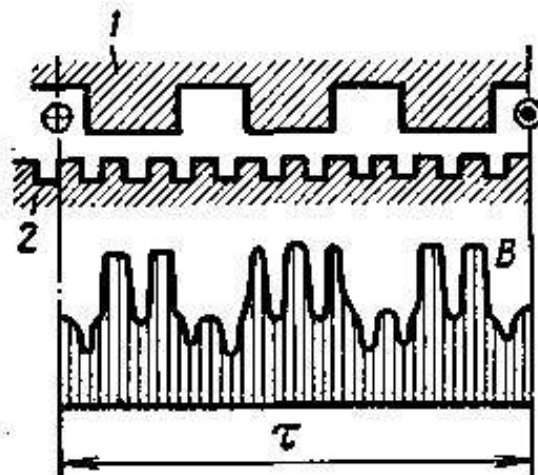
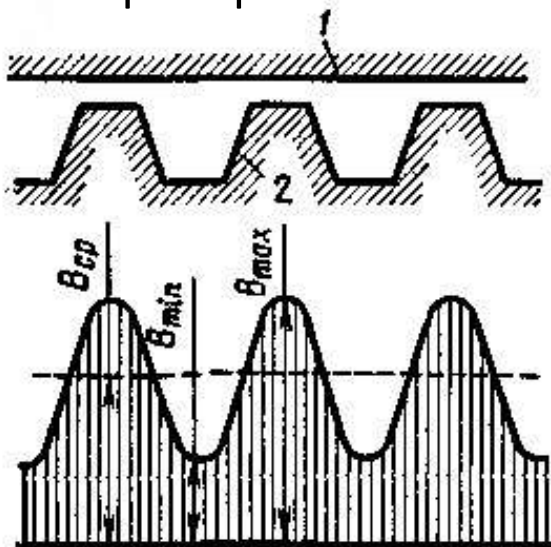
Синхронные электрические машины

Индукторные машины

Обмотки якоря и ОВ расположены на якоре (зубчатом или гладком), ротор не имеет обмоток, но имеет зубчатую структуру

Поле возбуждения сцеплено с обмоткой якоря через зубчатый ротор

При вращении ротора периодически изменяется взаимная индуктивность между ОВ и ОЯ → возможно электромеханическое преобразование энергии.



Частота изменения взаимной индуктивности пропорциональна Z_2

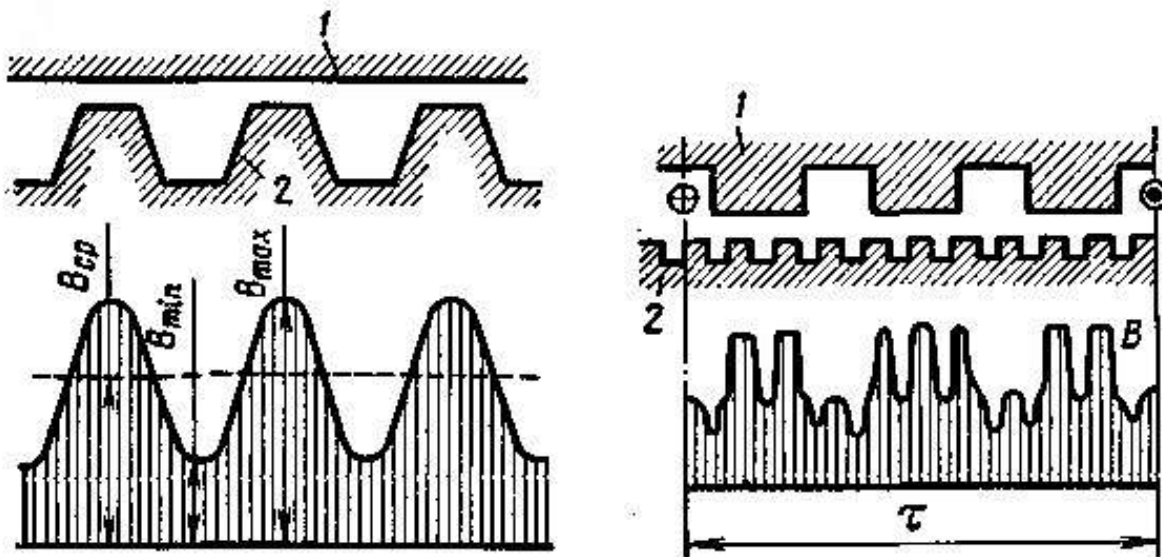
$$f = \frac{Z_2 \Omega}{2\pi}$$

Синхронные электрические машины

Индукторные машины

При питании ОВ постоянным током в обмотке якоря наводится ЭДС с частотой изменения взаимной индуктивности → индукторный генератор (высокочастотный)

При подключении ОЯ к сети с такой же частотой возможна работа в двигательном режиме (тихоходный двигатель при $f_1=50$ Гц)



Синхронные электрические машины

Индукторные машины

Теория электромеханического преобразования энергии в индукторной машине аналогична обычной ЭМ

Но ее массогабаритные показатели хуже: поток в зубце не изменяется по направлению, только по величине → амплитуда изменения индукции в 3-4 раза меньше обычной → меньше ЭДС

Энергетические показатели также хуже: множество гармоник поля, большинство из которых не рабочие; дополнительные потери на высокочастотное перемагничивание

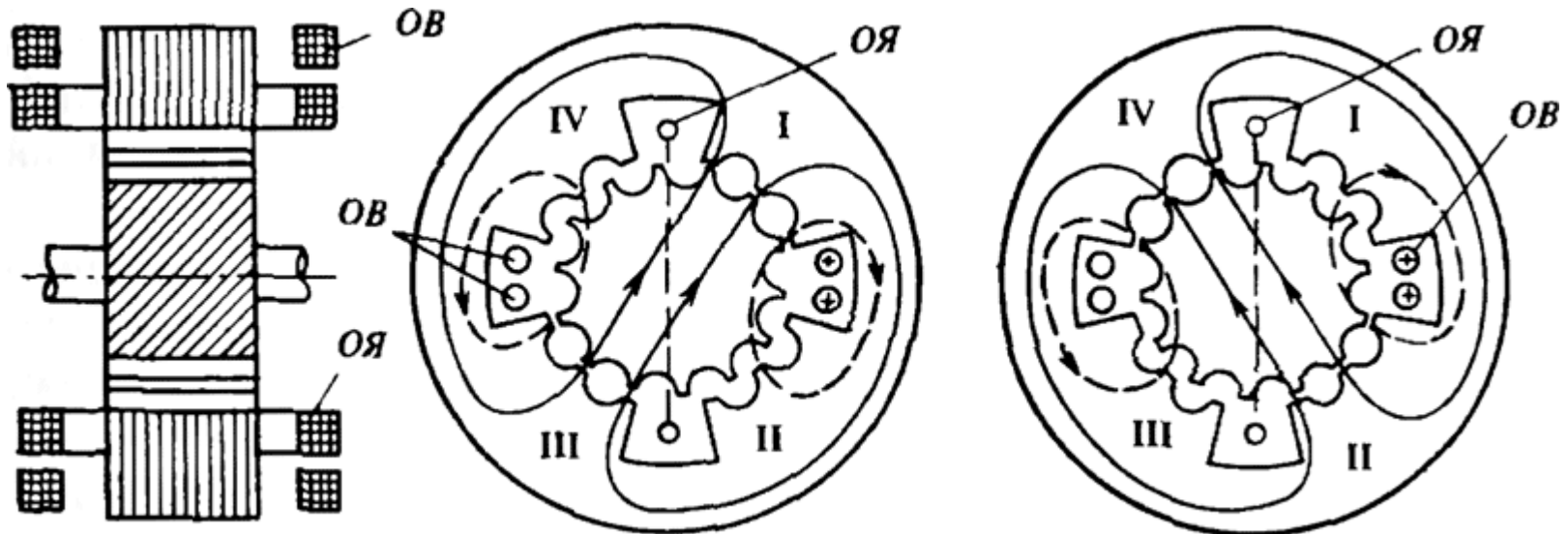
Область применения:

- высокочастотные генераторы
- тихоходные двигатели

Синхронные электрические машины

Индукторные машины

Пример разноименнополюсной машины



ОВ – в больших пазах ($p = 1$): поток из III-II в IV-I

ОЯ ($p=1$) смещена на $\frac{1}{4}$ периода относительно поля ОВ

Число зубцов ротора кратно нечетному числу $2p$ (здесь $Z_2 = 14$)

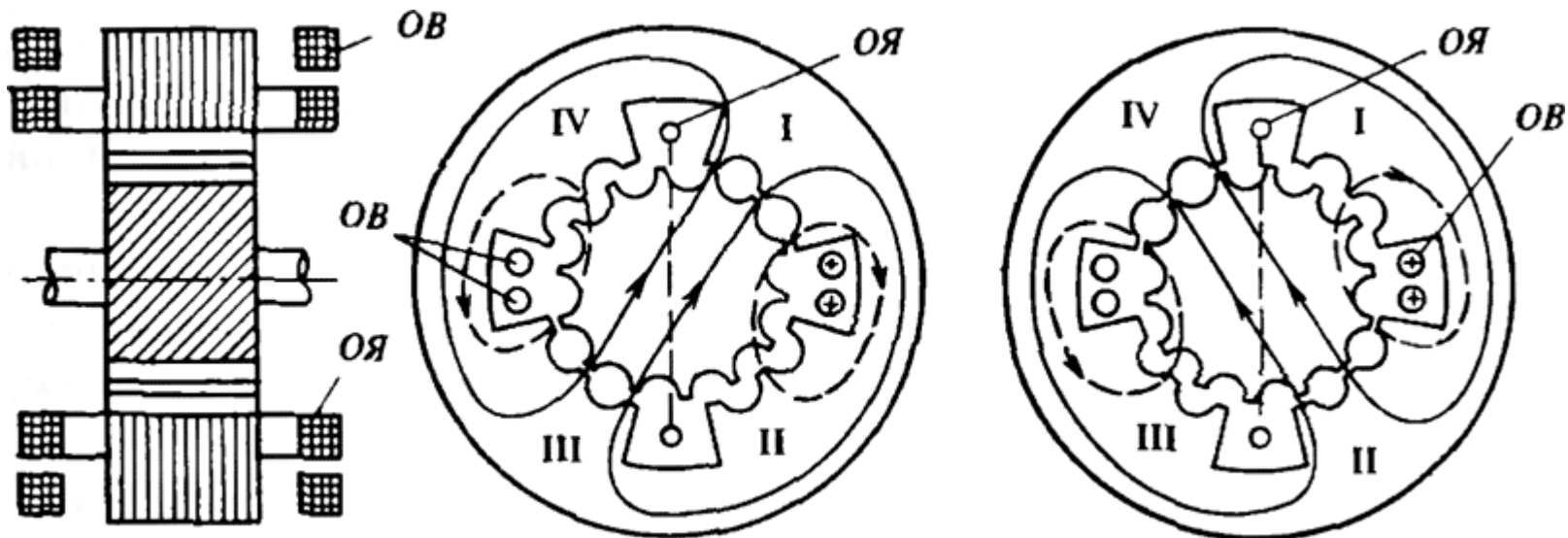
На зубцах статора – малые зубцы с тем же угловым шагом
но на соседних зубцах сдвинуты на половину шага

$$\alpha_z = \frac{2\pi}{Z_2}$$

Синхронные электрические машины

Индукторные машины

При вращении ротора проводимость изменяется с шагом α_z



Положение 1: наибольшая проводимость III – I → направление потока

Положение 2 (поворот на половину шага): наибольшая проводимость II – IV → направление потока через ОЯ изменилось

Положение 3 – аналогично 1

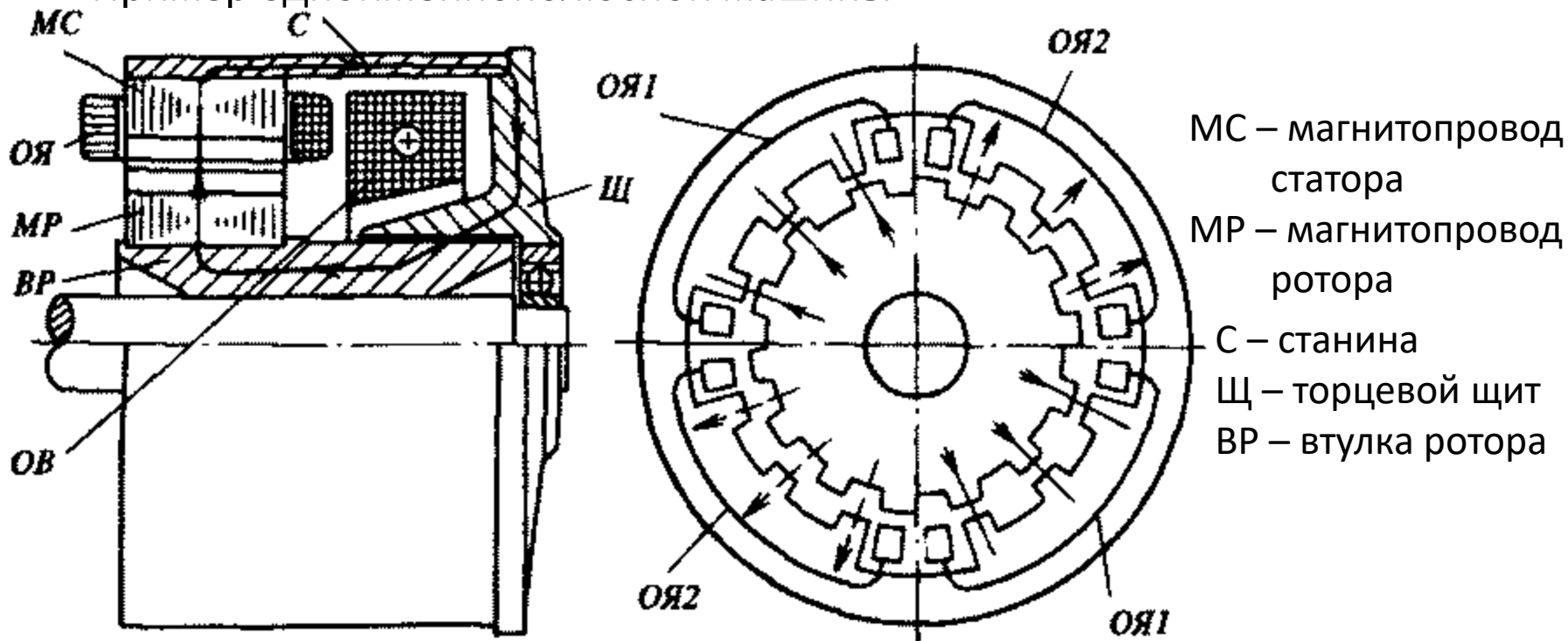
→ Изменение потокосцепления ОЯ с периодом

$$T = \frac{\alpha_z}{\Omega}$$

Синхронные электрические машины

Индукторные машины

Пример одноименнополюсной машины



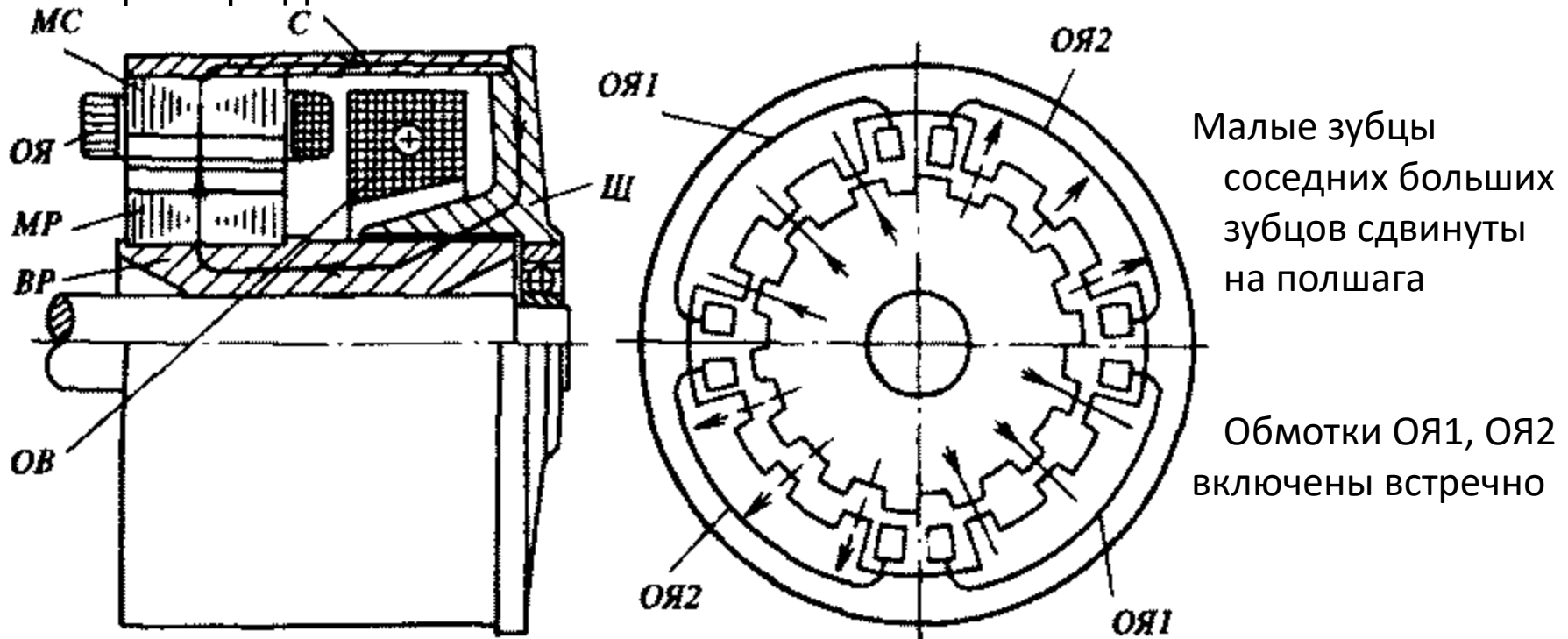
ОВ – кольцевая обмотка → осесимметричное поле → одно направление поля в зазоре (всегда от ротора к статору)

Катушки ОЯ1, ОЯ2 – вокруг 4 больших зубцов статора с малыми зубцами

Синхронные электрические машины

Индукторные машины

Пример одноименнополюсной машины



Положение 1: потокосцепление с ОЯ1 максимально, с ОЯ2 – минимально

Положение 2: потокосцепление с ОЯ1 минимально, с ОЯ2 – максимально

Период изменения потокосцепления соответствует α_z

Синхронные электрические машины

Индукторные синхронные генераторы

Первый подобный генератор – 1854 г. (Найт)

Почти современная конструкция – 1877 г. (П.Н.Яблочков)

С начала 20 в – питание антенного контура радиостанций
(ОЯ с $p = 1$, n_2 до 20,000 об/мин)

Сейчас выпускаются генераторы с частотой 1 – 10 кГц
(электроплавка, электросварка, электротермообработка;
питание высокочастотного электропривода)

Преобразователь частоты: АД + индукторный генератор

Синхронные электрические машины

Индукторные синхронные двигатели

Синхронная частота вращения

$$n_c = \frac{60 f_1}{Z_2}$$

При $f_1 = 50$ Гц и $Z_2 = 100$ частота вращения $n_2 = 0,5$ об/с или 30 об/мин

→ тихоходные двигатели

Питание ОВ:

- от сети постоянного тока
- от постоянных магнитов
- от сети переменного тока через выпрямитель
- самовозбуждение – ОВ замкнута через выпрямитель и имеет индуктивную связь с ОЯ $p_2/p_1 =$ нечетное целое

Пуск в ход – прямой пуск при малом моменте инерции и малой n_2

Иногда – пусковая обмотка на роторе ($M_{\text{пуск}} > M_c$, но $M_{\text{пуск}} < M_{\text{макс}}$)

Индукторный реактивный двигатель – без ОВ, однако

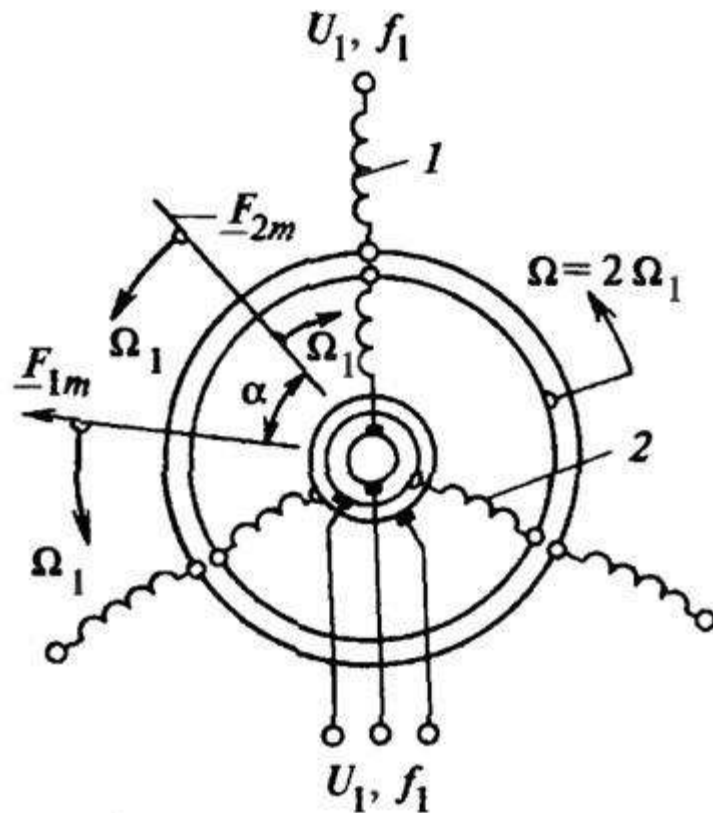
$$n_c = \frac{120 f_1}{Z_2}$$

(скорость вдвое больше обычного индукторного двигателя)

Синхронные электрические машины

Синхронный двигатель двойного питания

Конструктивно – асинхронная машина с фазным ротором: на статоре и роторе 3-фазные обмотки с одинаковым $w_{\text{эфф}}$, включенные в сеть



В двух обмотках – одинаковые U и $f \rightarrow$
одинаковые токи I_1, I_2 и МДС F_1, F_2

Но вращаются в разные стороны

Электромеханическое преобразование энергии возможно при неподвижных полях статора и ротора, т.е. при частоте вращения

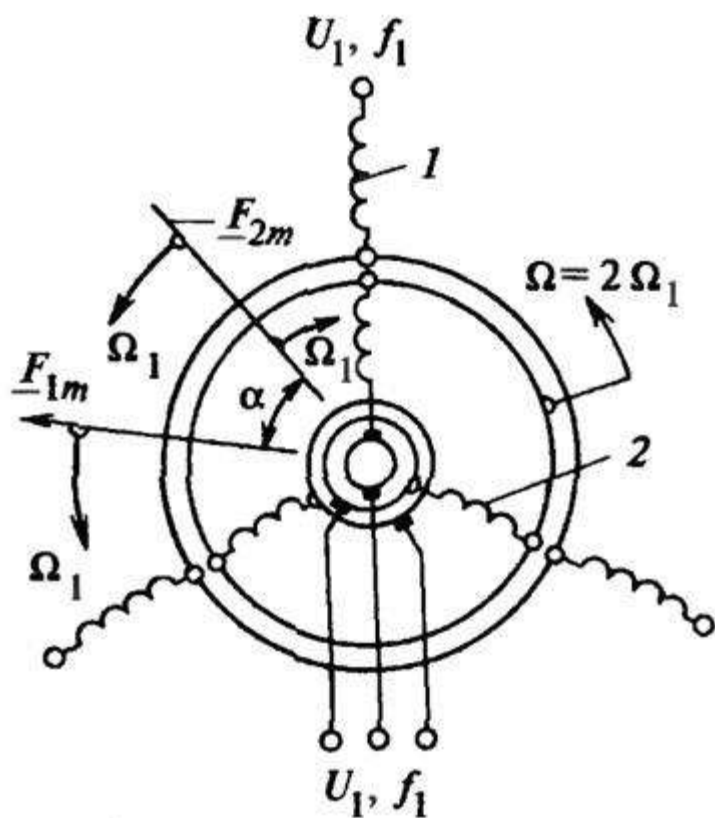
$$\Omega = \frac{\omega}{p} = \frac{\omega_1 + \omega_1}{p} = 2 \frac{\omega_1}{p} = 2\Omega_c$$

Синхронные электрические машины

Синхронный двигатель двойного питания

Электромагнитный момент

$$M = \frac{m_1 P}{\sqrt{2}} \Psi_{10m} I_1 \sin \frac{\alpha}{2}$$



Ψ_{10m} – потокосцепление результирующего поля

I_1 – ток статора

α – угол между МДС статора и ротора
(здесь - угол нагрузки)

Пренебрегая потерями и рассеянием,
активная мощность двигателя

$$P = M\Omega = \frac{m_1 U_1^2}{X_0} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

- Применяется для получения $2n_c$
- Требуется разгонный двигатель
- Склонен к качаниям

Синхронные электрические машины

Асинхронизированная синхронная машина

На роторе – 2-фазная ОВ, питающаяся переменным током с частотой f_2
(от управляемого преобразователя, $f_2 \ll f_1$, от 0 до 0,5 Гц)

Если $f_2 \neq 0$, то поле возбуждения вращается относительно ротора с $\Omega_2 \neq 0$

В случае аварийных / аномальных режимов возможно качание ротора и выпадение из синхронизма (КЗ в сети, отключение нагрузки, изменение f_1),

т.е. мгновенная скорость ротора Ω не равна скорости поля Ω_1 ,

появляется проскальзывание
$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1}$$

Если ОВ питать переменным током с частотой $f_2 = sf_1$, поле ОВ будет вращаться относительно ротора со скоростью $\Omega_2 = s\Omega_1 = \Omega_1 - \Omega$, т.е. оно будет неподвижно относительно поля статора

Автоматический регулятор f_2 сохраняет устойчивость СМ в аварийных режимах (как двигатель, так и генератор)

Синхронные электрические машины

Асинхронизированная синхронная машина

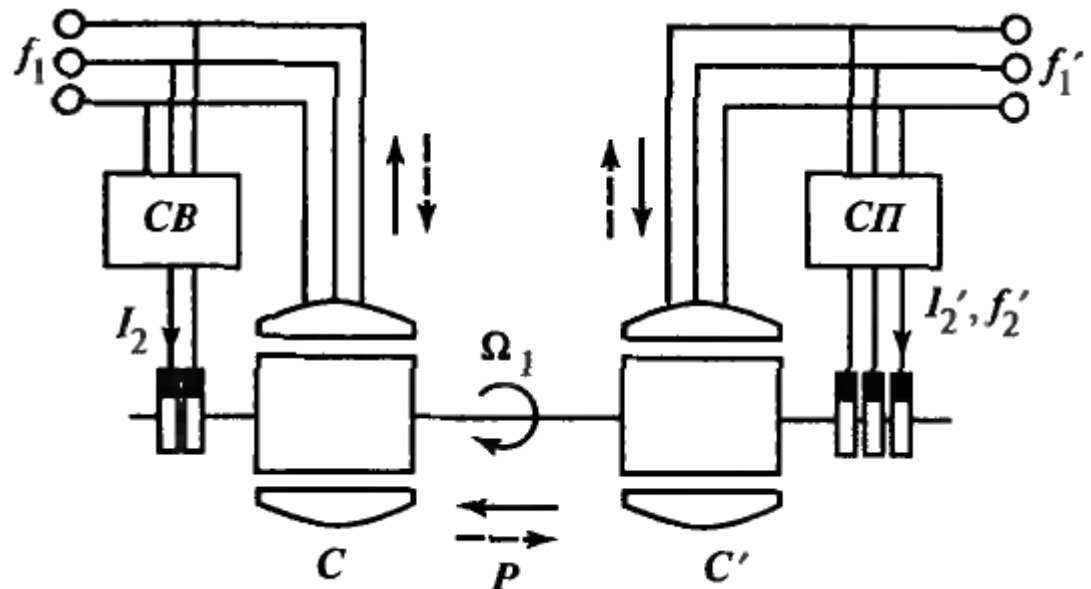
Ротор сложнее, преобразователь частоты дорогой и потребляет активную мощность $P_2 = sM\Omega$ (хотя $s = \pm 0,01$) → применяется в крупных ответственных установках

Пример использования – «гибкая связь» между энергосистемами с разными частотами $f_1 - f'_1 = (0,5-1,0)\%$

На одном валу:

C – обычная СМ в сети f_1 с системой возбуждения постоянного тока I_2

C' – асинхронизированная СМ в сети f'_1 с возбуждением от статического преобразователя I'_2, f'_2



Синхронные электрические машины

Асинхронизированная синхронная машина

Частота тока возбуждения $f_2' = s f_1'$, где скольжение $s = \frac{f_1' - f_1}{f_1'}$

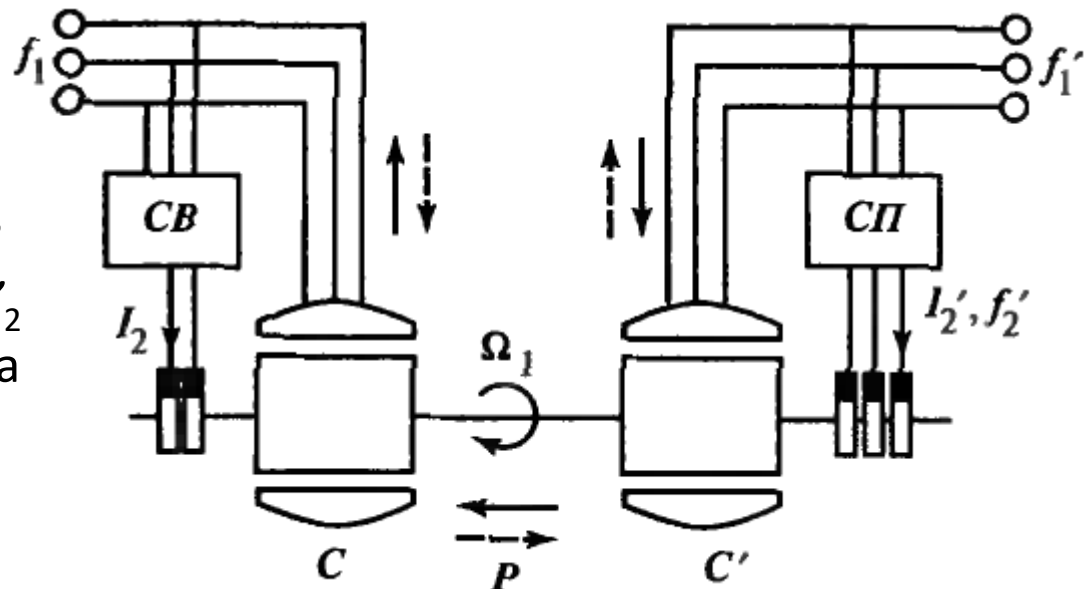
Скорость вращения общего вала – Ω_1 (определяется частотой f_1)

Скорость вращения поля статора в C' – Ω_1' (определяется частотой f_1')

Скорость вращения поля возбуждения относительно ротора в C' – Ω_2'

В результате в машине C' поле статора и поле возбуждения вращаются синхронно

Направление и величина передаваемой мощности P определяются фазой тока I_2' и углом между МДС статора и МДС ротора машины C'



Машины постоянного тока

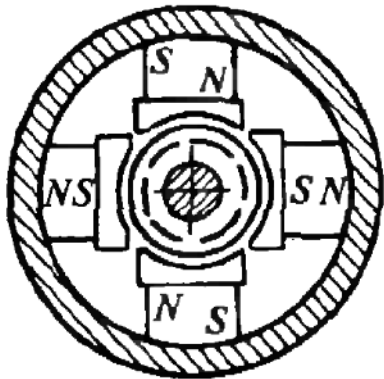
Машины с постоянными магнитами

- Отсутствие обмотки возбуждения → меньше потери, больше КПД
- Лучше условия охлаждения
- Меньше габариты, масса и стоимость
- Стабильное возбуждение (не зависит от U и t°)
- Невозможно регулировать n изменением потока
- Материалы ПМ дороги и сложны в изготовлении
- Машины в сотни Вт оказываются дороже и крупнее обычных



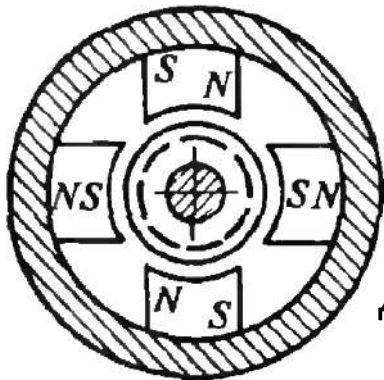
Машины постоянного тока

Машины с постоянными магнитами



Радиальное расположение магнитов удобно при $p > 2$

Малая h_m – ПМ чувствительны к размагничивающему действию МДС якоря – нужны полюсные наконечники и редкоземельные магниты



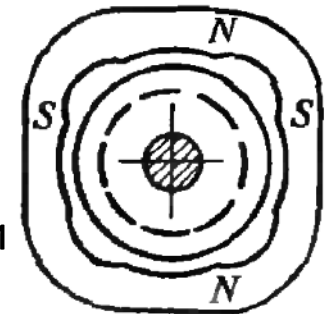
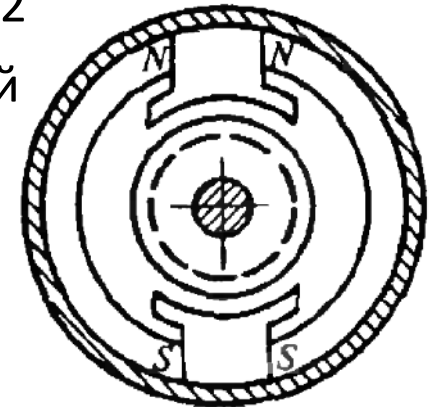
Тангенциальные ПМ – при $2p = 2$

Допустимы материалы с малой коэрцитивной силой

Двигатели применяются в маломощном приводе

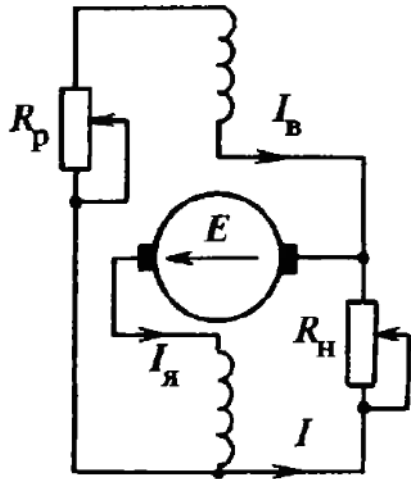
Регулирование n – изменением U
(возможно импульсное регулирование)

Генераторы применяются в САУ как датчики частоты вращения (тахогенераторы)



Машины постоянного тока

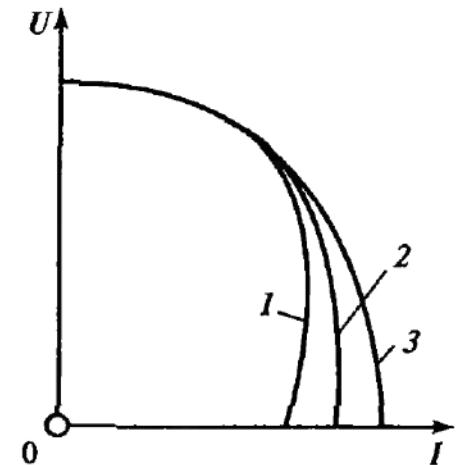
Генераторы с продольным комбинированным возбуждением



Генератор со смешанным встречным возбуждением + дополнительная обмотка независимого возбуждения
Размагничивающее действие последовательной обмотки
→ круто падающая внешняя характеристика

Изменение характеристики (1-2-3) возможно за счет регулировочных R

- Генератор для дуговой сварки – при разной длине дуги ток Const
- Генератор для питания двигателей, которые могут остановиться (экскаватор, тепловоз) – ограничение тока КЗ



Машины постоянного тока

Генераторы с двойной полюсной системой (с расщепленными полюсами)

Применяются для дуговой электросварки

Полюс N : большой N_1 + малый N_2

Полюс S : большой S_1 + малый S_2

(большие полюса шире и не насыщаются,
малые почти всегда насыщены)

Обмотки возбуждения включены
параллельно между щетками B и b

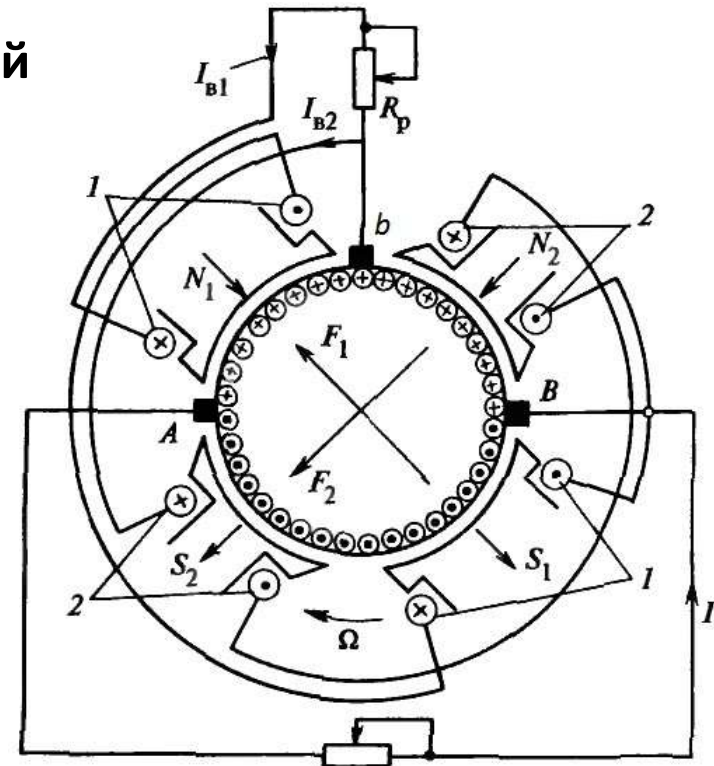
В цепи ОВ 1 – регулировочный реостат R_p

Направление вращения Ω такое, чтобы

- составляющая МДС якоря F_2 усиливала поле малых полюсов N_2 и S_2 ,
- составляющая МДС якоря F_1 ослабляла поле больших полюсов N_1 и S_1

МДС F_1 : токи якоря $AB - bB$

МДС F_2 : токи якоря $AB - Ab$



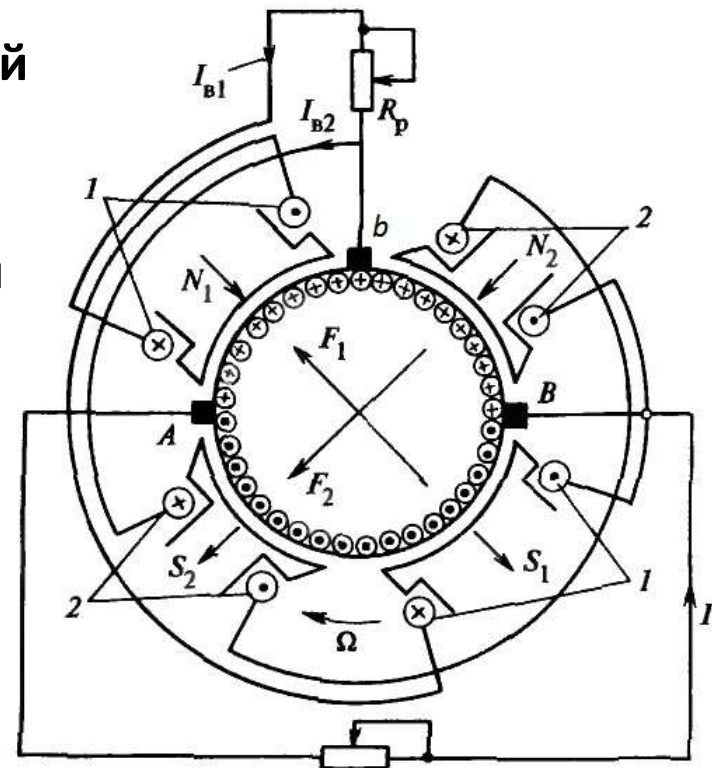
Машины постоянного тока

Генераторы с двойной полюсной системой (с расщепленными полюсами)

МДС якоря: ослабляет поток Φ_1 (от N_1-S_1)
но не меняет Φ_2 (от N_2-S_2) – они насыщены

При увеличении тока нагрузки I
полный поток $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ уменьшается
→ уменьшается ЭДС и U генератора

Т.к. $\Phi_2 \approx \text{Const}$, напряжение $U_{bB} \approx \text{Const}$ →
токи возбуждения $I_{B1}, I_{B2} \approx \text{Const}$
(развозбуждения не происходит)



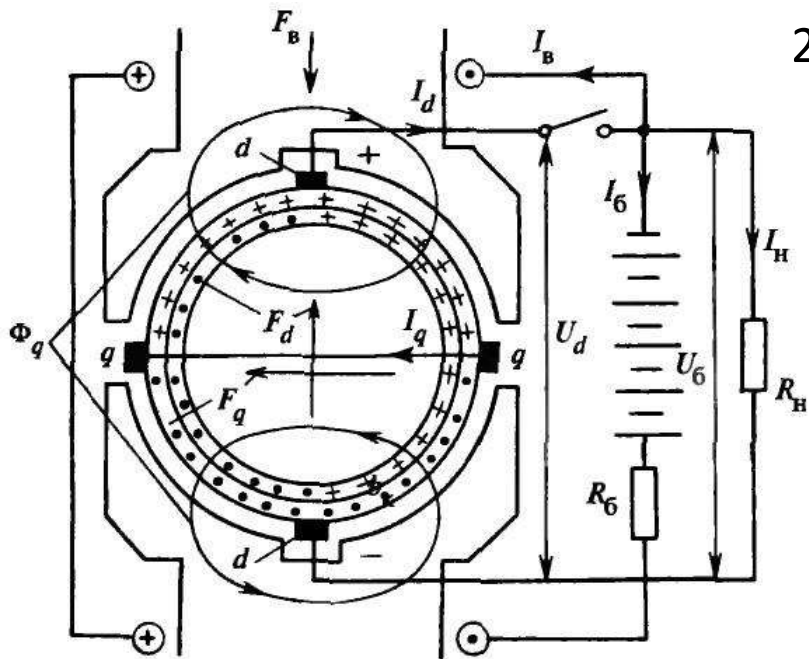
С ростом нагрузки (I) напряжение резко падает и даже $I_{кз}$ не слишком большой («падающая» внешняя характеристика – для дуговой электросварки)

Для регулирования наклона характеристики – реостат R_p
(увеличение R_p уменьшает $U_{ХХ}$ и $I_{кз}$)

Выпускаются сварочные генераторы с $U = 35$ В и I до 500 А

Машины постоянного тока

Генераторы с поперечным возбуждением



Используется для электроснабжения пассажирских ж/д вагонов

2-полюсный генератор с 2 комплектами щеток продольные $d-d$ и поперечные $q-q$

Увеличенные полюсные наконечники – для замыкания потока Φ_q)

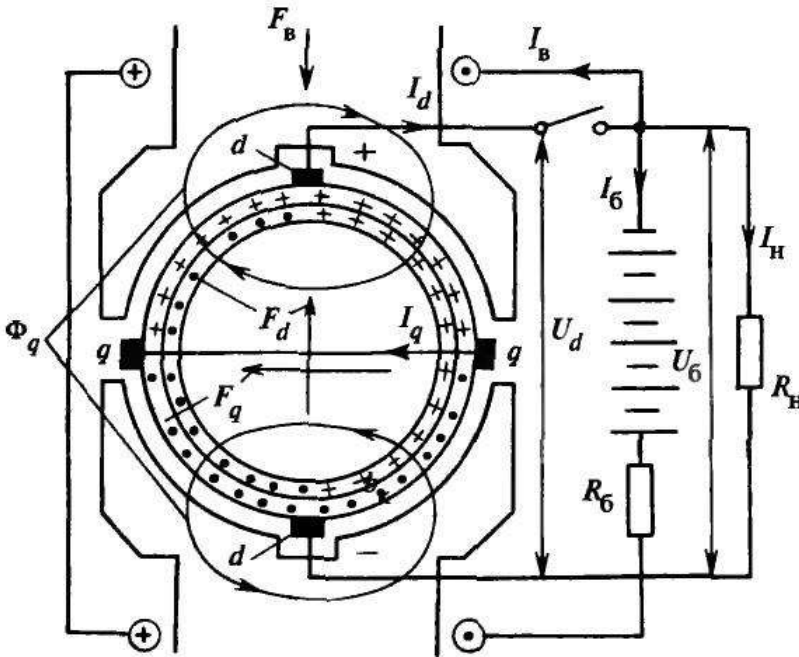
Вырезы в середине полюсов – для местного ослабления продольного поля в зоне коммутации I_d

Генератор работает на нагрузку R_H параллельно аккумуляторной батарее:

- при малой скорости $U_d < U_6$ реле отключает генератор и нагрузка работает от АКБ
- при скорости Ω_1 ($U_d = U_6$) реле подключает генератор
- при большой скорости $U_d > U_6$ и генератор питает нагрузку и заряжает АКБ

Машины постоянного тока

Генераторы с поперечным возбуждением



При малых Ω ($d-d$ отключено, $q-q$ замкнено)

Ток возбуждения $I_B = \text{Const}$ (питание от АКБ)

→ поток $\Phi_d = \Lambda_d F_B$ → ЭДС $E_q = c_0 \Omega \Phi_d$

→ ток $I_q = E_q / R_{я}$ → МДС $F_q = k_1 I_q$

→ поток $\Phi_q = \Lambda_q F_q = \Lambda_q k_1 E_q / R_{я} = \Lambda_q k_1 c_0 \Omega \Lambda_d F_B / R_{я}$

(I_q , F_q и Φ_q пропорциональны F_B и Ω)

→ на щетках $d-d$ наводится ЭДС $E_d = c_0 \Omega \Phi_q$
или $E_d = k_3 \Omega^2 F_B / R_{я}$ (где $k_3 = c_0^2 \Lambda_d \Lambda_q k_1$)

При больших Ω генератор ($d-d$) подключается к АКБ и нагрузке

→ продольный ток якоря $I_d = (E_d - U_6) / R_{я}$ (пусть $R_6 = 0$ и $U_6 = E_B = \text{Const}$)

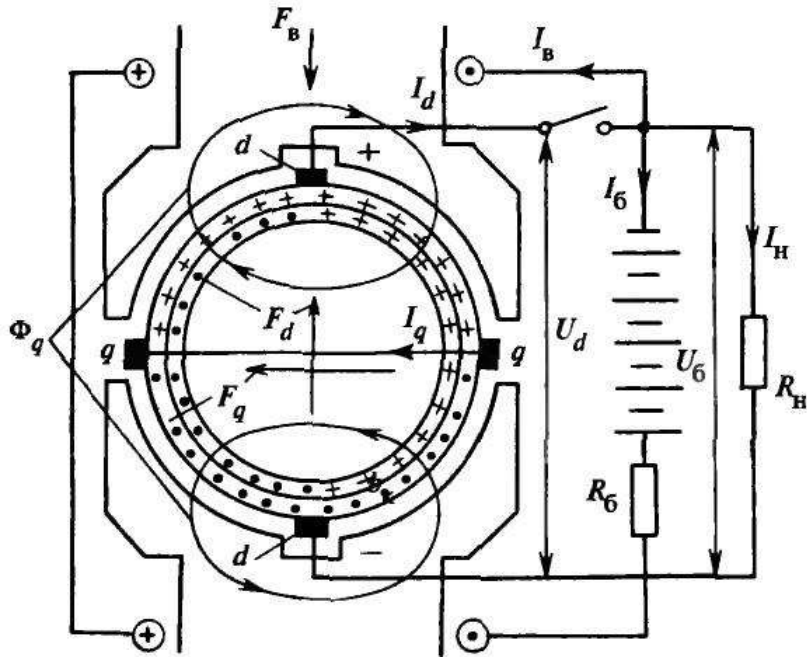
→ МДС $F_d = k_2 I_d$ (всегда встречно F_B независимо от направления Ω)

→ уменьшает поток $\Phi_d = \Lambda_d (F_B - F_d)$ и сдерживает рост ЭДС при росте Ω

$$E_q = c_0 \Lambda_d \Omega (F_B - k_2 I_d); \quad E_d = k_3 \Omega^2 (F_B - k_2 I_d) / R_{я}$$

Машины постоянного тока

Генераторы с поперечным возбуждением



Полярность щеток $d-d$ не зависит от направления вращения якоря:

- с изменением направления Ω изменится направление F_q и Φ_q , но ЭДС E_d определяется одновременно Ω и Φ_q ($E_d = c_0 \Omega \Phi_q$)
- Подвагонный генератор выдает напряжение одинаковой полярности при движении вагона в любую сторону

Сейчас чаще применяют бесконтактные генераторы переменного тока с выпрямителями

Машины постоянного тока

Электромашинные усилители

– усиление мощности, получаемой от датчиков в системе управления

Генератор с независимым возбуждением

- якорь вращается приводным двигателем с $\Omega = \text{Const}$
- на ОВ поступает сигнал управления: входная мощность $P_{\text{ВХ}} = I_{\text{ВХ}} U_{\text{ВХ}}$
- с ОЯ снимается усиленный сигнал: выходная мощность $P_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ВЫХ}} U_{\text{ВЫХ}}$
- коэффициент усиления мощности $k_y = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}} = 50 - 100$
- усиление – за счет мощности приводного двигателя $(P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ВХ}}) / \eta_y$
(с учетом КПД всего усилителя)

Если генератор ненасыщен и $U_{\text{ОСТ}}$ мало, то $k_y = \text{Const}$ и $P_{\text{ВЫХ}} \sim P_{\text{ВХ}}$

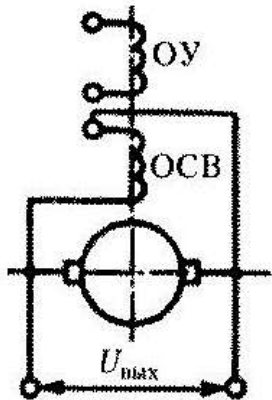
При изменении $U_{\text{ВХ}}$ мощность $P_{\text{ВЫХ}}$ изменяется с запаздыванием (постоянные времени обмоток) → быстроедействие усилителя

Для повышения быстрогодействия – весь магнитопровод шихтуют (ослабляется действие вихревых токов при переходных процессах)

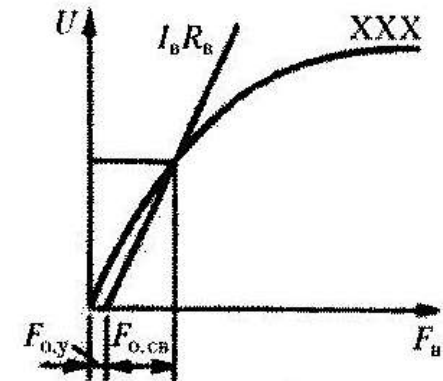
Машины постоянного тока

Электромашинные усилители

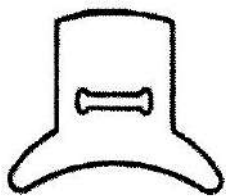
Электромашинный усилитель продольного поля («рототрол»)



- генератор постоянного тока с двумя ОВ
- обмотка управления ОУ получает входной сигнал
- обмотка самовозбуждения ОСВ включена параллельно якорю, но ее R чуть больше критического
- с ОЯ снимается усиленный сигнал



В отсутствие U_y самовозбуждения не происходит
Сигнал управления смещает характеристику на F_{Oy}
→ появляется $U_{\text{вых}} = f(U_y)$



Для уменьшения постоянной времени магнитную систему делают насыщенной – вырезы в полюсах (мостики насыщения) → наклон XXX – повышение устойчивости работы при малых сигналах управления

Машины постоянного тока

Электромашинные усилители

Двухякорный ЭМУ

двухступенчатый двухякорный усилитель – каскадное включение двух генераторов:

- управляющий сигнал → на ОВ первого ГПТ
- напряжение якоря первого ГПТ → на ОВ второго ГПТ
- с якоря второго ГПТ снимают выходную мощность

Для уменьшения массы и габаритов:

- оба якоря – на одном валу
- магнитные системы двух ГПТ – в едином корпусе

Коэффициент усиления $k_y = k_{y1}k_{y2}$ – может достигать 10000



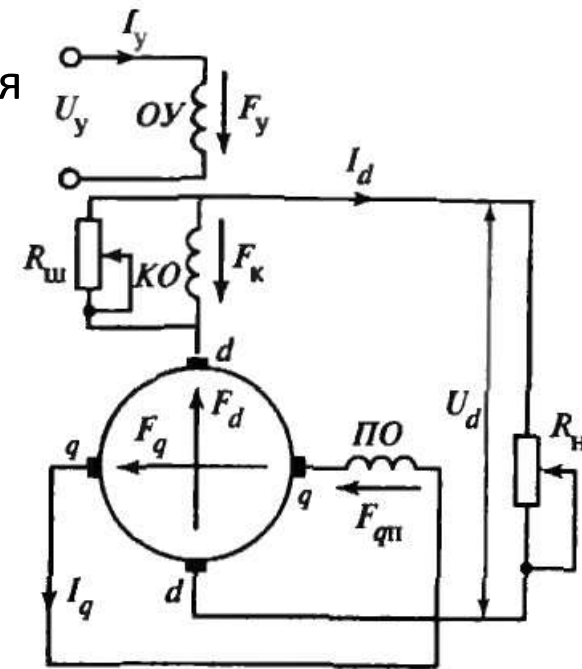
Машины постоянного тока

Электромашинные усилители

Одноякорный ЭМУ с поперечным возбуждением

Генератор с поперечным возбуждением в неявнополюсном исполнении со щетками на осях q - q и d - d

- сигнал управления U_y – на обмотке управления
- ток $I_y \rightarrow$ продольный поток Φ_y
 \rightarrow ЭДС в поперечной цепи якоря $E_q = c_0 \Omega \Phi_y$
 \rightarrow поперечный ток I_q (через ОЯ q - q и поперечную подмагничивающую обмотку ПО)
- ток $I_q \rightarrow$ поперечный поток $\Phi_q = \Lambda_q (F_q + F_{qп}) \sim I_q$
- поток $\Phi_q \rightarrow$ ЭДС в продольной цепи якоря $E_d = c_0 \Omega \Phi_q \rightarrow$ выходной ток $I_{\text{вых}} = I_d = E_d / (R_{\text{н}} + R_{\text{я}})$ и выходное напряжение $U_{\text{вых}} = U_d = E_d - I_d R_{\text{я}}$
- коэффициент усиления $k_y = (U_{\text{вых}} I_{\text{вых}}) / (U_y I_y)$



«амплидин»

Машины постоянного тока

Электромашинные усилители

Одноякорный ЭМУ с поперечным возбуждением

Чтобы продольная МДС F_d (созданная током I_d) не размагничивала поток ОУ используется компенсационная обмотка КО в выходной цепи (в ней протекает ток I_d)

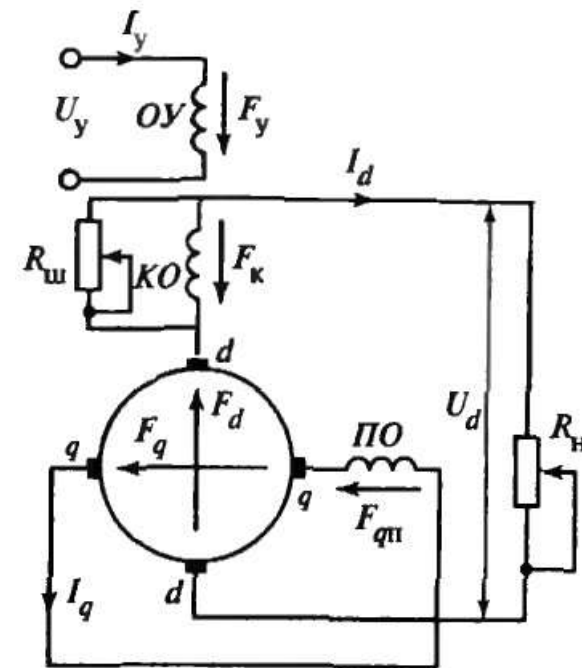
МДС F_k компенсирует МДС F_d (обе МДС $\sim I_d$)

Точная настройка $F_k = F_d$ – резистором $R_{ш}$

Подмагничивающая обмотка позволяет получать Φ_q меньшим током $I_q \rightarrow$ лучше коммутация по qq

Доп. полюсы можно ставить только в зоне секций, коммутируемых щетками dd

Для уменьшения $U_{ост}$ и влияния гистерезиса – размагничивающая обмотка переменного тока вокруг ярма статора



Выпускаются на мощности до 20 кВт
Применяются в системе Г-Д

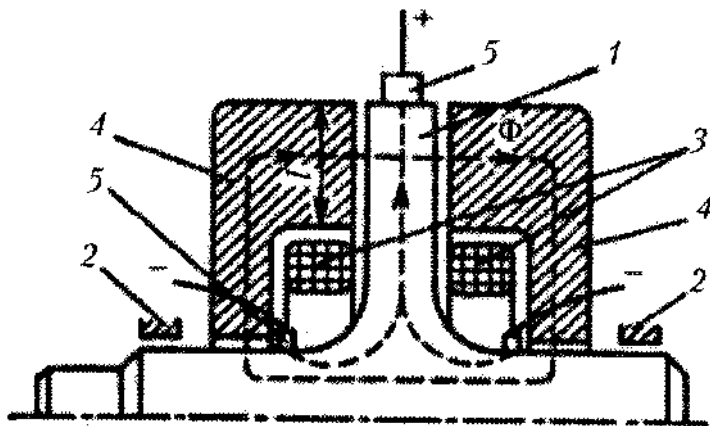
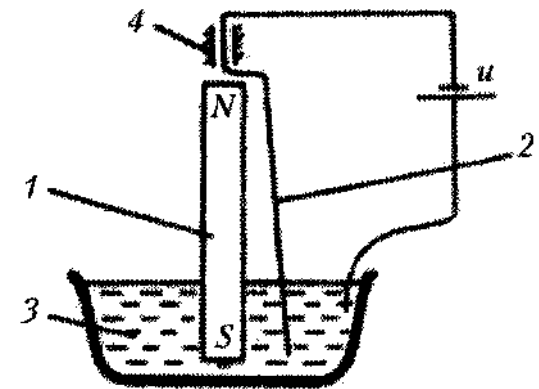
Машины постоянного тока

Униполярные машины

Двигатель М.Фарадея (1821 г.):

проводник с током в магнитном поле (ПМ)
+ скользящий контакт (ртуть)

Униполярная (одноименнополюсная) машина
– в якоре генерируется ЭДС постоянного
направления (нет преобразователя частоты)



Униполярный генератор:

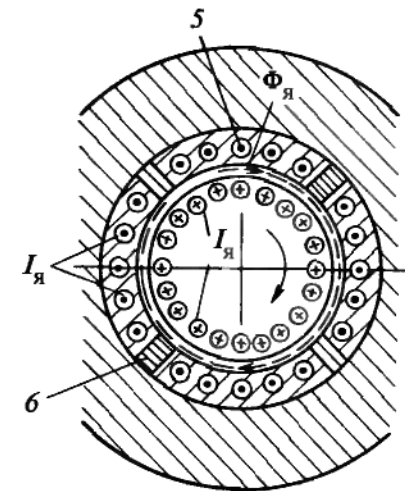
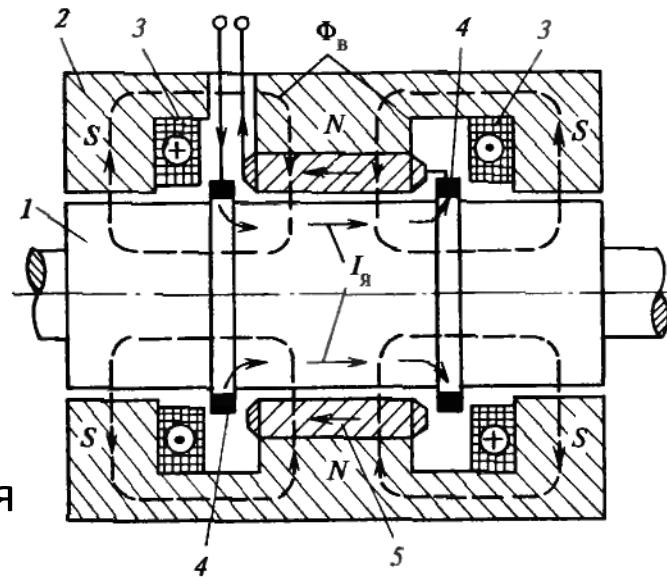
- массивный ротор с диском в подшипниках
- кольцевая ОВ → Φ одного направления
- статор – кольцевые магнитопроводы
- щетки «+» и «-» – на поверхности ротора
- ЭДС и ток в роторе – однонаправленные

Машины постоянного тока

Униполярные машины

Другой вариант:

- массивный ротор (1)
- цилиндрический статор (2) с кольцевыми ОБ (3) $\rightarrow \Phi_B$ одного направления
- два комплекта щеток (4): снимают ток $I_{я}$, наводимый в роторе при вращении в постоянном магнитном поле



ЭДС между щетками $E = Bl_{\delta}v \rightarrow$ ток якоря $I_{я} \rightarrow$ большой $\Phi_{я}$ реакции якоря (замыкается по окружности внутри ротора и статора с малым μ) \rightarrow насыщение ротора и статора \rightarrow ослабление поля возбуждения

Компенсационная обмотка (5) в цепи якоря + немагнитные вставки (6) для ослабления кольцевого потока

Машины постоянного тока

Униполярные машины

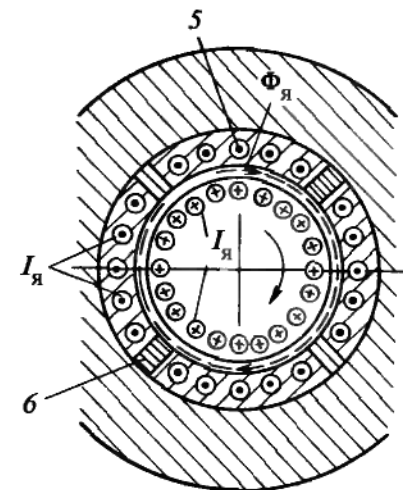
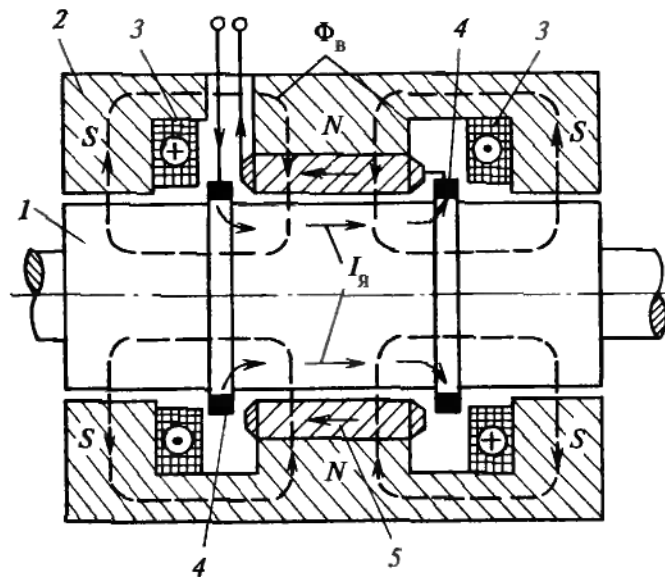
Обычно – 1 виток на роторе
→ низковольтные ЭМ

(1-100 В в длительном режиме,
до 800 В в импульсе)

с большими токами

(до 150 кА в длительном режиме,
до 1800 кА в импульсе)

При больших мощностях
токоъем жидкометаллический
(сплав натрия и калия)



Достоинство – отсутствие магнитных потерь (и некоторых добавочных)

Области применения:

- электролиз, питание электромагнитов ускорителей, МГД насосов

Машины постоянного тока

Магнитогидродинамические машины

→ перемещение проводящей жидкости/газа в магнитном поле

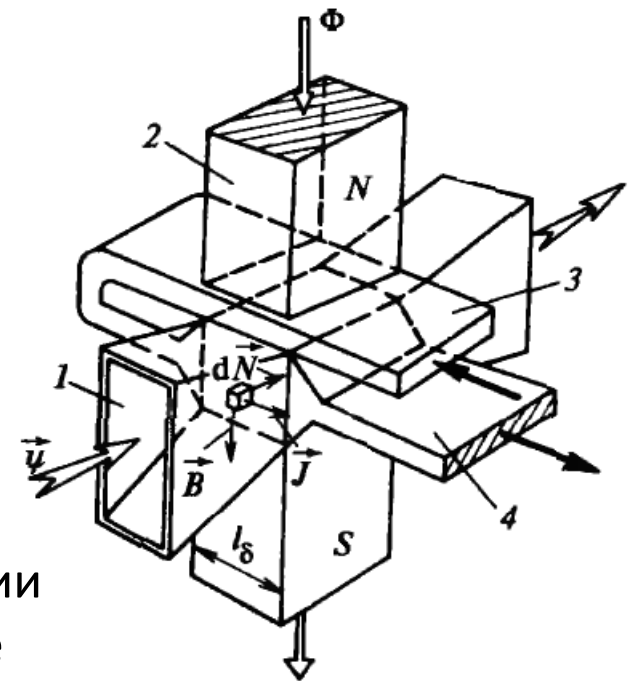
Пример: МГД насос для жидкого металла

1 – канал с проводящей жидкостью
(ртуть, литий, натрий, калий, ...)

2 – электромагнит с потоком Φ

4 – электрод, пропускающий постоянный ток через жидкость
(посредством электрического контакта – кондуктивно)

3 – встречная шина для компенсации поперечного поля от тока I в канале



Машины постоянного тока

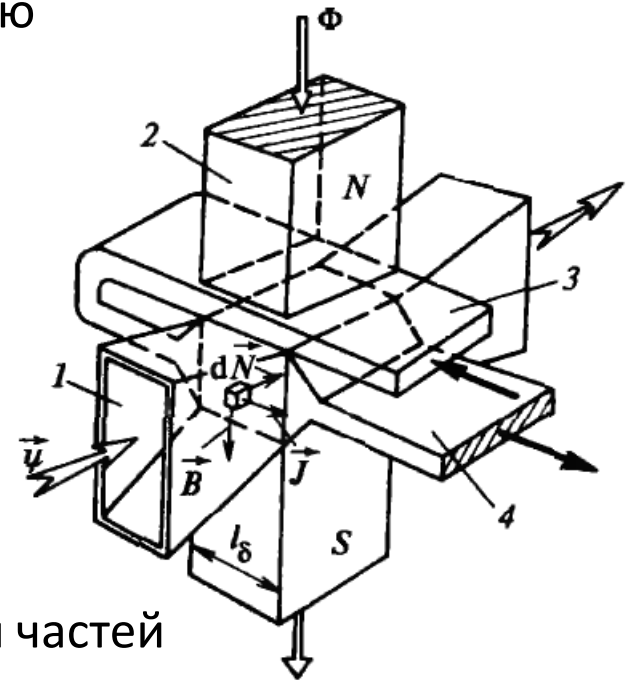
Магнитогидродинамические машины

На элементарный объем жидкости dV с плотностью тока J , находящийся в поле B , действует сила

$$d\vec{N} = \vec{J} \vec{B} dV$$

В результате жидкость движется со скоростью v , при которой $U - E = IR_{\text{я}}$, где $E = Bl_{\delta}v$ (скорость зависит от гидравлического сопротивления канала)

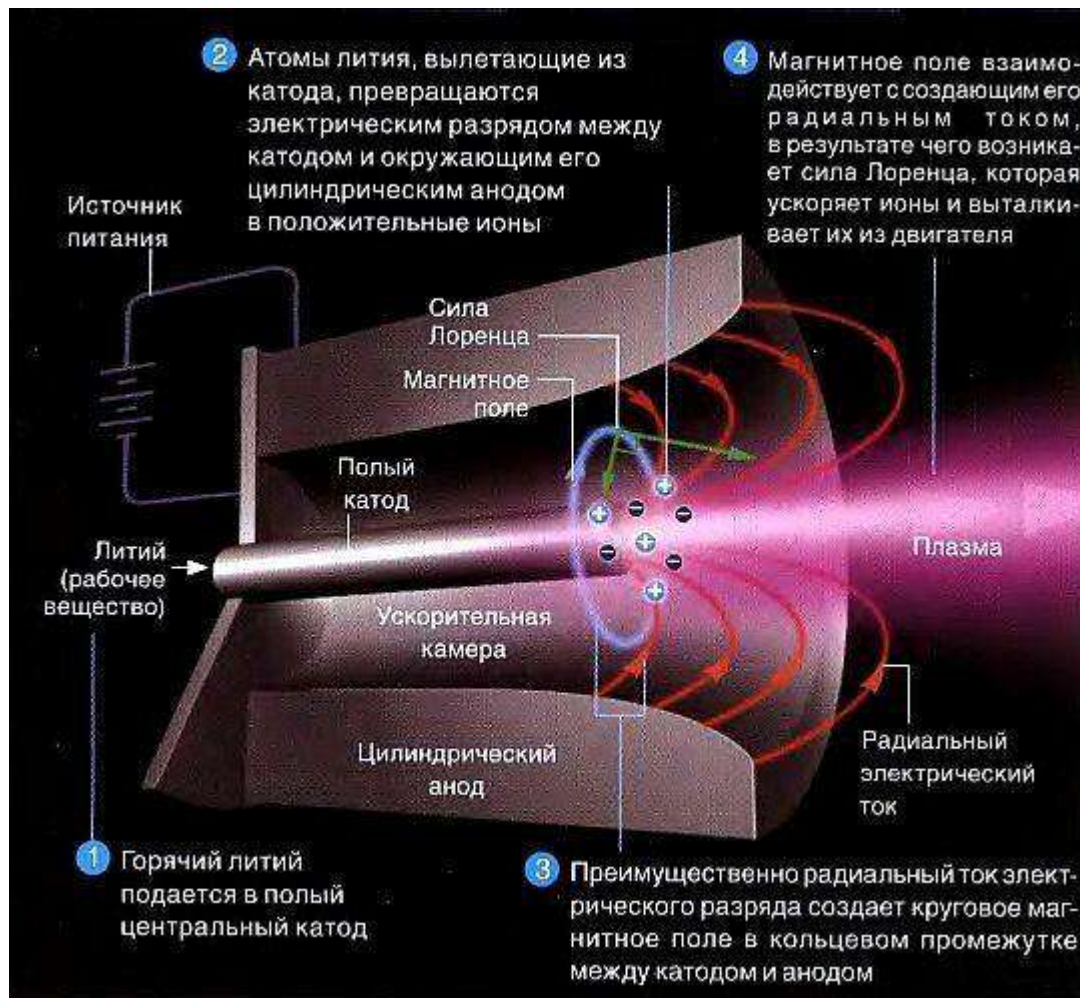
Достоинство МГД насоса – отсутствие движущихся частей
→ использование герметичного канала (циркуляция «грязного» теплоносителя в ядерном реакторе)



Машины постоянного тока

Магнетогидродинамические машины

Электрореактивный двигатель КЛА



«В мире науки» № 5 2009
стр. 34-42. Эдгар Чуэйри.
Новый рассвет
электрических ракет

Машины постоянного тока

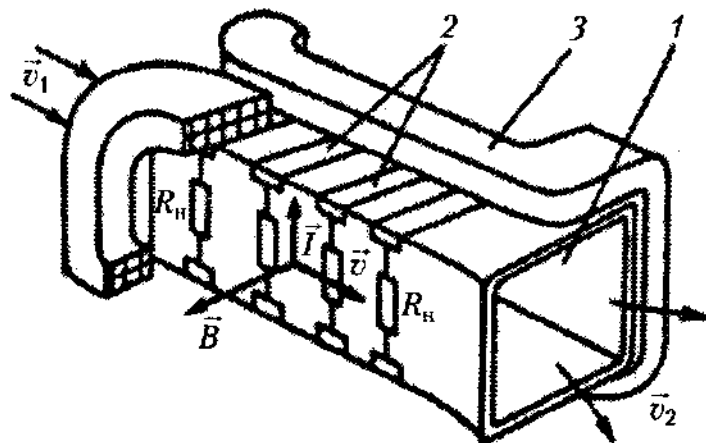
Магнитогидродинамические машины

МГД генератор

1 – канал для движения плазмы

2 – электроды для снятия ЭДС

3 – катушки для создания поля



В движущейся в магнитном поле плазме наводится ЭДС $E = Blv$

При включении нагрузки R_H в канале потечет поперечный ток I (тормозя плазму)

Механическая энергия частиц плазмы преобразуется в электрическую энергию

Проблема – высокая температура плазмы (2000 К)

Машины постоянного тока

Электромашинные преобразователи:

преобразование электрической энергии из одного вида в другой

Двухякорные преобразователи – двигатель и генератор с общим валом (механической нагрузки нет: электрическая энергия преобразуется в другой вид электрической энергии через механическую энергию)

Частое применение – преобразование переменного тока в постоянный (большой мощности)

- Если требуется $U_d = \text{Const} \rightarrow$ ГПТ параллельного возбуждения
- Если надо регулировать $U_d \rightarrow$ ГПТ с независимым возбуждением (для питания ДПТ с якорным управлением)

Обратное преобразование: переменный ток из постоянного с плавным регулированием частоты (изменяя n ДПТ)

Машины постоянного тока

Электромашинные преобразователи:

преобразование электрической энергии из одного вида в другой

Двухякорные преобразователи

Достоинства

- широкие пределы регулирования
- большие мощности
- надежность работы
- возможность сборки из серийных машин

Недостатки (по сравнению с одномашинным агрегатом)

- бóльшая стоимость
- бóльшие габариты и масса
- меньший КПД ($\eta = \eta_{\text{дв}} \times \eta_{\text{ген}}$)

Машины постоянного тока

Электромашинные преобразователи

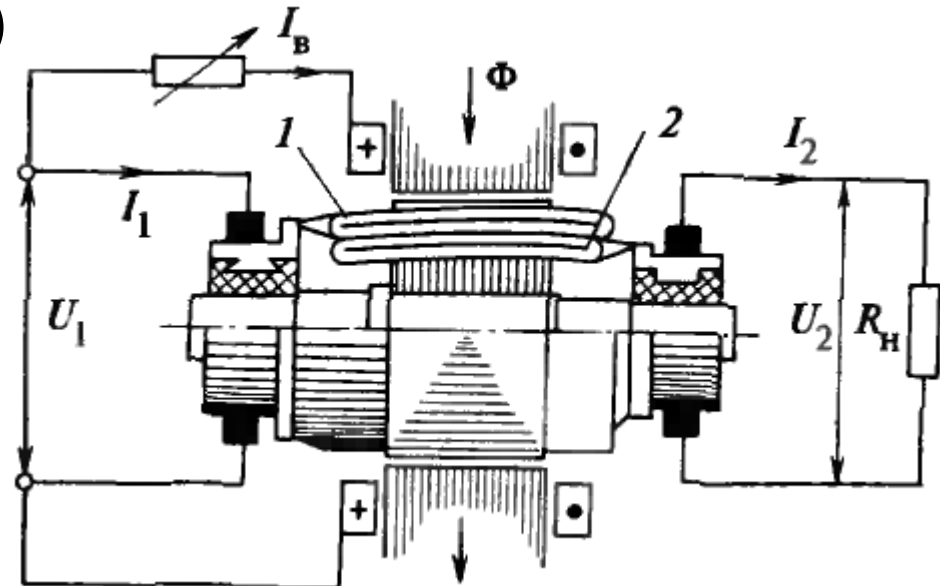
Одноякорный преобразователь постоянного тока

(изменение U постоянного тока)

- две обмотки якоря (электрически независимы)
- два коллектора
- U_1 – исходное напряжение
- I_1 – ток двигателя
- I_B – ток возбуждения $\rightarrow \Phi$

$$\Omega = \frac{U_1 - I_1 R_{я1}}{c_{01} \Phi}$$

- U_2, I_2 – напряжение и ток генератора (питает нагрузку R_H)



Машины постоянного тока

Электромашинные преобразователи

Одноякорный преобразователь постоянного тока

ЭДС двигателя $E_1 = c_{01} \Omega \Phi$

ЭДС генератора $E_2 = c_{02} \Omega \Phi$

где $c_{01} = \frac{pN_1}{2\pi a_1}$, $c_{02} = \frac{pN_2}{2\pi a_2}$

Коэффициент преобразования

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{c_{02}}{c_{01}} = \frac{N_2 a_1}{N_1 a_2}$$

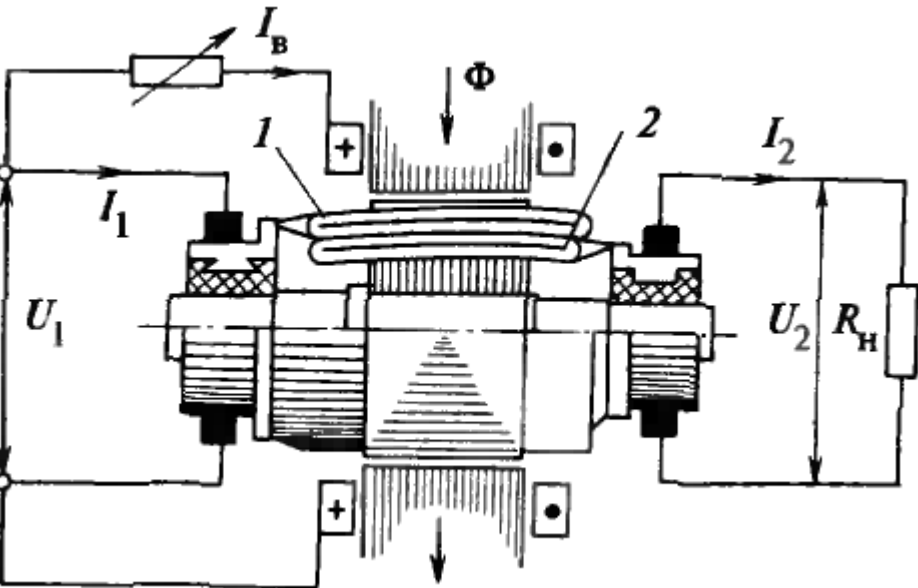
Механической нагрузки нет

Пренебрегая механическими и магнитными потерями: $M_{\text{двиг}} = M_{\text{ген}}$

или $c_{01} I_1 \Phi = c_{02} I_2 \Phi$, т.е. соотношение между токами $\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{c_{01}}{c_{02}}$

Тогда линейная нагрузка двигателя и генератора

$$A_1 = \frac{N_1 I_1}{4a_1 \pi R} = \frac{N_2 I_2}{4a_2 \pi R} = A_2$$



→ поперечные МДС якоря
скомпенсированы

Машины постоянного тока

Электромашинные преобразователи

Одноякорный преобразователь постоянного тока

Т.к. $F_{q1} - F_{q2} = 0$, то реакции якоря нет и при любой нагрузке $\Phi = \text{Const}$

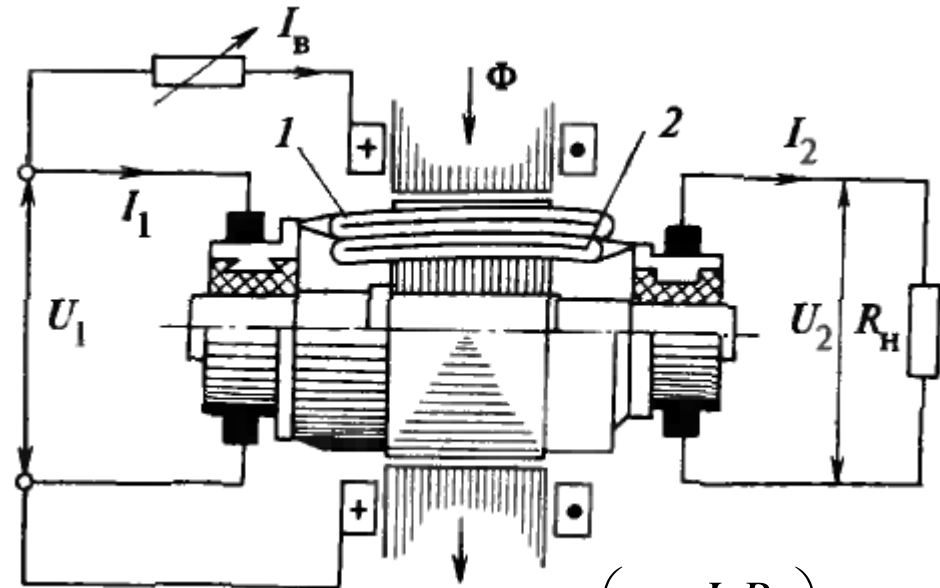
Угловая скорость

$$\Omega = \frac{U_1 c_{01} (R_{я2} + R_H)}{(c_{01}^2 (R_{я2} + R_H) + c_{02}^2 R_{я1}) \Phi}$$

При ХХ $R_H = \infty$ и $\Omega = \frac{U_1}{c_{01} \Phi}$

С увеличением нагрузки Ω снижается, растут I_1 и I_2 и уменьшается соотношение U_2/U_1

С изменением I_B меняется Ω , но не E_2 и U_2



$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{E_2 \left(1 - \frac{I_1 R_1}{U_1}\right)}{E_1 \left(1 - \frac{I_2 R_2}{U_2}\right)}$$

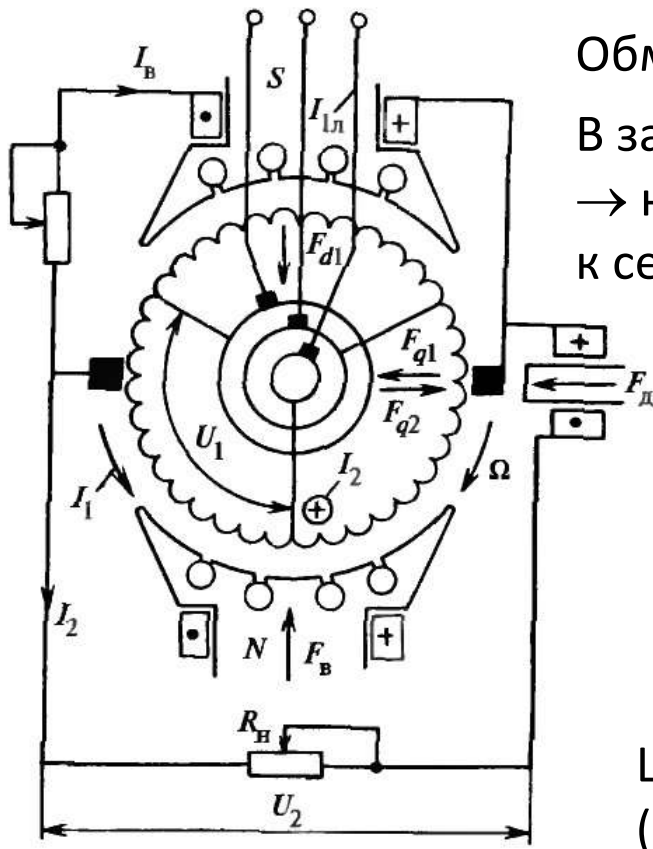
Применение в передвижных установках:

повышение напряжения АКБ с 12-24 В до 750-1500 В

Машины постоянного тока

Электромашинные преобразователи

Одноякорный преобразователь переменного тока в постоянный



Обмотка якоря – петлевая с $2a = 2p$

В замкнутой якорной обмотке – симметричные отпайки
→ на контактные кольца (по числу фаз) → подключены
к сети через трансформатор

Со стороны переменного тока обмотка якоря
– многоугольник с числом фаз m и числом
параллельных ветвей a

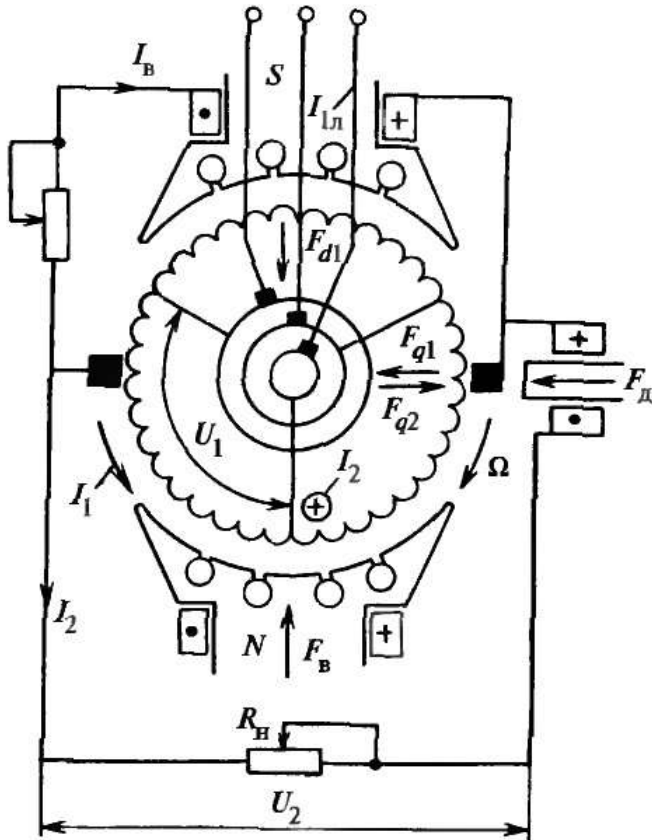
При подаче U_1 и тока возбуждения I_B
→ обращенный синхронный двигатель $\Omega = \frac{2\pi f}{p}$

Щетки снимают с ОЯ напряжение постоянного тока
(генератор питает R_H)

Машины постоянного тока

Электромашинные преобразователи

Одноякорный преобразователь переменного тока в постоянный



Полагая продольное поле синусоидальным, а поперечное скомпенсированным

$$\frac{U_2}{U_1} \approx \frac{E_2}{E_1} = \frac{\sqrt{2}}{\sin\left(\frac{\pi}{m}\right)}$$

(несинусоидальность дает погрешность до 5%)

Из баланса мощностей $mU_1 I_1 \eta \cos \varphi = U_2 I_2$:

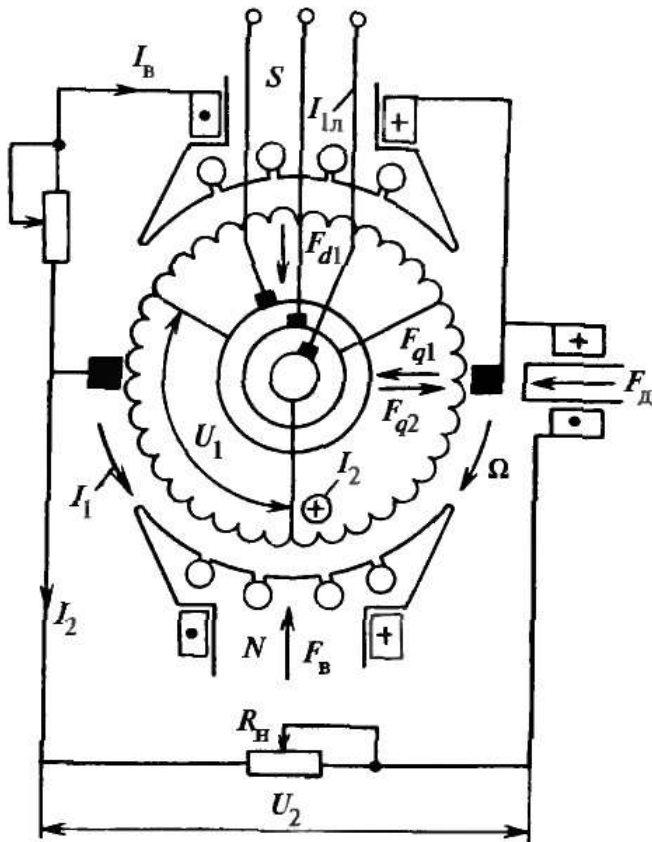
$$\frac{I_2}{I_{1л}} = \frac{m \eta \cos \varphi}{2\sqrt{2}}$$

При правильном возбуждении $\cos \varphi = 1$ и ток I_1 минимален

Машины постоянного тока

Электромашинные преобразователи

Одноякорный преобразователь переменного тока в постоянный



Применение:

- генерирование постоянного тока для эл.транспорта (сейчас редко)
- генерирование переменного тока с регулируемой частотой
- при наличии приводного двигателя – генерирование одновременно постоянного и переменного тока (на малых судах)

Машины постоянного тока

Вентильный двигатель

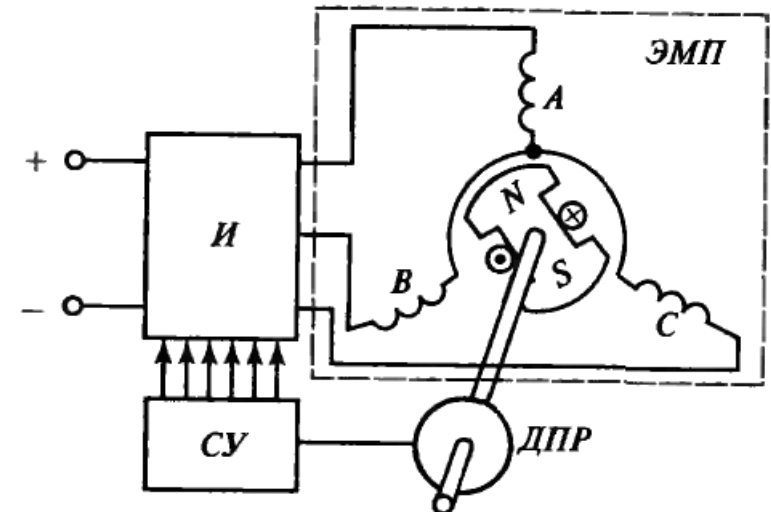
– *бесконтактный двигатель постоянного тока (BLDC)*

- Неподвижный якорь с питанием от многофазного инвертора, управляемого синхронно с вращением ротора
- На роторе – ОВ или постоянные магниты
- Система управления синхронизирует сигналы датчика положения ротора с коммутацией вентилей в инверторе → частота выходного $U(I)$ инвертора равна частоте вращения ротора $\omega_1 = \omega = p\Omega$

Питание инвертора – от сети
постоянного тока → ДПТ

Нет щеточно-коллекторного узла
→ *бесконтактный ДПТ*

- надежность работы
- не требует обслуживания
- не создает радиопомех



Машины постоянного тока

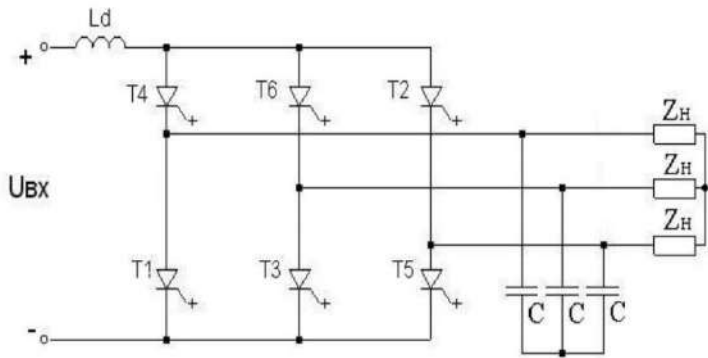
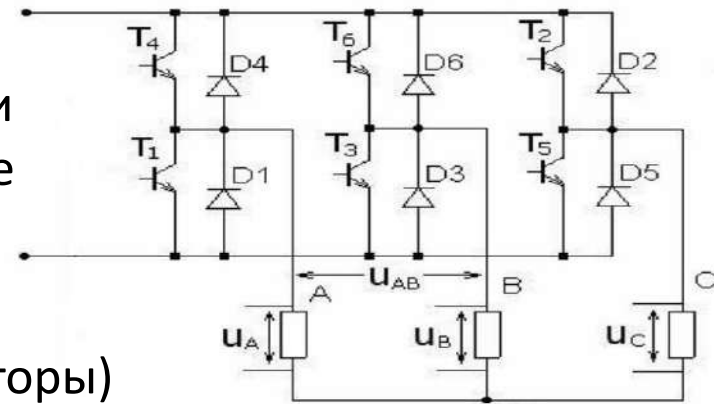
Вентильный двигатель

Инвертор напряжения:

Питается от источника постоянного напряжения и формирует требуемое напряжение на нагрузке (ток определяется U и R_H)

Выполняется на полностью управляемых ключах (транзисторы, полностью управляемые тиристоры)

Содержит обратные диоды для реактивного тока



Инвертор тока:

Питается от источника постоянного тока (индуктивность в цепи питания) и формирует требуемый ток в нагрузке (напряжение определяется характером нагрузки)

Выполняется на обычных тиристорах. Содержит C – допускает протекание скачкообразно изменяющегося тока

Машины постоянного тока

Вентильный двигатель

Пуск:

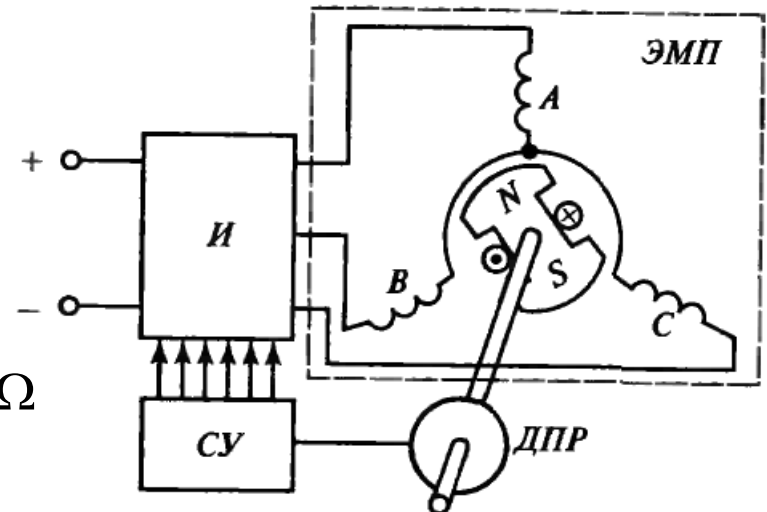
Подача питания на фазу → поворот ротора → срабатывание датчика
→ коммутация следующей фазы → продолжение поворота ротора
... → разгон ротора до Ω , при которой ЭДС и $IR_{\text{я}}$ уравновесит
напряжение инвертора

Наброс нагрузки:

Увеличение момента M_c → снижение Ω
→ уменьшение частоты управляющих
импульсов от ДПР и f коммутации

Снижение Ω → уменьшение ЭДС якоря
→ увеличение тока якоря
→ увеличение момента

Новый установившийся режим с меньшей Ω



Машины постоянного тока

Вентильный двигатель

Датчик положения ротора связан с полюсами ротора → определяет кривую ЭДС E_f

- Инвертор напряжения формирует кривую напряжения. ДПР задает фазовый угол Θ между 1 гарм. напряжения и E_f
- Инвертор тока формирует кривую тока. ДПР задает фазовый угол β между 1 гарм. тока и E_f (аналогично сдвигу щеток с нейтрالي в ДПТ)

Фазовый угол Θ или β существенно влияют на характеристики ВД
→ независимый параметр управления ВД

Машины постоянного тока

Вентильный двигатель

По своим характеристикам вентильный двигатель аналогичен ДПТ (принимая во внимание средние значения U_d , M и Ω)

- Внешние характеристики
- изменение Ω изменением напряжения U_d (активный выпрямитель, широтно-импульсный преобразователь)
- изменение Ω изменением потока Φ (если есть ОВ)

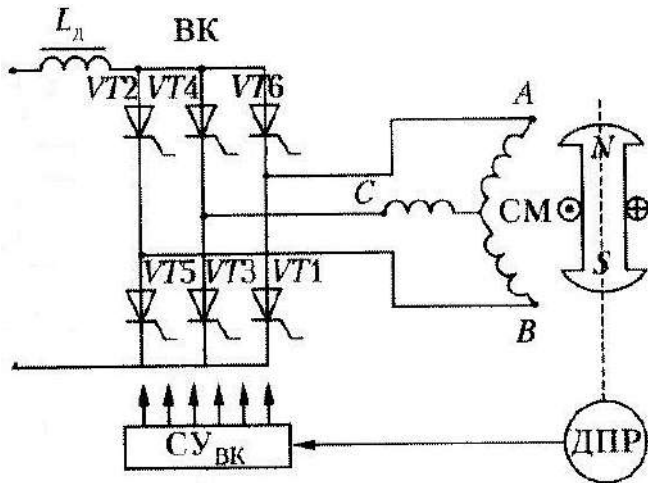
Вентильный двигатель сохраняет достоинства ДПТ – простота регулирования Ω и большой диапазон регулирования (до 1:10 000)

Но коммутация токов/напряжений создает свои проблемы

Машины постоянного тока

Вентильный двигатель

Рассмотрим работу ВД упрощенно (идеальные ключи)



Такты коммутации:

I VT1 – VT2

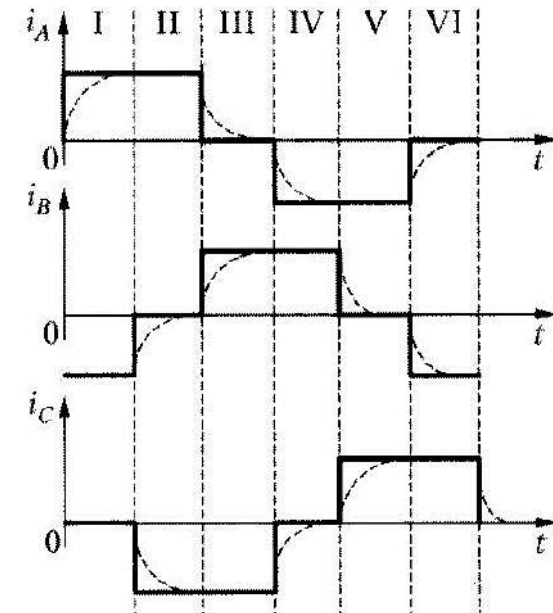
II VT1 – VT4

III VT5 – VT4

IV VT5 – VT6

V VT3 – VT6

VI VT3 – VT2



- Ступенчатые кривые токов → МДС фаз → вращающееся поле
- Скачкообразный поворот МДС → неравномерный поворот поля → пульсирующий момент (шум, вибрации)
- Несинусоидальное питание → гармоники → доп. потери энергии

Машины постоянного тока

Вентильный двигатель

Маломощные ВД (*автоматика, робототехника, бытовые приборы*)
– ротор с ПМ или реактивный, 2-4 фазы на якоре

В приводах средней и большой мощности (*регулируемый привод насосов и компрессоров, разгон мощных СД и гидротурбин*)
– ОВ на роторе или на статоре (когтеобразные полюсы на роторе), 3 фазы (реже 6), демпферная обмотка (для снижения переходных L и снижения длительности коммутации)

Датчики – опико-электронные (декодер) или электромагнитные (резольвер, СКВТ)

Напряжение питания повышенное (250 - 400 В) для улучшения массо-габаритных и энергетических показателей

Машины постоянного тока

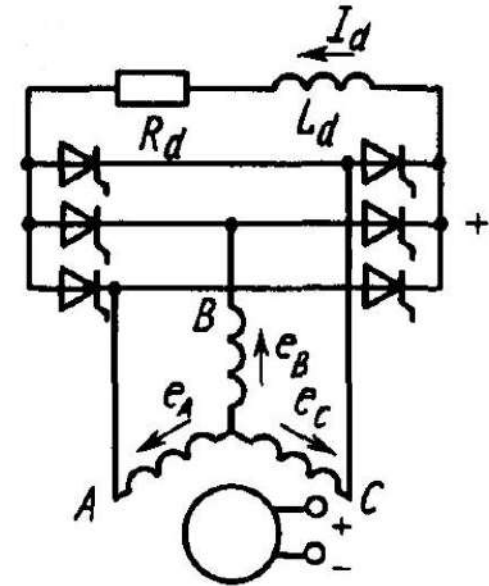
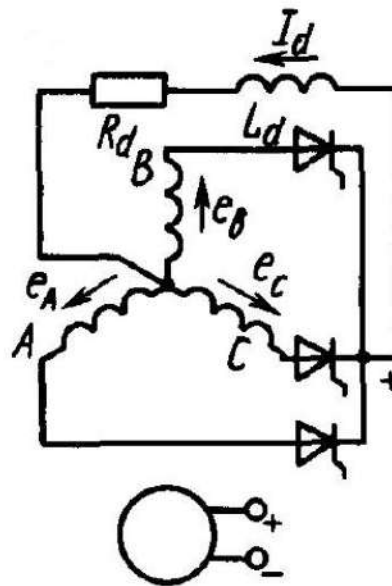
Вентильный генератор

– синхронный генератор + выпрямитель = ГПТ без коллектора
(нет недостатков щеточно-коллекторного узла, можно использовать повышенную n для снижения габаритов)

Применение: автомобили, самолеты

Схемы выпрямления:

- 3-фазная нулевая
- мостовая

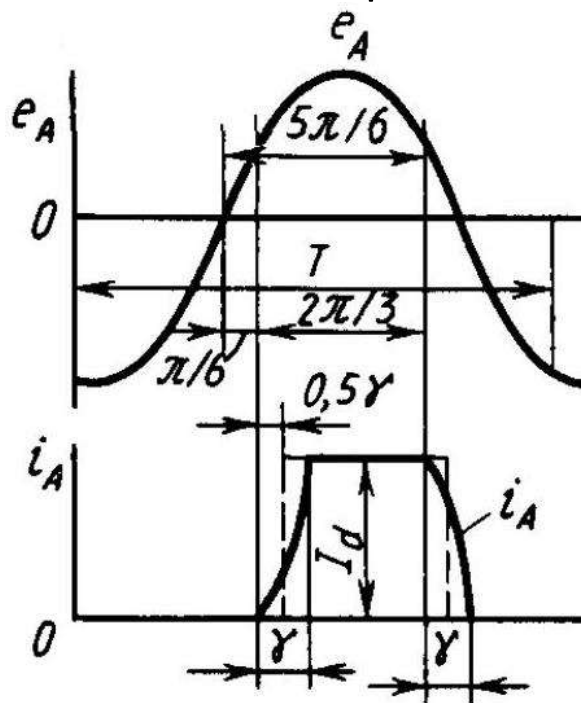


Активный выпрямитель – возможность регулирования напряжения
(задержка открытия тиристоров – α)

Машины постоянного тока

Вентильный генератор

Особенность работы – несинусоидальный ток в фазах



где x_k – индуктивное сопротивление фазы в режиме коммутации; E_{km} – ампл. ЭДС фазы

Фазный ток – импульсный

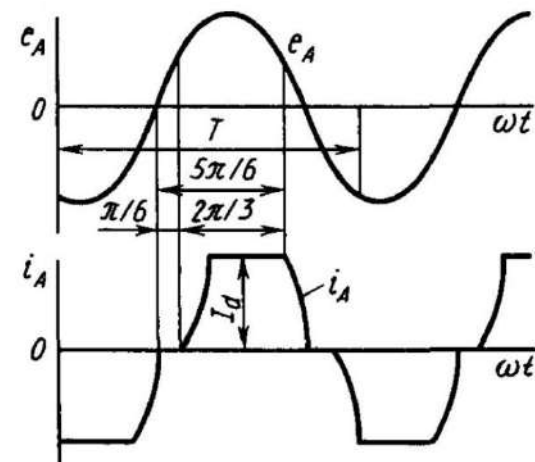
Естественная коммутация: вентиль открыт в течение $2\pi/m$ периода ($U_T > 0$)

При наличии фильтра ток нагрузки $I_d = \text{Const}$

Индуктивность фаз → плавное изменение тока (угол коммутации γ)

1 гармоника тока фазы отстает от ЭДС на $0,5\gamma$

$$\cos \gamma = 1 - \frac{I_d x_k}{(\pi/3)E_{km}}$$



Машины постоянного тока

Вентильный генератор

За время γ включается i_B и отключается i_A
→ две фазы включены одновременно
(2-фазное КЗ)

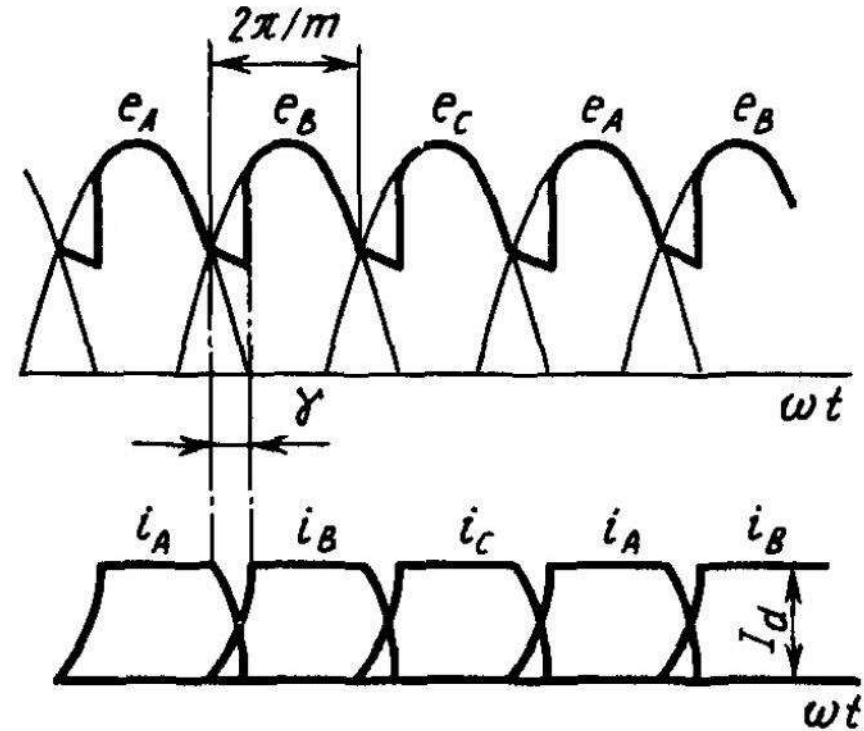
Время коммутации вентилей мало →
параметры ЭМ эквивалентны
параметрам при внезапном 2-фаз. КЗ

$$x_K \approx \frac{3x_d'' + x_q''}{4}$$

В период коммутации фаз (A и B)
выпрямленное напряжение

$$u_d = \frac{e_A + e_B}{2}$$

→ среднее напряжение снижается,
пульсации напряжения увеличиваются



Машины постоянного тока

Вентильный генератор

Среднее напряжение без учета коммутации

- 3-фазная нулевая схема $U_{d0} = 1,17 E_K$
- мостовая схема $U_{d0} = 2,34 E_K$

Среднее ΔU за счет коммутации

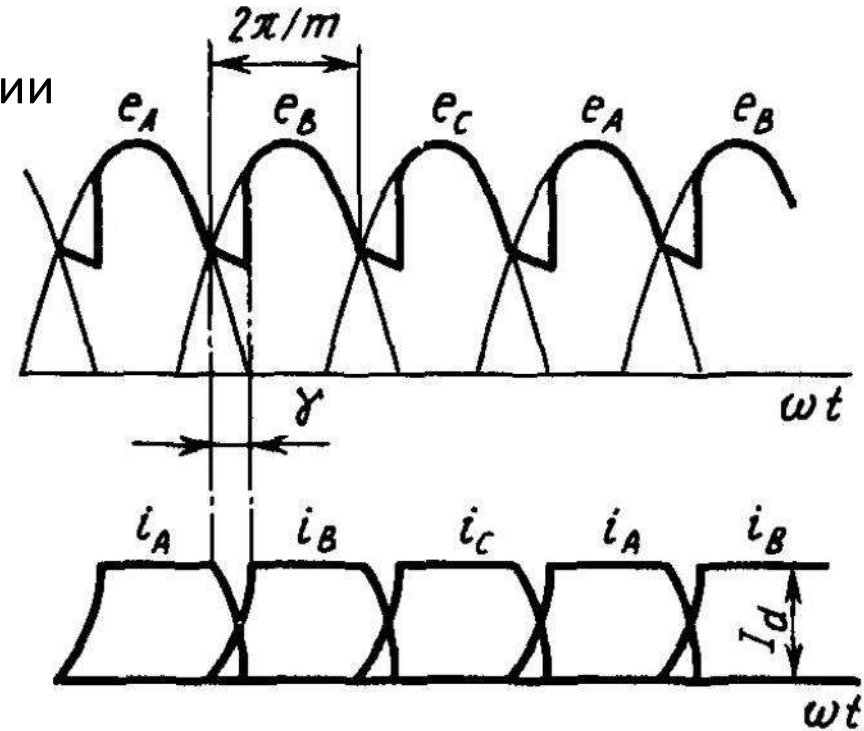
- 3-фазная нулевая схема $\Delta U_K = \frac{1 \cdot I_d x_K}{2\pi / m}$
- мостовая схема $\Delta U_K = \frac{2 \cdot I_d x_K}{2\pi / m}$

Среднее выпрямленное напряжение

$$U_d = U_{d0} - \Delta U_K$$

→ наличие x_K приводит к снижению U_d

Целесообразно снабжать вентильные генераторы мощной демпферной обмоткой (для снижения x''_d , x''_q)



Машины постоянного тока

Вентильный генератор

Коэффициент использования генератора: мощность фазы вентильного генератора относительно мощности генератора переменного тока (упрощенно, принимая прямоугольную форму тока)

- 3-фазная нулевая схема $k_{\text{исп}} = \frac{P_{\phi=}}{P_{\phi\approx}} = 0,677 \frac{\cos(\alpha + 0.5\gamma)}{\cos \varphi}$

(при $\cos\varphi=1$ и $\alpha=0$ мощность из-за выпрямления снижается на 1/3)

- мостовая схема $k_{\text{исп}} = \frac{P_{\phi=}}{P_{\phi\approx}} = 0,955 \frac{\cos(\alpha + 0.5\gamma)}{\cos \varphi}$

При увеличении α использование генератора ухудшается
Одновременно увеличивается запаздывание тока → возрастает размагничивающее действие реакции якоря

Дополнительные потери мощности:

- доп.электрические потери из-за высших гармоник тока
- доп.магнитные потери из-за высших гармоник поля
(незначительны при мощной демпферной обмотке)

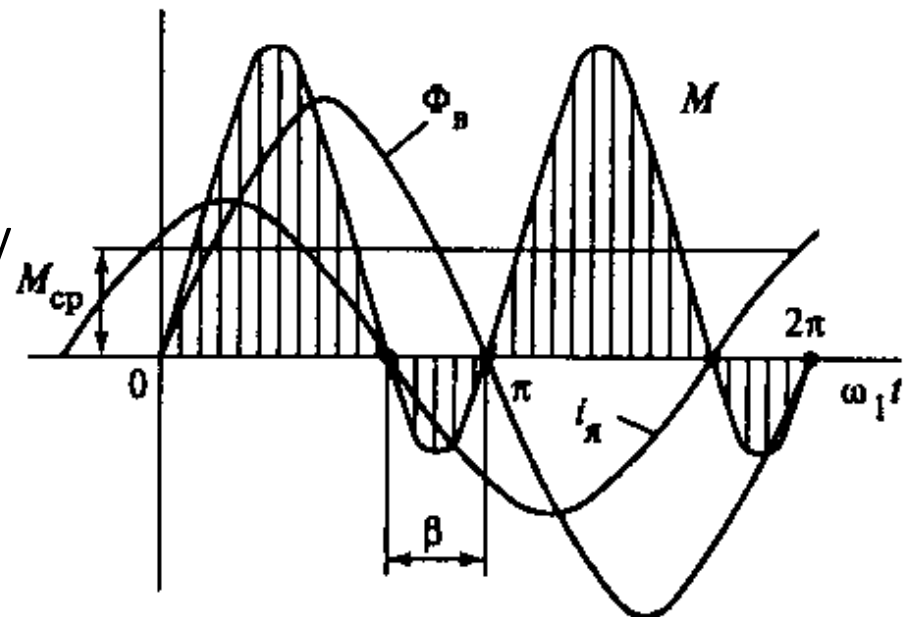


Коллекторные машины переменного тока

Конструкция аналогична машине постоянного тока, но подключается к сети переменного тока

По принципу действия – асинхронный двигатель с замкнутой обмоткой ротора, присоединенной к коллектору

Особенность – пульсирующий момент



Коллекторные машины переменного тока

- Возможно широко и плавно регулировать n
- Во всем диапазоне n можно получать высокие КПД и $\cos\varphi$
- Условия коммутации ограничивают мощность и n
- Наличие коллектора усложняет конструкцию, повышает стоимость, требует регулярного обслуживания, снижает надежность



Конструкции активно развивались в 1880-1925 гг.

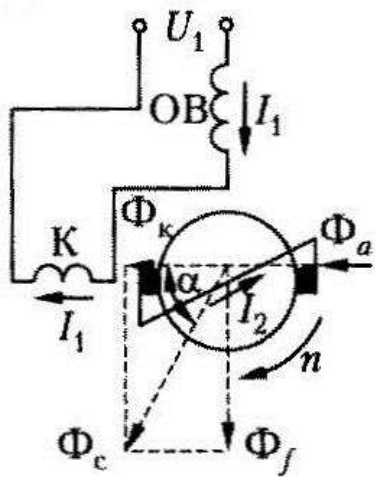
Сейчас применяются однофазные маломощные машины для бытовых приборов

Коллекторные машины переменного тока

Репульсионные двигатели

- однофазные коллекторные двигатели переменного тока, в которых обмотка якоря замкнута и не имеет электрического соединения со статором и сетью
- Энергия поступает в якорь трансформаторным путем (через м.поле)
- Пуск в ход – прямое подключение к сети
- Частота вращения изменяется поворотом щеток

Двигатель Аткинсона



$K \rightarrow \Phi_k \rightarrow$ в ОЯ трансф. ЭДС $\sim f_{\text{сети}}$ (при любой n)

\rightarrow ток $I_2 \rightarrow$ поток якоря Φ_a

$ОВ \rightarrow \Phi_f \quad \Phi_f + \Phi_k =$ полный поток статора Φ_c

«Репульсионный» двигатель –
отталкивание полюсов Φ_a и Φ_c

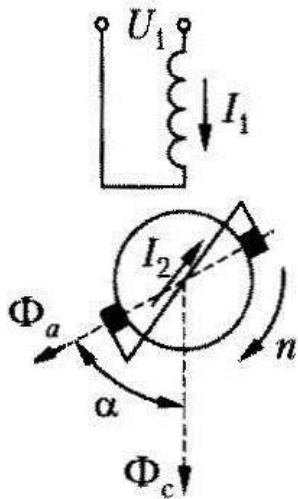
При вращении в ОЯ также наводится ЭДС $\sim n$

Коллекторные машины переменного тока

Репульсионные двигатели

Можно объединить функции ОВ и К, если сдвинуть щетки с нейтрали

Двигатель Томсона



Пусть ось щеток считается поперечной осью q

$$I_1 \rightarrow \Phi_c \rightarrow \Phi_{cq} = \Phi_c \cos\alpha \text{ и } \Phi_{cd} = \Phi_c \sin\alpha$$

$\Phi_{cq} \rightarrow$ трансформаторная ЭДС $E_{2Т}$ (даже при $n=0$)

$E_{2Т} \rightarrow$ ток якоря I_2 (поток якоря Φ_a)

Взаимодействие I_2 и Φ_{cd}

\rightarrow момент \rightarrow вращение

в направлении α

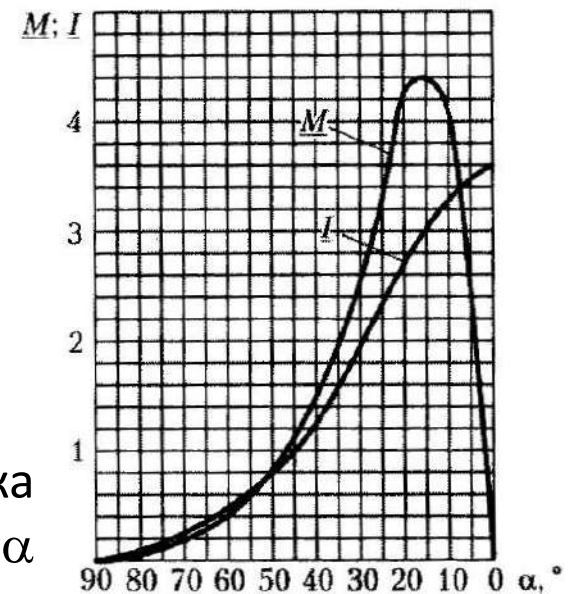
(относительно Φ_c)

С увеличением α уменьшается ток якоря I_2 (Φ_{cq} , $E_{2Т}$)

Одновременно увеличивается Φ_{cd}

Зависимость пускового момента и пускового тока

от угла сдвига щеток α



Коллекторные машины переменного тока

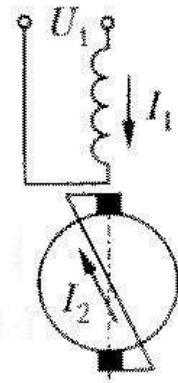
Репульсионные двигатели

Положение
короткого
замыкания

$$\alpha = 0$$

$$I_2 = I_{2\max}$$

$$M = 0$$

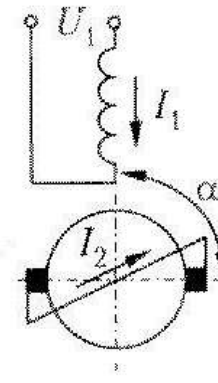


Положение
холостого
хода

$$\alpha = 90^\circ$$

$$I_2 = 0$$

$$M = 0$$

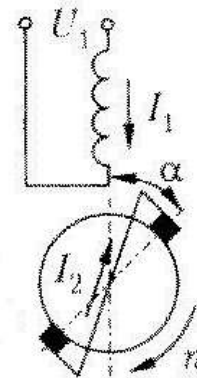


Прямое вращение

$$\alpha > 0$$

$$I_2 \neq 0$$

$$M > 0$$

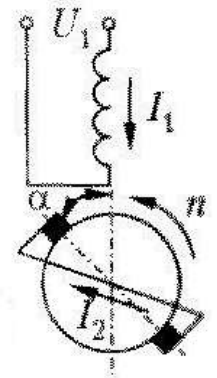


Обратное вращение

$$\alpha > 0$$

$$I_2 \neq 0$$

$$M > 0$$



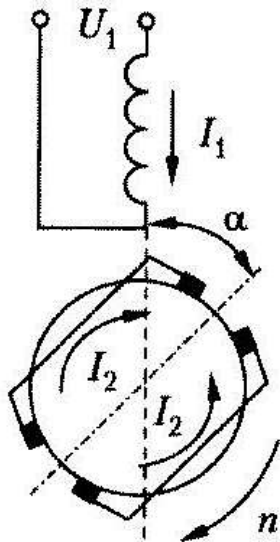
Обычно $\alpha_{\text{ном}} = 15^\circ - 25^\circ$

При $\alpha = \text{Const}$ механическая характеристика мягкая
(как у ДПТ последовательного возбуждения)

Коллекторные машины переменного тока

Репульсионные двигатели

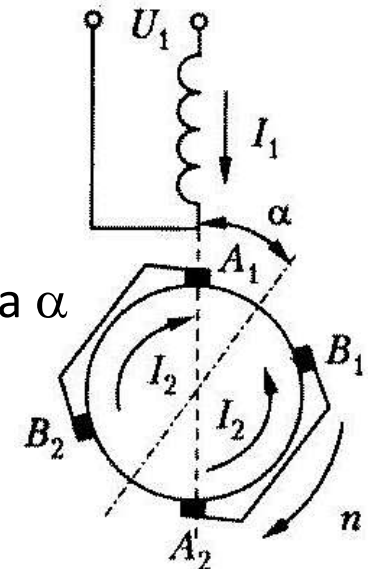
Двигатель Дери – наилучшие пусковые и регулировочные свойства



- двойной комплект щеток
- все щетки поворачиваются одновременно
- часть ОЯ не обтекается током \rightarrow улучшение формы МДС F_2 и условий коммутации

Вариант:

- щетки A_1-A_2 неподвижны
- щетки B_1-B_2 поворачиваются
- при повороте щеток на угол 2α поле якоря Φ_a поворачивается на α \rightarrow более тонкое регулирование



Из-за сдвига щеток доп. полюса не применяют

Конструкция статора – неявнополюсная

Коллекторные машины переменного тока

Трехфазный коллекторный двигатель (Шраге-Рихтера)

(Г.Шраге и Р.Рихтер, 1910 г.)

представляет собой асинхронный двигатель с регулированием частоты вращения путем добавления во вторичную цепь ЭДС с частотой скольжения sf_1

Рассмотрим вопрос регулирования частоты вращения АД с использованием мощности скольжения

Во вторичную цепь вводят добавочную ЭДС E_Δ (с той же частотой)

Добавочная ЭДС E_Δ может иметь разную ориентацию относительно E_2

В общем случае запишем
$$\dot{E}_\Delta = \dot{E}'_\Delta + \dot{E}''_\Delta = k'_\Delta \dot{E}_2 + jk''_\Delta \dot{E}_2$$

k_Δ – относительное значение ЭДС (E_Δ относительно E_2)

k' – активная составляющая ЭДС

k'' – реактивная составляющая ЭДС

Можно рассматривать их влияние по отдельности

Коллекторные машины переменного тока

Рассмотрим вопрос регулирования частоты вращения АД с использованием мощности скольжения

Рассмотрим АД, работающий с малым скольжением s_1 и ЭДС ротора $s_1 E_2$

Пренебрегая $s_1 X_2$ (т.е. углом β_2 или реактивной составляющей I_2) запишем
$$\dot{I}_2 = \frac{s_1 \dot{E}_2}{R_2}$$

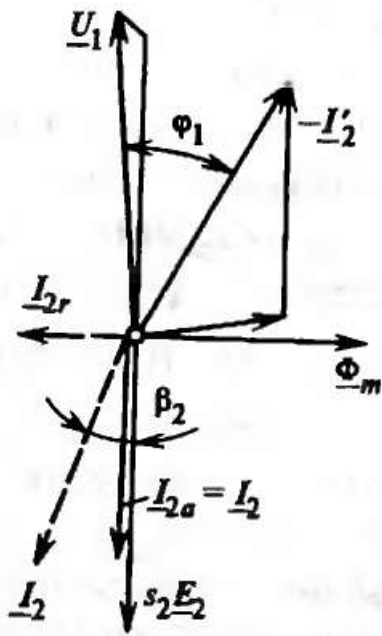
Тогда электромагнитный момент можно выразить как

$$M_1 = \frac{p m_2 w_2 k_{o2} \Phi_m}{\sqrt{2}} I_2 \cos \beta_2 = C_M \Phi_m I_2 = C_M \Phi_m \frac{s_1 E_2}{R_2}$$

После введения $E_\Delta = k'_\Delta E_2$ скольжение изменится на s_2 и полная ЭДС будет равна
$$s_2 \dot{E}_2 + \dot{E}_\Delta = (s_2 + k'_\Delta) \dot{E}_2$$

Тогда электромагнитный момент
$$M_2 = C_M \Phi_m \frac{(s_2 + k'_\Delta) E_2}{R_2}$$

Но если момент нагрузки не менялся, то $M_1 = M_c = M_2$
 (ток ротора (активный) тоже сохранился), т.е. новое скольжение должно быть равно
$$s_2 = s_1 - k'_\Delta$$



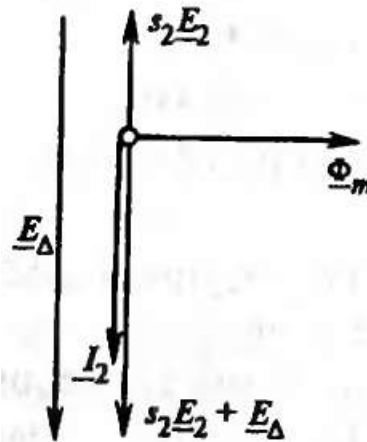
Коллекторные машины переменного тока

*Рассмотрим вопрос регулирования частоты вращения АД
с использованием мощности скольжения*

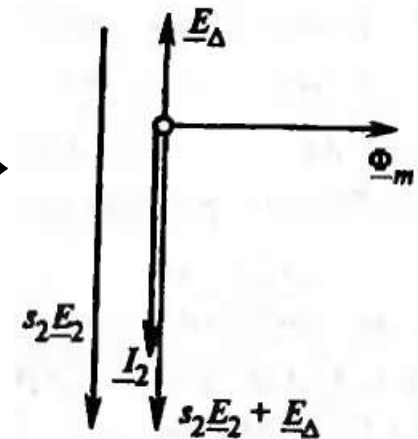
Итак, введение $\dot{E}_\Delta = k'_\Delta \dot{E}_2$ изменяет скольжение на $s_2 = s_1 - k'_\Delta$

При $k'_\Delta > 0$ скольжение s_2 уменьшается (n возрастает)

При $k'_\Delta > s_1$
скольжение
становится
отрицательным
($n > n_c$) \rightarrow



При $k'_\Delta < 0$
скольжение
возрастает \rightarrow



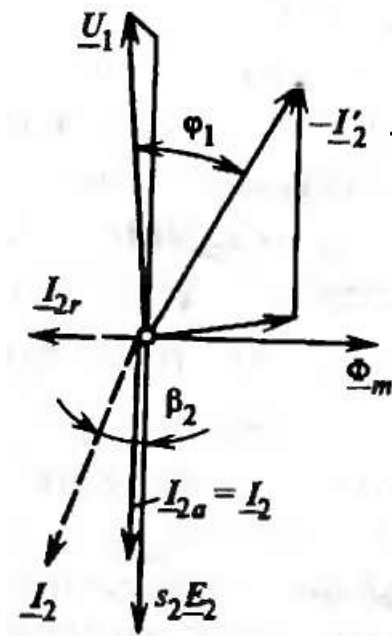
Коллекторные машины переменного тока

Рассмотрим вопрос регулирования частоты вращения АД с использованием мощности скольжения

После введения $\dot{E}_\Delta = \dot{E}_\Delta'' = jk_\Delta'' \dot{E}_2$

возникает дополнительный реактивный ток $\dot{I}_\Delta \approx \frac{\dot{E}_\Delta}{R_2} = jk_\Delta'' \frac{\dot{E}_2}{R_2}$

При $k_\Delta'' > 0$ ток I_Δ опережает E_2 на $\pi/2$ и является намагничивающим



При этом уменьшается реактивная составляющая тока I_1 и угол φ_1 и $\cos \varphi_1$

Таким образом можно получить $\cos \varphi = 1$

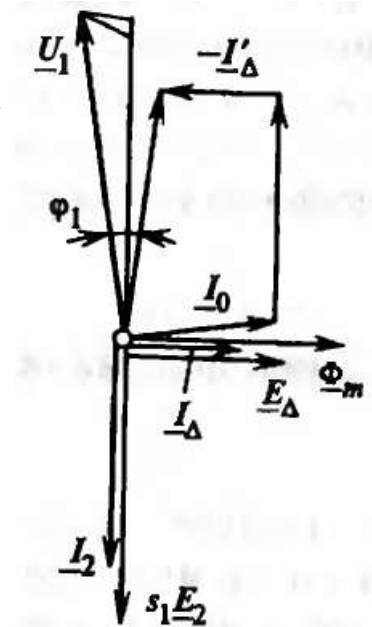
Реактивная мощность, требуемая для создания поля со стороны статора

$$Q_1 = m_1 I_0 E_1$$

Реактивная мощность, требуемая для создания поля со стороны ротора

$$Q_2 = m_1 I_\Delta' E_2' s = m_1 I_0 E_1 s$$

$$Q_2 \ll Q_1 \text{ при } s < 1$$



Коллекторные машины переменного тока

Трехфазный коллекторный двигатель (Шраге-Рихтера)

– асинхронный двигатель обращенной конструкции с дополнительной обмоткой на роторе и коллекторным преобразователем частоты

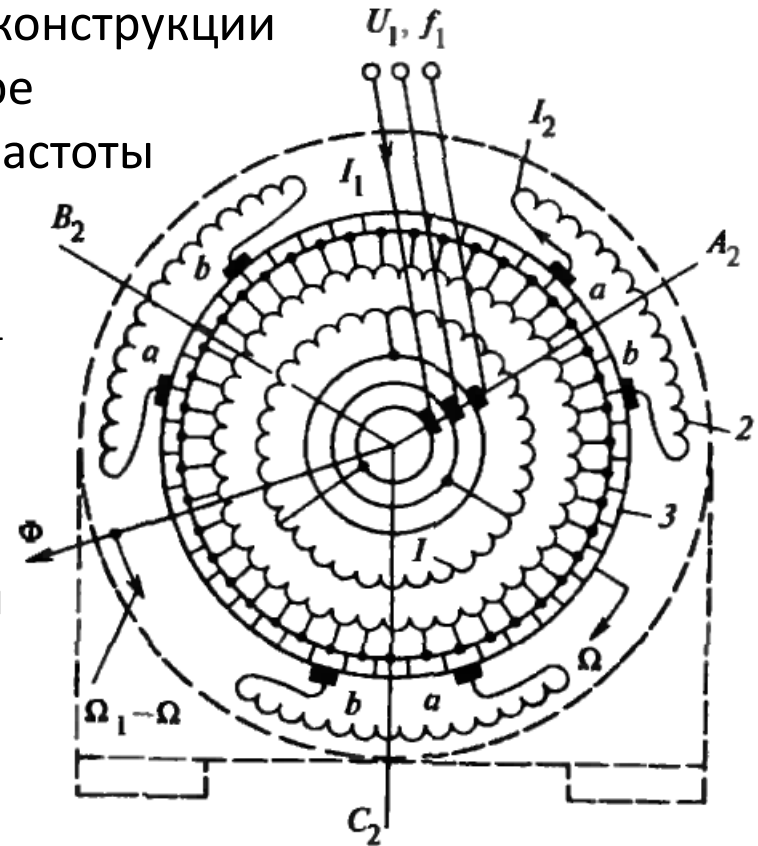
Первичная обмотка 1 в пазах ротора: 3-фазная симметричная (Y или Δ), подключена к U_1, f_1 через контактные кольца

Якорная обмотка 3 в пазах ротора: замкнутая обмотка, присоединена к коллектору

Вторичная обмотка 2 в пазах статора: 3-фазная симметричная, подключена к системам щеток (a, b) на коллекторе

Щетки системы a установлены на траверсе со сдвигом $2\pi/3$ и подключены к началам фаз

Щетки системы b установлены на траверсе со сдвигом $2\pi/3$ и подключены к концам фаз



Траверсы a и b можно поворачивать, меняя угол α_{ab} между щетками a и b

Коллекторные машины переменного тока

Трехфазный коллекторный двигатель (Шраге-Рихтера)

Токи первичной обмотки \rightarrow поле Φ вращается с $\Omega_1 = \omega_1/p$ (относительно ротора)

Взаимодействие с КЗ вторичной обмоткой \rightarrow асинхр. момент \rightarrow вращение ротора с Ω (АД обращенной конструкции)

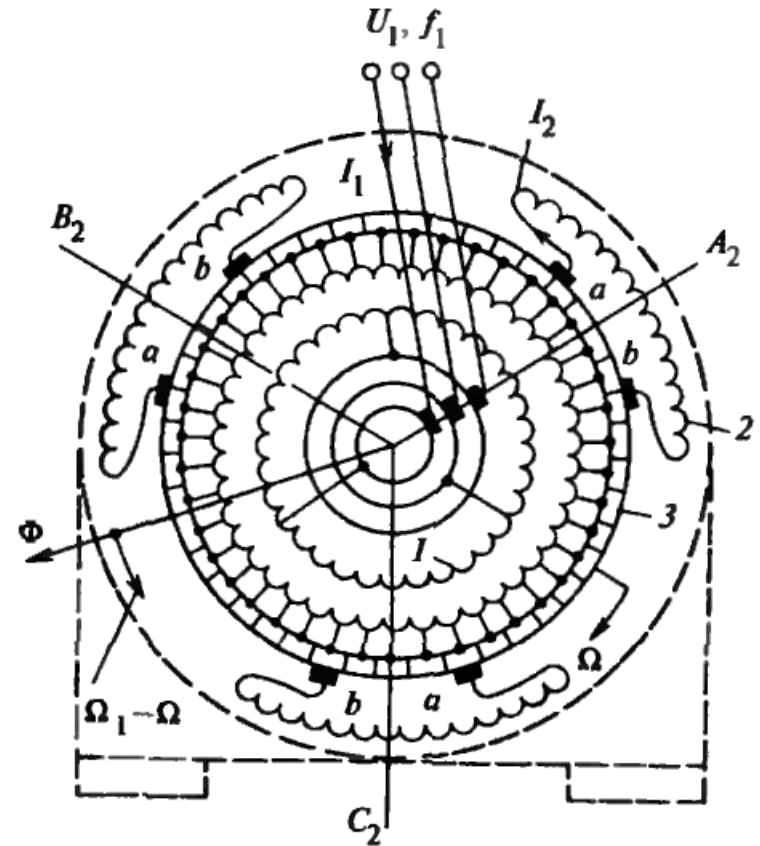
Φ вращается относительно статора с $\Omega_1 - \Omega$

$s = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1}$ – скольжение поля относительно щеток и вторичной обмотки

Частота ЭДС в обмотке 3: f_1

Частота ЭДС, снимаемой щетками $a-b$: $sf_1 = f_2$ (частота скольжения)

Это дополнительная ЭДС E_{Δ} , которая вводится во вторичную цепь с sE_2



Коллекторные машины переменного тока

Трехфазный коллекторный двигатель (Шраге-Рихтера)

Величина ЭДС между щетками a - b пропорциональна виткам $w_3 k_{o3}$ обмотки 3, включенным между щетками a и b

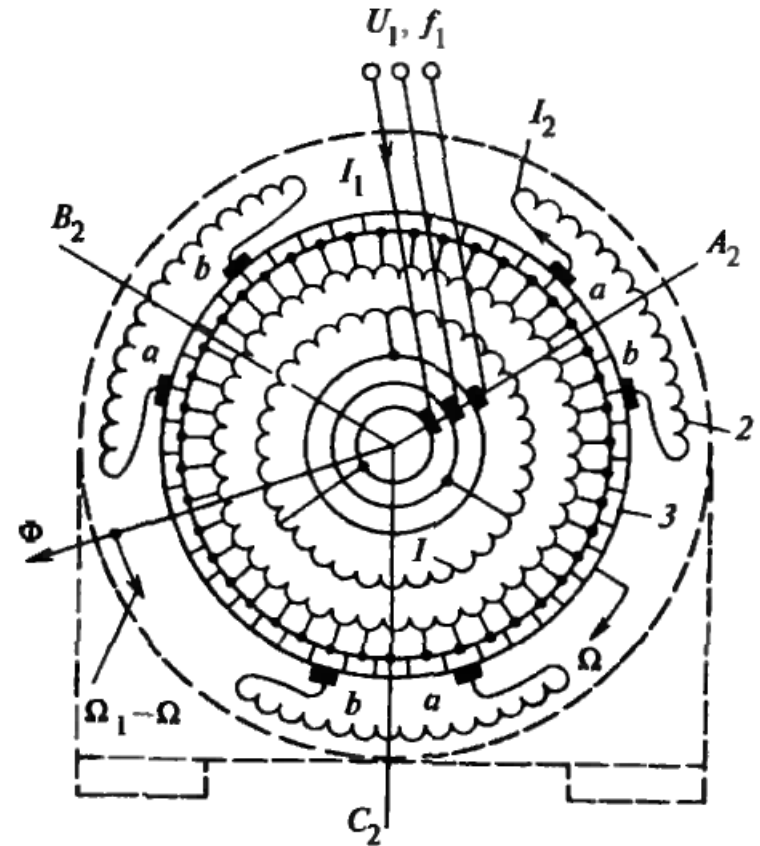
$$w_3 = w \frac{\alpha_{ab}}{2\pi} \quad k_{o3} = \frac{\sin(\alpha_{ab}/2)}{\alpha_{ab}/2}$$

(w – полное число витков обмотки 3)

Величина ЭДС E_2 при $s = 1$ пропорциональна всем виткам $w_2 k_{o2}$ обмотки 2

Соотношение ЭДС E_Δ и E_2 зависит только от углового расстояния α_{ab}

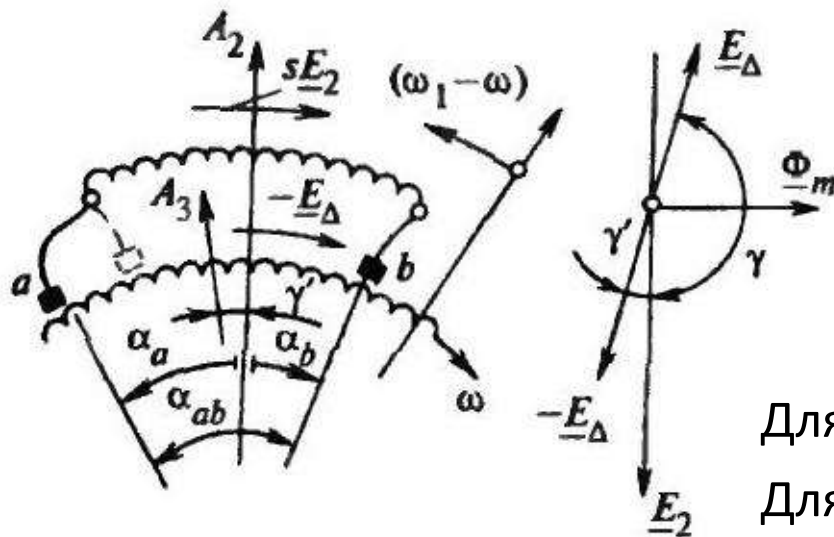
$$k_\Delta = \frac{E_\Delta}{E_2} = \frac{w}{\pi w_2 k_{o2}} \sin(\alpha_{ab}/2)$$



Коллекторные машины переменного тока

Трехфазный коллекторный двигатель (Шраге-Рихтера)

Угол между E_{Δ} и E_2 зависит от положения щеток $a-b$



Случай 1 (a опережает b)

Если щетки установлены симметрично, то ЭДС E_2 и E_{Δ} в противофазе ($\gamma = \pi$),

составляющие ЭДС E_{Δ} $k'_{\Delta} < 0$ $k''_{\Delta} = 0$

что приводит к увеличению s (замедлению)

Для улучшения $\cos \phi$ нужна E''_{Δ} опережающая E_2

Для этого надо сдвинуть щетку a дальше, чем b :

$$\alpha_a > \alpha_b, \text{ угол между } E_2 \text{ и } -E_{\Delta} \gamma' = \frac{\alpha_a - \alpha_b}{2}$$

Тогда $\gamma = \pi - \gamma'$ $k'_{\Delta} = k_{\Delta} \cos \gamma < 0$ и появляется $k''_{\Delta} = k_{\Delta} \sin \gamma > 0$

Дополнительная ЭДС $\dot{E}_{\Delta} = (k'_{\Delta} + jk''_{\Delta})\dot{E}_2 = k_{\Delta} e^{j\gamma} \dot{E}_2$
(уменьшает Ω и улучшает $\cos \phi$)

Коллекторные машины переменного тока

Трехфазный коллекторный двигатель (Шраге-Рихтера)

Угол между E_{Δ} и E_2 зависит от положения щеток $a-b$

Случай 2 (a отстает от b)

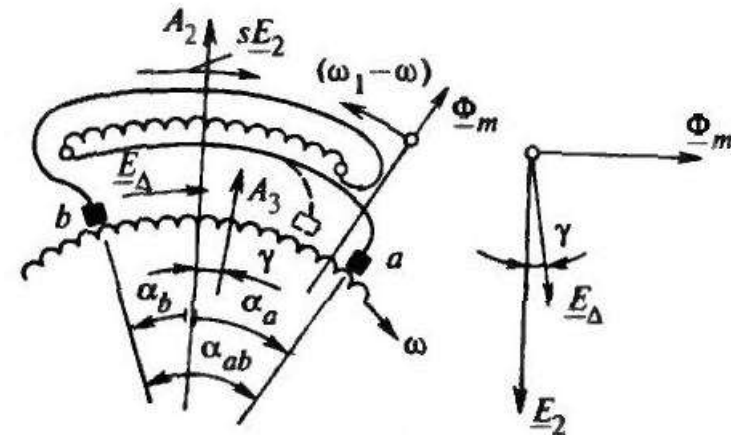
Если щетки установлены симметрично, то ЭДС находится в фазе, $\gamma = 0$ $k'_{\Delta} > 0$ $k''_{\Delta} = 0$ что приводит к уменьшению s

Если щетка a сдвинута дальше, чем b

E_{Δ} опережает E_2 на угол $\gamma = \frac{\alpha_a - \alpha_b}{2}$

Тогда $k'_{\Delta} = k_{\Delta} \cos \gamma > 0$ $k''_{\Delta} = k_{\Delta} \sin \gamma > 0$

и $\cos \varphi$ улучшается (при одновременном увеличении Ω)

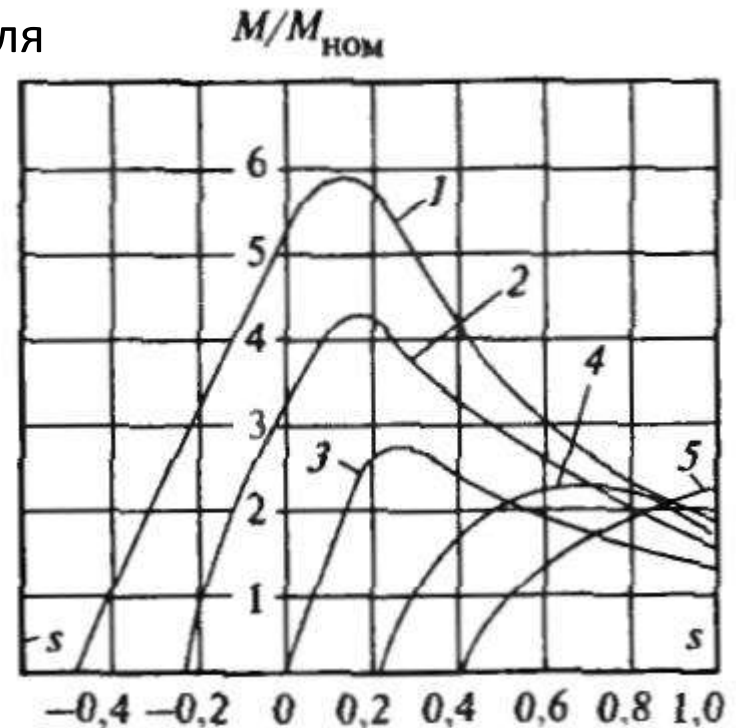


Коллекторные машины переменного тока

Трехфазный коллекторный двигатель (Шраге-Рихтера)

Механические характеристики двигателя
(без регулирования $\cos\varphi$)

- кривая 1 $k'_{\Delta} = 0.5$
- кривая 2 $k'_{\Delta} = 0.25$
- кривая 3 $k'_{\Delta} = 0$
- кривая 4 $k'_{\Delta} = -0.2$
- кривая 5 $k'_{\Delta} = -0.4$



Выпускались машины от 1,5 до 150 кВт

Предел регулирования 2:1 (до 4:1)

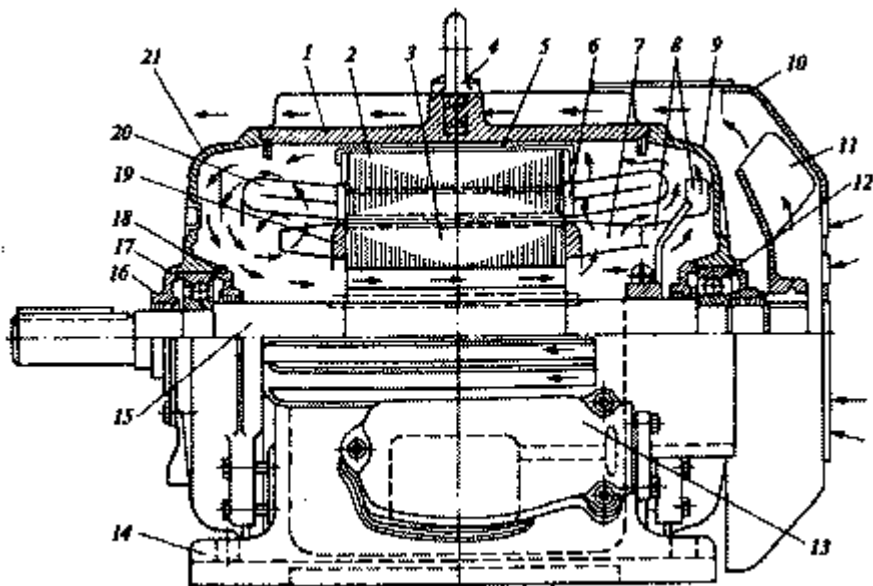
$\cos\varphi$ обычный для АД, но может быть увеличен до 1

КПД ниже обычного АД: потери на трение щеток, потери в переходных контактах, увеличенные магнитные потери (при увеличении s КПД заметно падает)

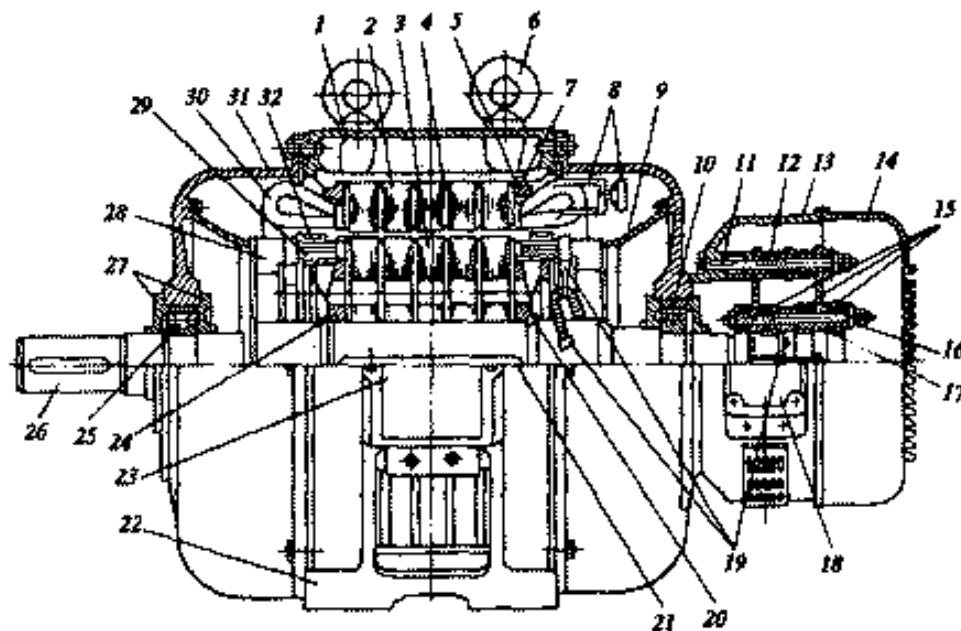


Асинхронные электрические машины

Трехфазный асинхронный двигатель



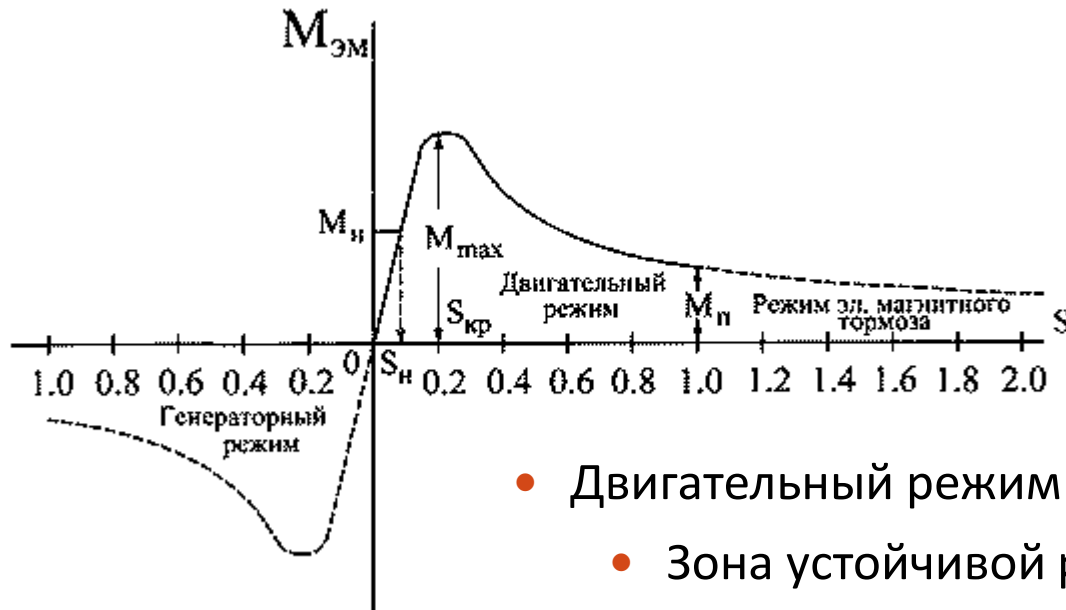
с КЗ ротором



с фазным ротором

Асинхронные электрические машины

Режимы работы асинхронной машины



- Двигательный режим
 - Зона устойчивой работы
- Режим идеального холостого хода
- Пуск / короткое замыкание
- Режим электромагнитного тормоза
- Генераторный режим

Асинхронные электрические машины

Режимы работы асинхронной машины

Двигательный режим

- Электромагнитная мощность

$$P_{\text{ЭМ}} = M\Omega_1 = \frac{P_{\text{э2}}}{s} > 0$$

- Механическая мощность

$$P_{\text{мех}} = M\Omega = P_{\text{э2}} \frac{1-s}{s} < P_{\text{ЭМ}}$$

Генераторный режим

- Электромагнитная мощность

$$P_{\text{ЭМ}} = M\Omega_1 = \frac{P_{\text{э2}}}{s} < 0$$

- Механическая мощность

$$P_{\text{мех}} = M\Omega = P_{\text{э2}} \frac{1-s}{s} < 0$$

$$|P_{\text{мех}}| > |P_{\text{ЭМ}}|$$



Максимальный момент

$$M_m \approx \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\Omega_1 (\sqrt{R_1^2 + X_{\text{к}}^2} \pm R_1)}$$

$$|M_{m(-)}| > |M_{m(+)}|$$

Асинхронные электрические машины

В курсе «Несимметричные режимы работы ЭМ» рассмотрено:

- **Асинхронный генератор (автономно / параллельно с сетью)**
- **Асинхронный преобразователь частоты**
- **Асинхронная машина с заторможенным ротором – фазорегулятор**
- **Асинхронная машина с заторможенным ротором – индукционный регулятор**
- **Однофазный асинхронный двигатель (в том числе с пусковыми элементами)**

Асинхронные электрические машины

Асинхронная машина с заторможенным ротором – преобразователь числа фаз

Первичная обмотка с $m_1 = 3$ и p_1 подключена к U_1 с f_1
→ создает вращающееся поле с Ω_1

Вторичная обмотка имеет $p_2 = p_1$ и число фаз m_2

В ней наводится m_2 – фазная система ЭДС

$$E_2 = \frac{w_2 k_{o2}}{w_1 k_{o1}} E_1$$

Поворот ротора не нужен

→ можно убрать зазор

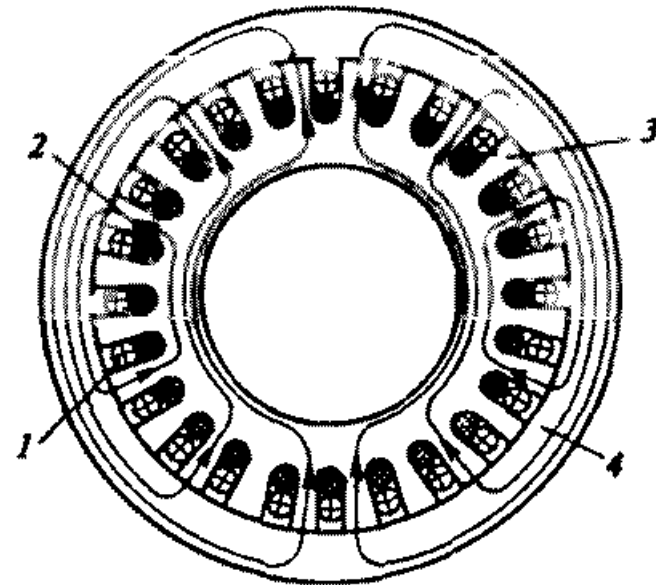
Первичная обмотка 1 и вторичная обмотка 2

– в общих пазах сердечника 3

(уменьшение полей рассеяния)

Сердечник 4 (ярмо) напрессован на 3

(уменьшение намагничивающего тока)



Асинхронные электрические машины

Асинхронная машина с заторможенным ротором – преобразователь частоты

При сильном насыщении сердечника → «уплощение» кривой индукции вращающегося поля → усиление высших гармонических ($\nu = 3, 5, 7 \dots$)

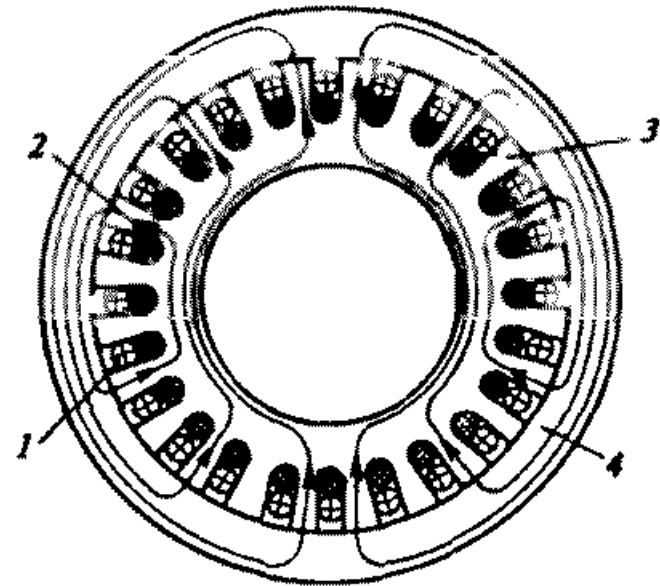
Все гармоники пространственные, их угловые скорости равны Ω_1

Вторичная обмотка однофазная ($m_2 = 1$) и имеет $p_2 = 3p_1$

В ней наводится ЭДС 3-й гармоники от вращающегося поля

Частота этой ЭДС $f_2 = \frac{p_2 \Omega_1}{2\pi} = 3f_1$

Первичная обмотка имеет
укороченный шаг $y = \frac{2}{3}\tau$
для исключения ЭДС и токов
тройной частоты



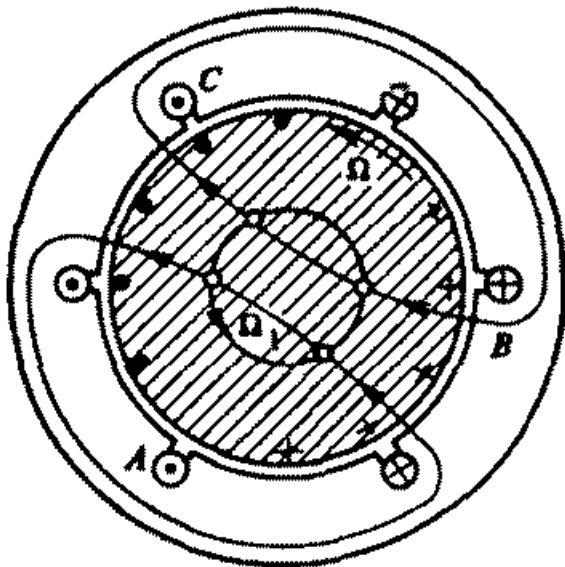
Асинхронные электрические машины

Асинхронный двигатель с массивным ротором

Сплошной ферромагнитный ротор – магнитопровод + токопровод

Вращающееся поле наводит вихревые токи → создается момент

Аналог обычного КЗ ротора с $z_2 \rightarrow \infty$



Переменное поле проникает в ротор на глубину σ

При $f_1 = 50$ Гц и $s = 1$ $\sigma = 1-3$ мм,

при $s = 0,05$ $\sigma = 5-15$ мм,

σ пропорционально $\frac{1}{\sqrt{s}}$

Эквивалентное сопротивление ротора R_2 велико

→ критическое скольжение $s_{кр} = 5-15$

- Пусковой момент максимален
- Рабочее скольжение велико (большие эл. потери в роторе, низкий КПД, большой намагничивающий ток)

$$r'_2 = 1.4 \cdot \varphi_c \quad x'_2 = 0.84 \cdot \varphi_c$$

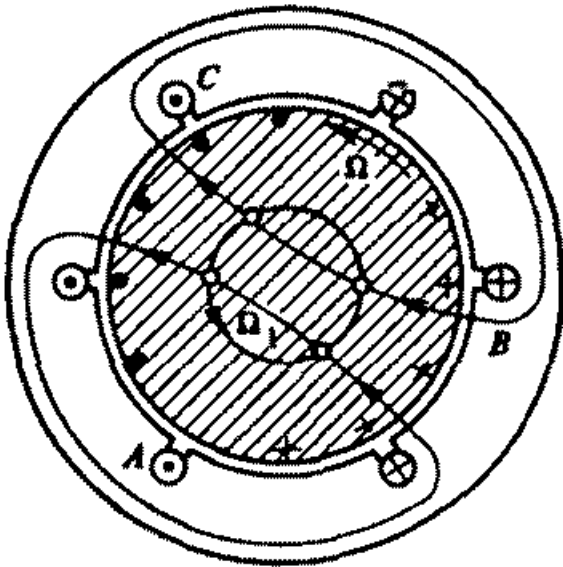
$$\varphi_c = \frac{4m_1 l_1 (w_{\sigma 1})^2 k_{\sigma 1} \sqrt{\frac{\omega_1 \mu_0 \mu_r \rho}{2s}}}{\pi D}$$

Асинхронные электрические машины

Асинхронный двигатель с массивным ротором

Для улучшения характеристик:

- Подбор материала ротора с оптимальной электрической и магнитной проводимостью



- Медные кольца на торцах массивного ротора (уменьшение сопротивления торцевых частей)
- Покрытие внешней поверхности ротора слоем меди толщиной 0,1-0,3 мм

Массивный ротор имеет высокую механическую прочность

→ применение в высокоскоростных двигателях $n = 10,000 - 100,000$ об/мин

Асинхронные электрические машины

Асинхронный двигатель с полым ротором

Ферромагнитный ротор может иметь толщину, равную глубине проникновения поля:

при $f_1 = 50 \text{ Гц}$ $\sigma = 3 \text{ мм}$, при $f_1 = 400-1000 \text{ Гц}$ $\sigma = 0,3-0,5 \text{ мм}$

Ротор получается малоинерционный (малый J)

Тонкий немагнитный ротор из проводящего материала – расположен между внешним и внутренним статорами (для замыкания Φ)

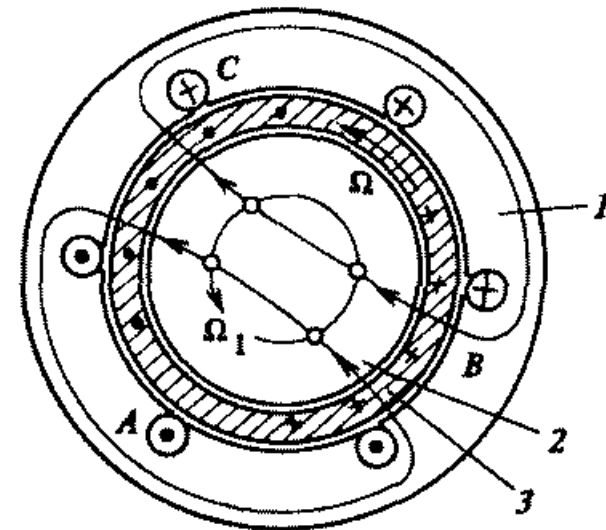
Толщина стенок ротора 0,1-1 мм

→ малоинерционный ротор

Толщина меньше глубины проникновения поля

→ R_2 не зависит от s

X_2 мало, им можно пренебречь



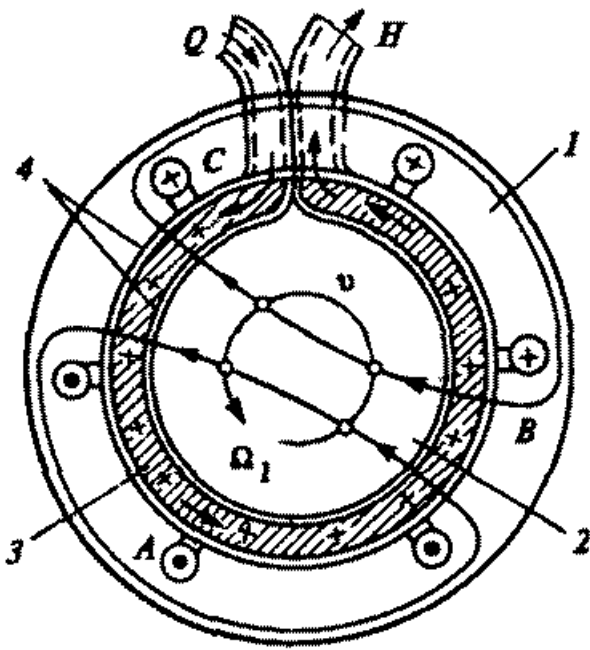
АД с полым ротором имеет плохие энергетические свойства

Асинхронные электрические машины

Индукционный насос

Разновидность МГД машины переменного тока

Использует вместо ротора жидкий металл во вращающемся поле



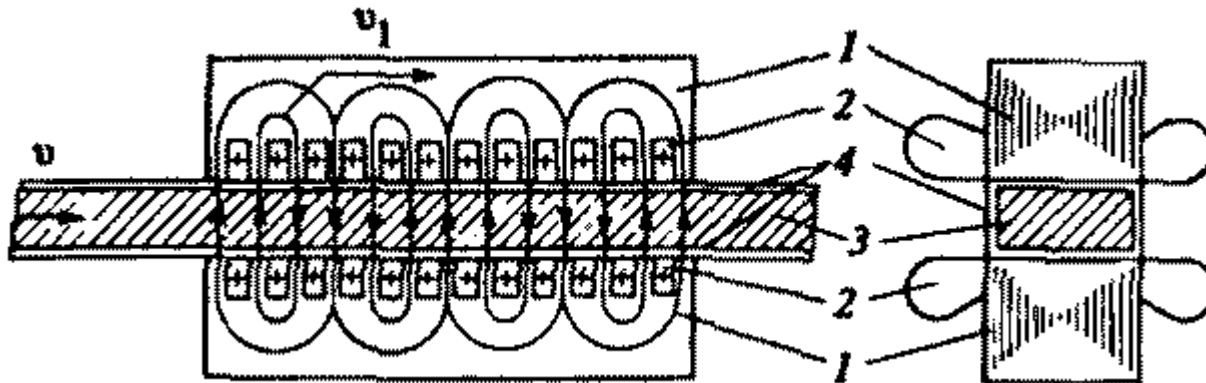
Винтовой канал 3 в трубе из немагнитной стали 4 между внешним 1 и внутренним 2 статорами (несколько витков по длине статора)

3-фазная обмотка – вращающееся поле → вихревые токи в жидком металле → электромагнитные силы, продвигающие металл в сторону вращения поля

Асинхронные электрические машины

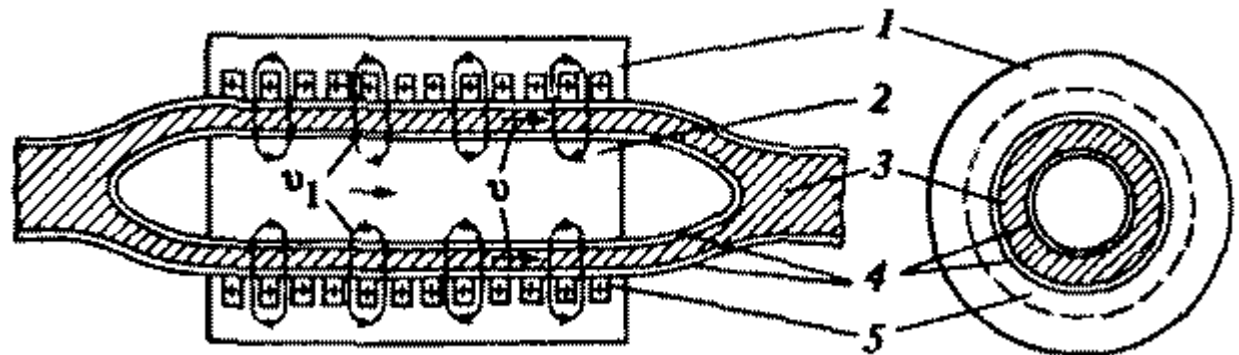
Индукционный насос

Возможно применение линейного асинхронного двигателя:
катушки статора создают «бегущее» поле \rightarrow на металл
действуют силы вслед за полем



Плоский линейный
индукционный насос

Цилиндрический
линейный
индукционный насос

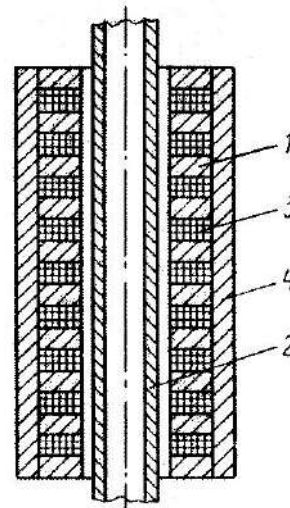
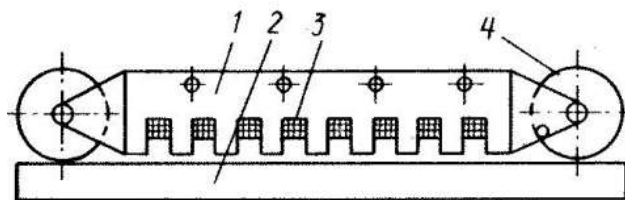
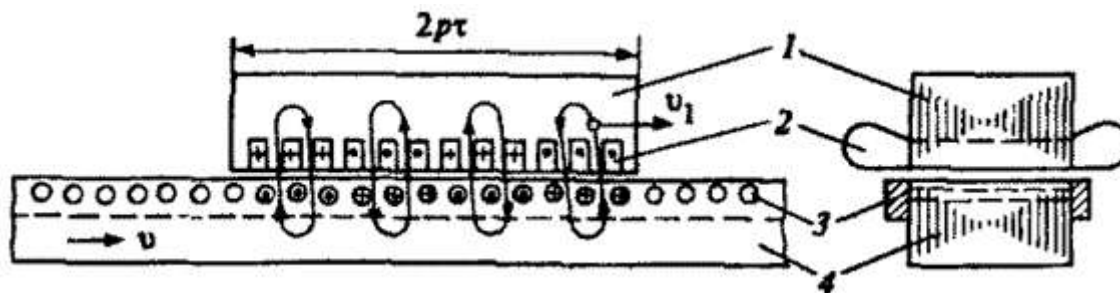


Асинхронные электрические машины

Линейные и дуговые асинхронные двигатели

Статор 1 с 3-фазной первичной обмоткой 2, распределенной в пазах

Подвижная часть имеет магнитопровод 4 со вторичной обмоткой 3 (либо массивная из магнитного материала)



Рабочие свойства и характеристики аналогичны другим АД

Энергетические показатели хуже из-за краевых эффектов

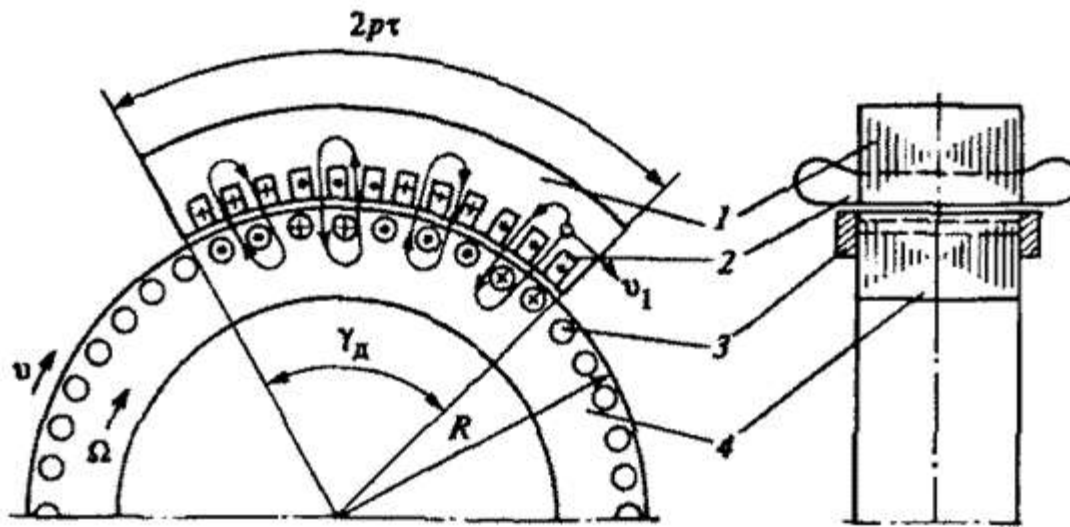
Скольжение – по линейным скоростям

$$s = \frac{v_1 - v}{v_1}, \quad v_1 = 2\tau f_1$$

Асинхронные электрические машины

Линейные и дуговые асинхронные двигатели

Дуговой двигатель – вращение ротора большого диаметра с небольшой скоростью Ω



Статор с числом периодов p , занимающий на радиусе R дугу размером γ_p создает поле, движущееся со скоростью

$$v_1 = 2\pi f_1 = 2\tau f_1 = \frac{\gamma_p R}{p} f_1$$

При этом синхронная угловая скорость ротора $\Omega_1 = \frac{v_1}{R} = \frac{\gamma_p f_1}{p}$ оказывается в $\frac{2\pi}{\gamma_p}$ раз меньше, чем при кольцевом статоре с тем же p



Трансформаторы

Реакторы

Измерительные трансформаторы

Трансформаторы с плавным регулированием напряжения

Сварочные трансформаторы

Сварочные, печные, выпрямительные, пик-трансформаторы

Преобразование числа фаз

Преобразование частоты

Трансформаторы

Реакторы

В электрических сетях применяют индуктивные сопротивления для токоограничения или компенсации реактивной мощности

Устройства большой мощности – «реакторы»

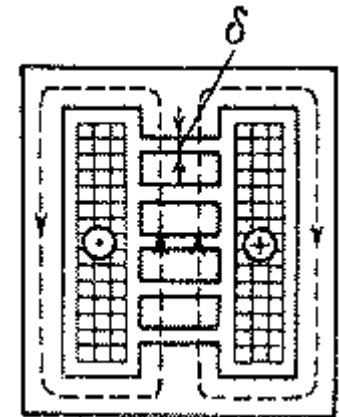
- трансформатор с одной обмоткой, работающий в режиме ХХ

Для снижения влияния нелинейности $\Phi(i)$ – воздушный зазор (магнитное сопротивление определяется сопротивлением зазора)

Для снижения влияния выпучивания потока в зазоре – несколько небольших зазоров

При необходимости регулирования L

- подвижный сердечник
- подмагничивание сердечника



Трансформаторы

Реакторы

Шунтирующие реакторы – для компенсации реактивной мощности ЛЭП

- генераторы: $P_{\text{ном}}$ и $\cos\varphi$
- ЛЭП: волновое сопротивление (длина линии)

При проектировании сети баланс P и Q – для режима макс. нагрузки

Избыток реактивной мощности в сети (снижение нагрузки; ошибки при проектировании/реконструкции сети):

- реактивный ток – потери в линии и трансформаторах; ограничение пропускной способности линии
- перенапряжения в отдельных частях линии; снижение качества эл.энергии

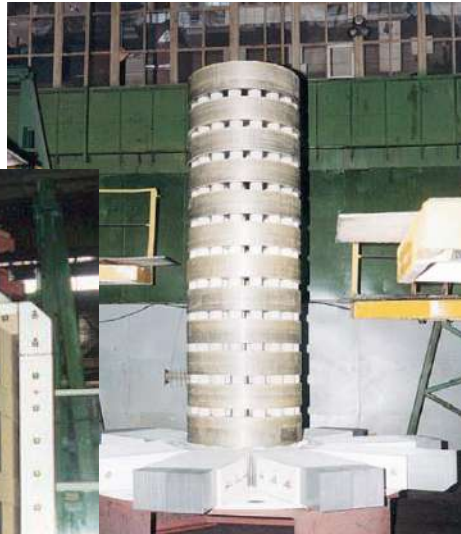
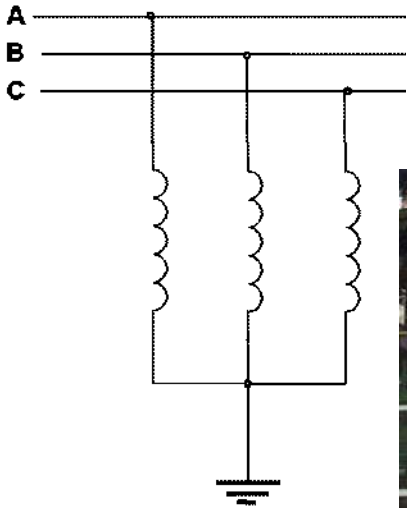
Реактор (индуктивное сопротивление) – потребляет реактивную мощность

Трансформаторы

Реакторы

Шунтирующие реакторы – для компенсации реактивной мощности ЛЭП

- Включают между ЛЭП и землей
- Подключают по мере необходимости



РОМБС(М) на 110...750 кВ

Трансформаторы

Реакторы

Дугогасящие реакторы – для защиты оборудования от замыканий на землю (в сетях 6-35 кВ)

- Включены постоянно между линией и землей
- L реактора + C линии образуют колебательный контур, непроходимый для токов замыкания на землю

Цель:

- Уменьшение тока в месте повреждения (до акт.составляющей)
- Надежное (быстрое) гашение дуги
- Безопасность при растекании токов в земле
- Ограничение перенапряжений на других фазах

Трансформаторы

Реакторы

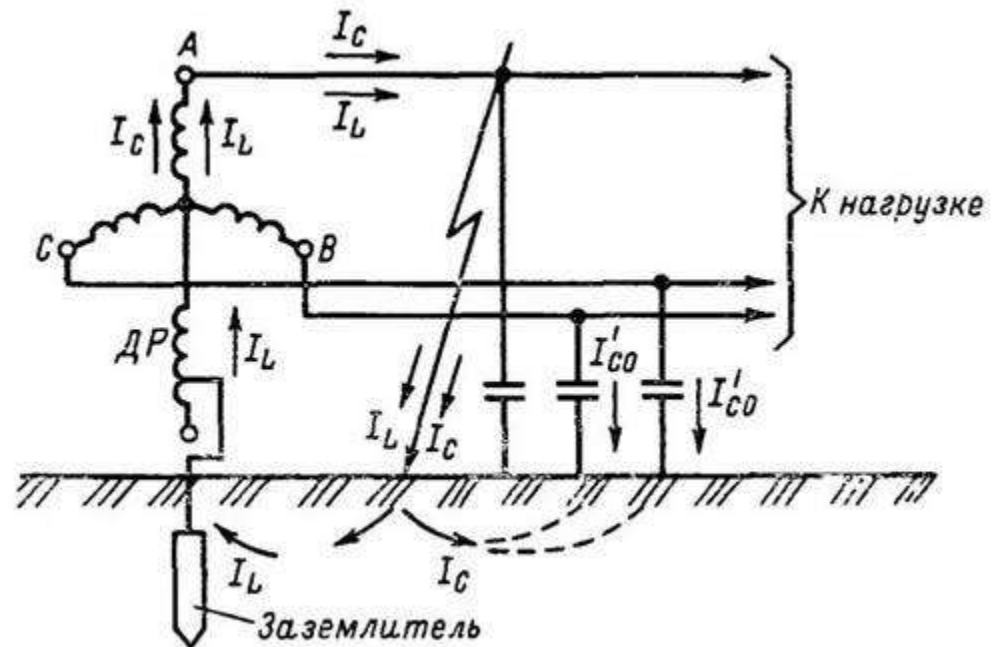
Дугогасящие реакторы – для защиты оборудования от замыканий на землю (в сетях 6-35 кВ)

Схема включения –
реактор заземляет
нейтраль

В нормальном состоянии
ток реактора = 0

При ОЗЗ на реакторе –
фазное напряжение

В случае резонанса $I_L = I_C$
фазовый сдвиг 180°
→ в месте замыкания
полный ток = 0



С линии изменяется (длина линии, f , t° , влажность, обледенение) →
необходим управляемый реактор
(подстройка под резонанс)

Трансформаторы

Реакторы

Дугогасящие реакторы – для защиты оборудования от замыканий на землю (в сетях 6-35 кВ)

Управляемый реактор РЗДПОМА

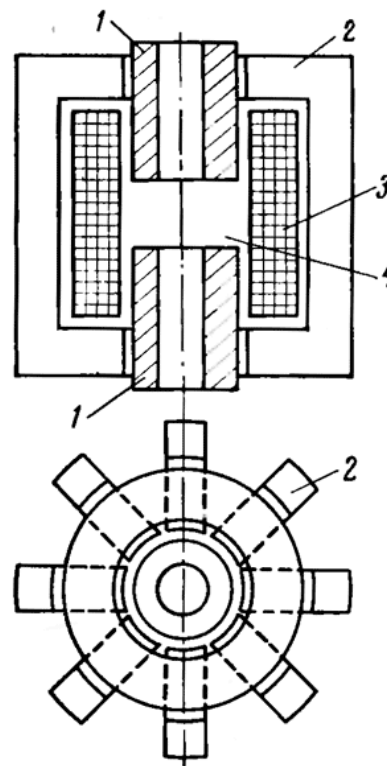
- многолучевое ярмо
- подвижный стержень

Линейность ВАХ

Не создает гармоник

Постоянная подстройка под сеть

Дорого, вибрации, шум



Другой способ управления – подмагничивание сердечника
(недостаток – высшие гармоники, необходимость фильтров 5, 7, 11, 13)

Трансформаторы

Реакторы

Токоограничивающие реакторы – для ограничения аварийных токов

- постоянно включены в линию
- при I_H падение U на L всего 2%
- при КЗ все U приходится на L и ток $I_{КЗ}$ определяется $X_L = \omega L$
- сердечника нет (при больших $I_{КЗ}$ сталь насытится и L будет мало)
- только катушка из толстого провода (малое R + мех. прочность)
- держат $I_{КЗ}$ до 6 ч. (сейчас норма 2 ч.)



Фильтровые реакторы – устранение гармоник (отдельно 5, 7, 11, 13)

Сглаживающие реакторы – устранение пульсаций выпрямленного U

Трансформаторы

Измерительные трансформаторы напряжения

В высоковольтных сетях для измерения U его сначала понижают (для защиты от высокого U и получения удобных значений U)

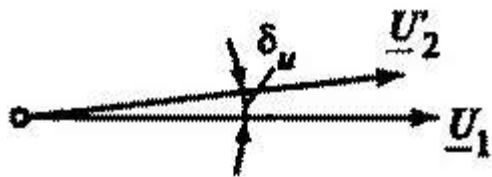
При подключении измерителей с Z_H его U_2 не должно изменяться

Напряжение вторичной обмотки
$$\dot{U}'_2 \approx \dot{U}_1 \frac{Z'_H}{Z_K + Z'_H}$$

При малых Z_K и $Z_H \gg Z_K$ можно получить $U_2 = U_1 \frac{w_2}{w_1}$

Погрешность по напряжению
$$f_u = \frac{U_2 \frac{w_1}{w_2} - U_1}{U_1} \cdot 100 \%$$

Погрешность по фазе



1 класс точности: $f_u = \pm 0,5\%$, $\delta_u = \pm 20'$

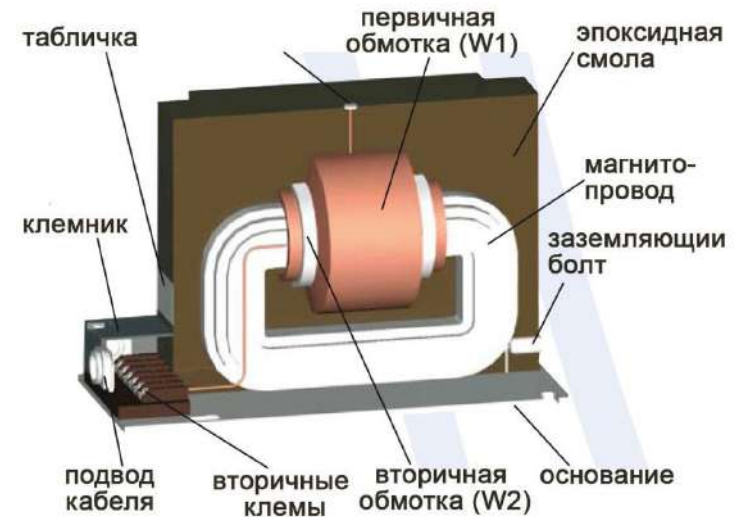
2 класс точности: $f_u = \pm 1\%$, $\delta_u = \pm 40'$

3 класс точности: $f_u = \pm 3\%$, δ_u не нормируется

Трансформаторы

Измерительные трансформаторы напряжения

Конструкции



Трансформаторы

Измерительные трансформаторы тока

Первичная обмотка – измеряемый ток

Вторичная обмотка – подключение амперметров (с малым Z_H)

Трансформатор тока работает в режиме КЗ

Ток вторичной обмотки
$$\dot{I}'_2 = -\dot{I}_1 \frac{Z_0}{Z_0 + Z'_2 + Z'_H}$$

Для повышения точности измерения $I_2 = I_1 \frac{w_1}{w_2}$

и снижения погрешности по фазе

стремятся уменьшить $Z'_2 + Z'_H$ по сравнению с Z_0

Опасность:

в рабочем состоянии Φ мал (размагничивание);
при отключении нагрузки (измерителя) Φ возрастает
(нагрев сердечника);

U_2 достигает опасных значений (пробой изоляции)

Допустимые погрешности:

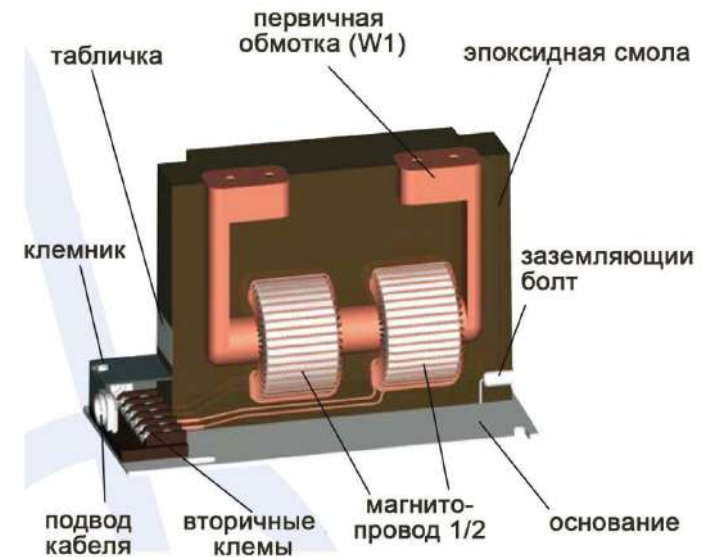
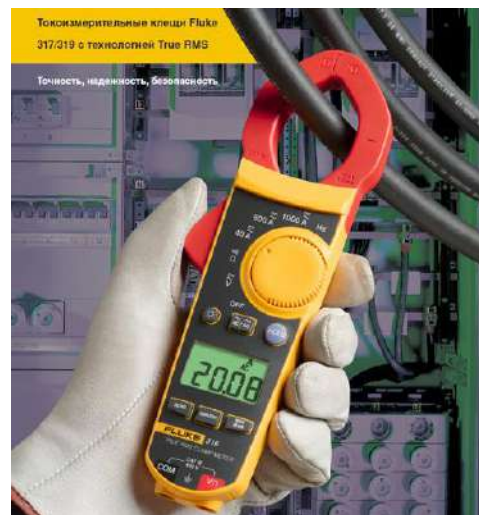
- $f_i = \pm 0,2\%$, $\delta_u = \pm 10'$
- $f_i = \pm 0,5\%$, $\delta_u = \pm 40'$
- $f_i = \pm 1\%$, $\delta_u = \pm 80'$
- ...

Трансформаторы

Измерительные трансформаторы тока

Конструкции

- первичная обмотка из 1 витка (измеряемый токопровод)
- магнитопровод
- многovitковая вторичная обмотка



Токоизмерительные клещи

Трансформаторы

Трансформаторы с плавным регулированием напряжения

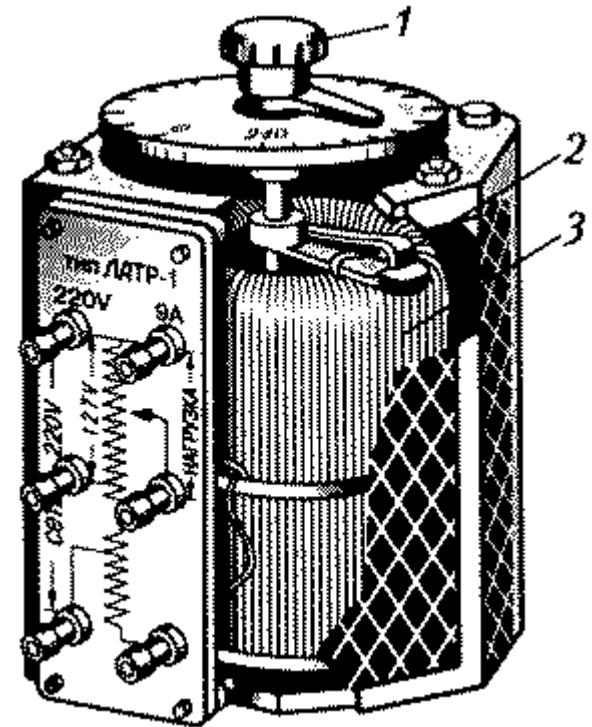
При низких напряжениях и малой мощности - ЛАТР



Регулирование напряжения от 0 до 220/380 В
Применяют до мощности 250 кВА

Автотрансформатор с изменяемым
числом витков w_2

Степень регулирования – $U_{\text{витка}}$

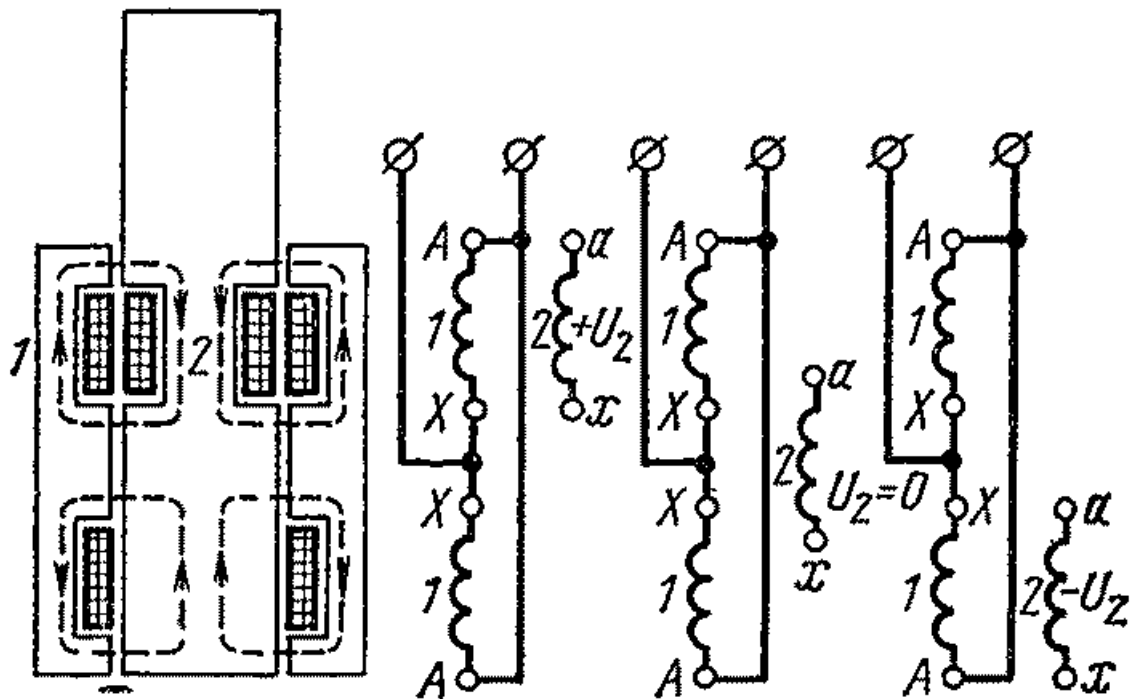


Трансформаторы

Трансформаторы с плавным регулированием напряжения

Подвижная вторичная обмотка – на среднем стержне
броневых магнитопровода

Первичная обмотка – из двух частей с противоположными потоками



Положение 1 – «+» U_2

Положение 2 – $U_2 = 0$

Положение 3 – «-» U_2

Проблема – сложность
конструкции

Трансформаторы

Трансформаторы с плавным регулированием напряжения

Регулирование – подвижной КЗ обмоткой K (поверх всех обмоток)

Первичные и вторичные обмотки – из катушек α и β , включенных встречно, с разными $k_{21\alpha} = \frac{w_{2\alpha}}{w_{1\alpha}} \neq \frac{w_{2\beta}}{w_{1\beta}} = k_{21\beta}$

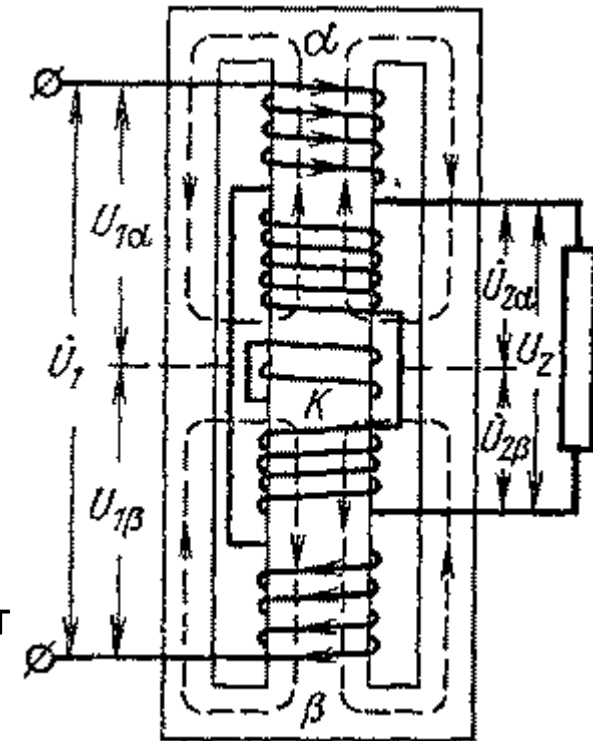
Эквивалентно двум отдельным трансформаторам

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1\alpha} + \dot{U}_{1\beta} = \dot{U}_{1\alpha} + \zeta \dot{U}_{1\alpha} = \dot{U}_{1\alpha} (1 + \zeta)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{U}_{2\alpha} + \dot{U}_{2\beta} \approx -(\dot{U}_{1\alpha} k_{21\alpha} + \dot{U}_{1\beta} k_{21\beta}) \\ &= -\dot{U}_{1\alpha} (k_{21\alpha} + \zeta k_{21\beta}) = -\dot{U}_1 \frac{(k_{21\alpha} + \zeta k_{21\beta})}{1 + \zeta} \end{aligned}$$

В среднем положении K – не влияет на потоки

При сдвиге на α (или β) КЗ обмотка размагничивает α (или β) \rightarrow изменяет $\zeta \rightarrow$ изменяет U_2



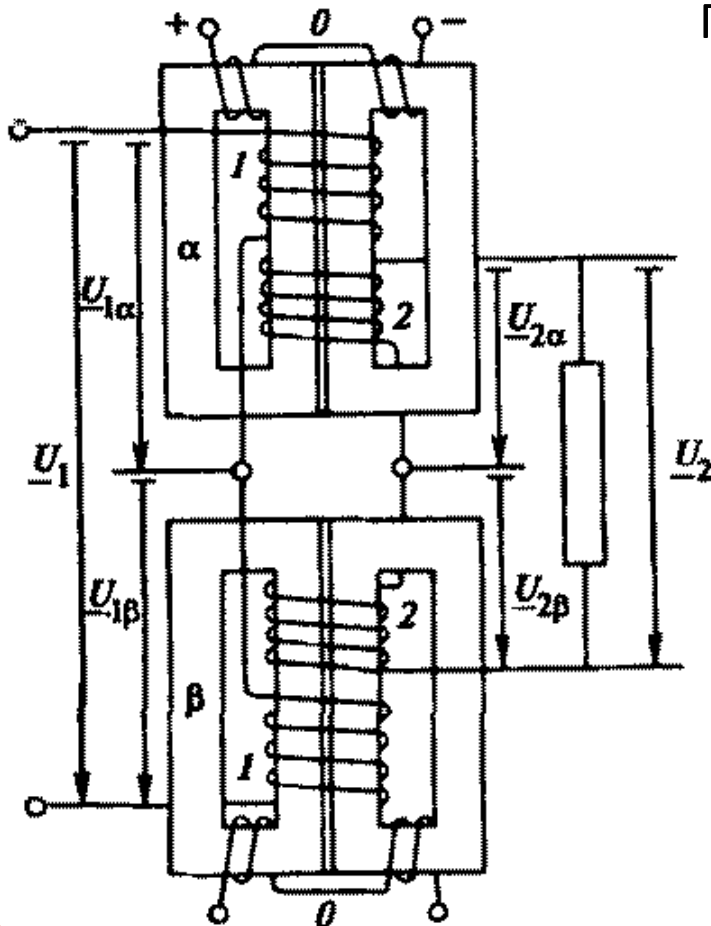
Недостаток – замыкание потока по воздуху в средней части

– большой намагничивающий ток

Трансформаторы

Трансформаторы с плавным регулированием напряжения

Проще использовать подмагничивание сердечника постоянным током



Первичные и вторичные обмотки состоят из катушек, расположенных на разных сердечниках, включенных последовательно

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1\alpha} + \dot{U}_{1\beta} = \dot{U}_{1\alpha} + \zeta \dot{U}_{1\alpha}$$

$$\dot{U}_2 = k_{21\alpha} \dot{U}_{1\alpha} + k_{21\beta} \dot{U}_{1\beta}$$

На каждом сердечнике – обмотка подмагничивания постоянного тока (насыщение сердечника → изменение ЭДС)

При разном подмагничивании сердечников изменяется соотношение $\zeta = \dot{U}_{1\beta} / \dot{U}_{1\alpha}$

→ изменяется вторичное напряжение

$$\dot{U}_2 = -\dot{U}_1 \frac{(k_{21\alpha} + \zeta k_{21\beta})}{1 + \zeta}$$

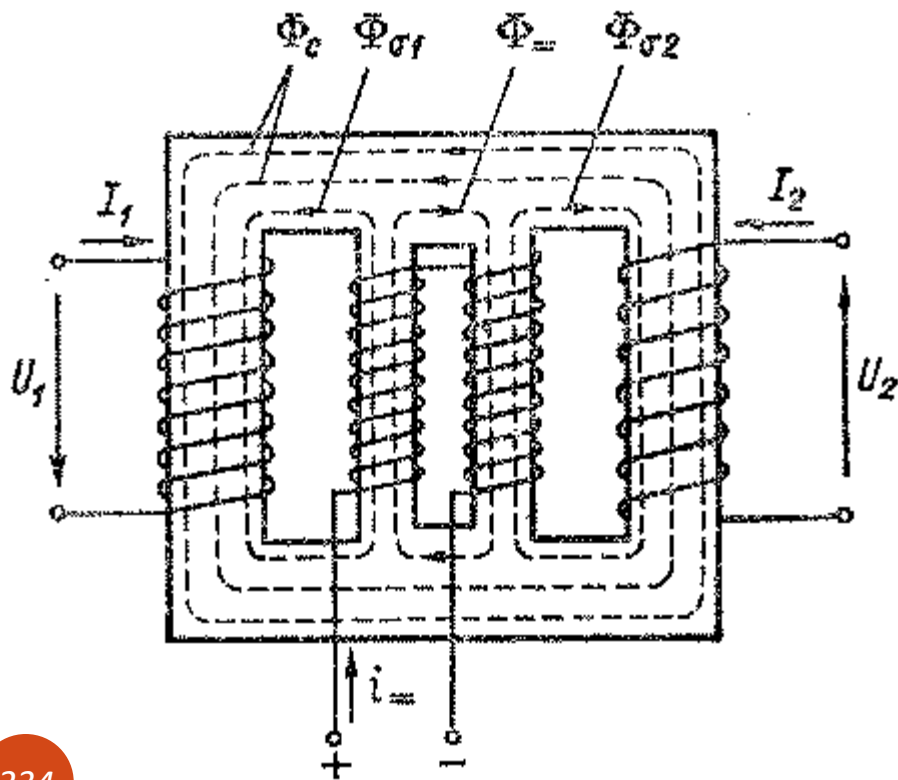
Трансформаторы

Трансформаторы с плавным регулированием напряжения

Другой способ регулирования U_2 подмагничиванием

Обмотки 1 и 2 на разных стержнях

Между стержнями – двойной магнитный шунт



По шунту – потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$
(токи I_1 и I_2 в противофазе и потоки в шунте складываются)

→ большие падения напряжения на jI_1X_1 и jI_2X_2

→ малый поток взаимоиндукции Φ_{12}

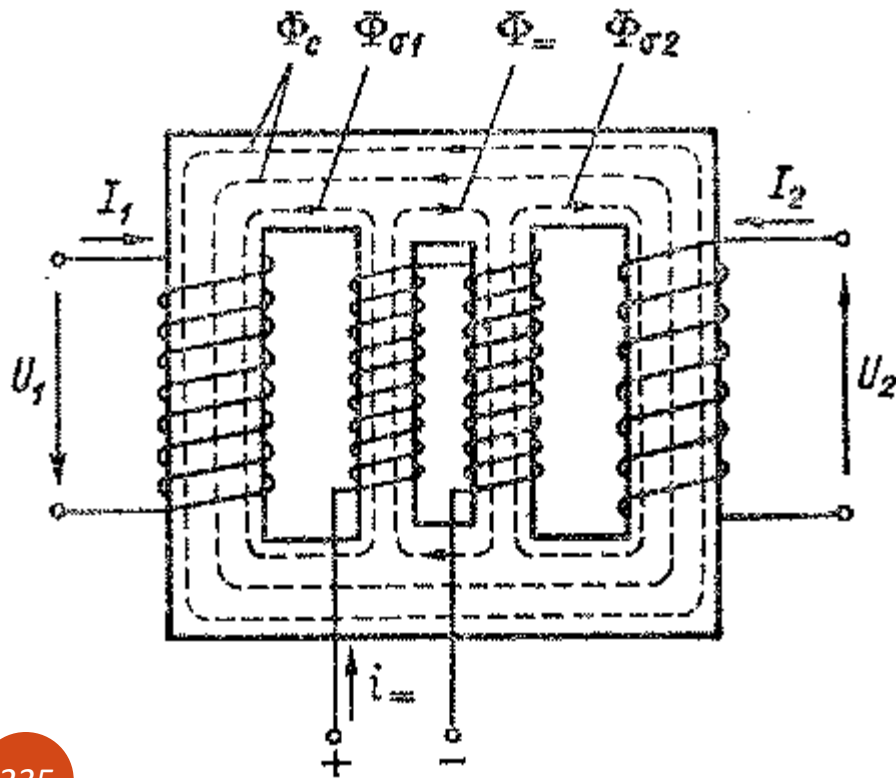
→ малое напряжение U_2

Трансформаторы

Трансформаторы с плавным регулированием напряжения

Подмагничивающая обмотка – из 2 катушек на 2 стержнях шунта

Ее поток Φ_{Σ} замыкается в пределах шунта



При увеличении подмагничивающего тока растет Φ_{Σ}

→ увеличивается насыщение шунта

→ уменьшаются потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$

→ увеличивается Φ_{12} и напряжение U_2

Трансформаторы

Сварочные трансформаторы

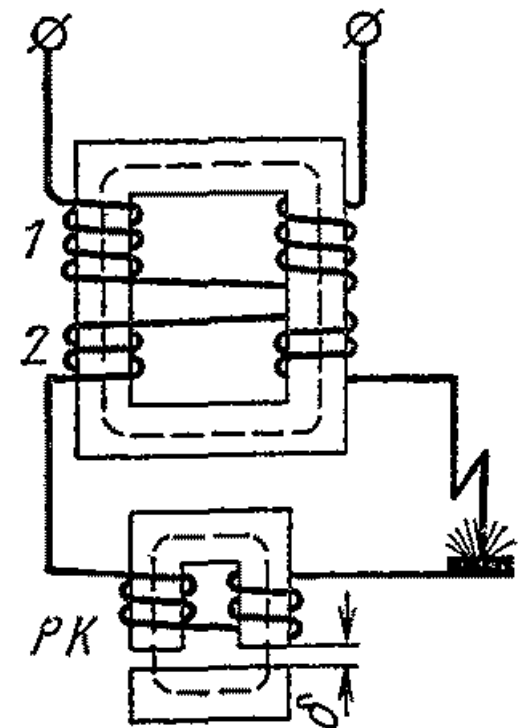
Электродуговая сварка: напряжение 40-70 В, прерывистый режим работы (резкие переходы между ХХ и КЗ) → требуется круто падающая внешняя характеристика ($I \approx \text{Const}$) и большая L (ограничение тока КЗ)

А) трансформатор с большим Φ_{σ} : обмотки на разных стержнях, магнитные шунты, ...

Б) трансформатор с дополнительной реактивной катушкой

Для регулирования сварочного тока – регулирование зазора в магнитной цепи катушки

(При уменьшении δ возрастает Φ и L катушки)



Трансформаторы

Печные трансформаторы

Дуговые печи – переменный ток низкого напряжения (1- или 3-фазный):

U_2 – 100 В, I_2 – десятки-сотни кА

Вторичная обмотка – много параллельных ветвей по несколько витков

Для регулирования U_2 переключения параллельных ветвей (сложно из-за больших I_2) либо изменение w_1 и переключение $Y - \Delta$

Особое внимание к снижению индуктивности токоотводов (из-за малого U_2) – чередование направлений тока в шинах

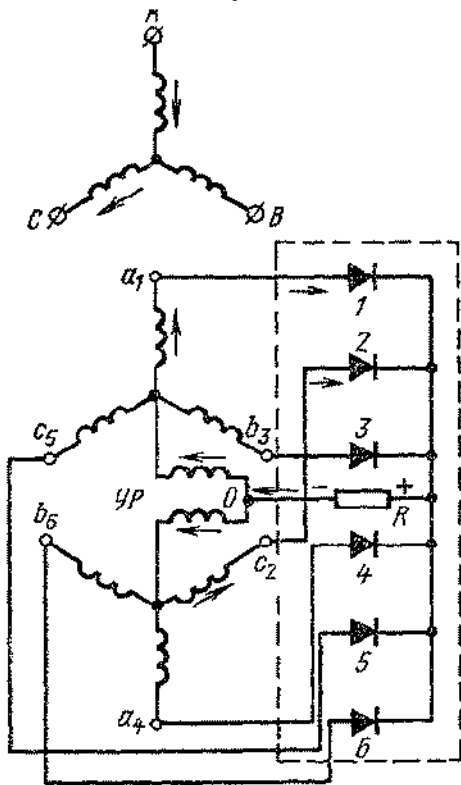
Из-за частых переходных процессов – повышенные требования к креплению обмоток

Для ограничения тока КЗ – дополнительная реактивная катушка в первичной цепи

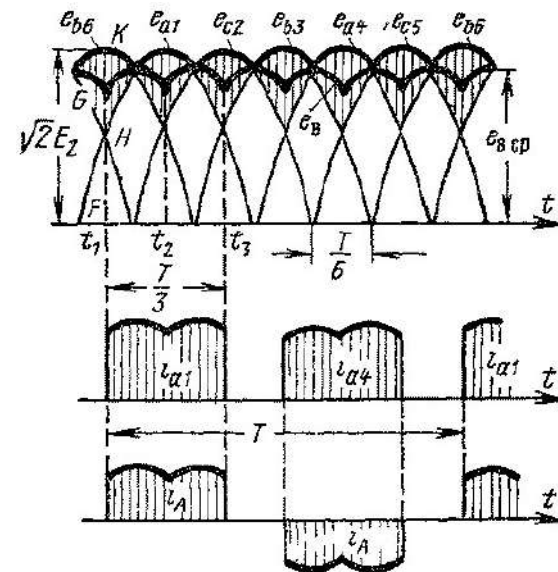
Трансформаторы

Выпрямительные трансформаторы

Выпрямительные установки – несинусоидальные токи фаз, пульсации выпрямленного напряжения, периодические 2-фазные замыкания



- Увеличение числа фаз вторичной обмотки – уменьшение пульсаций U_2 и гармоник I_1
- Уравнительная катушка между нейтралью
- Усиленное крепление обмоток



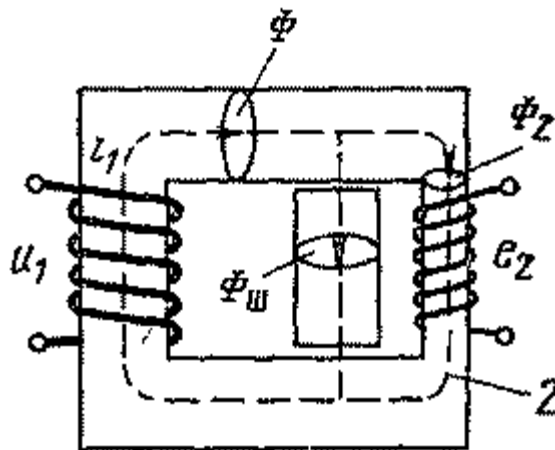
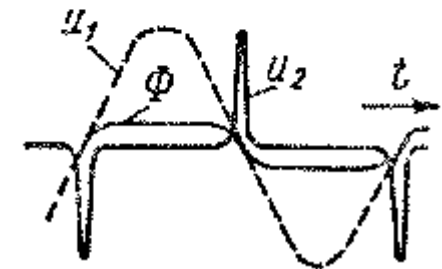
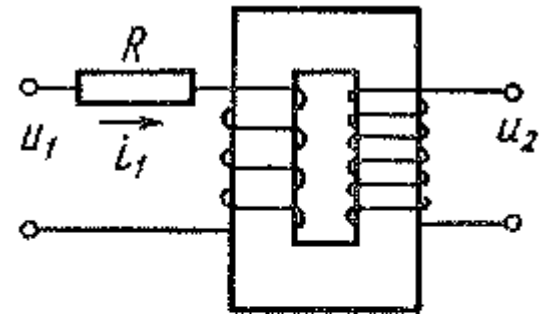
Трансформаторы

Пик-трансформаторы

Формирование периодических коротких импульсов напряжения

Обычный трансформатор с сильно насыщенным магнитопроводом

- U_1 изменяется синусоидально
- $\Phi \approx \text{Const}$, меняет только направление
- U_2 наводится только при изменении направления Φ
- Для ограничения тока – R в первичной цепи



Вариант – сердечник с шунтом
 W_2 – на тонком стержне
 $\Phi = \Phi_{\text{ш}} + \Phi_2$ (остается синусоидален)

Трансформаторы

Трансформаторы высокого напряжения

Для испытания изоляции требуется $U > 1$ млн. В

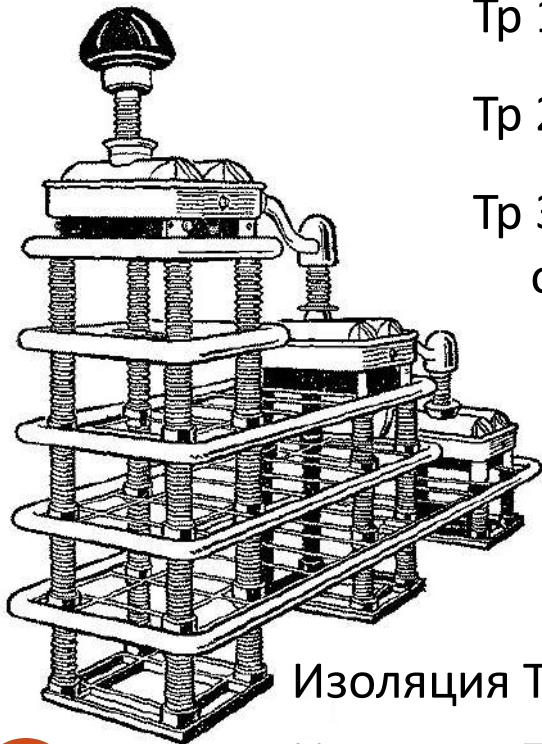
Для повышающего трансформатора проблема – изоляция обмоток

Решение – каскадное включение трансформаторов

Тр 1 заземлен, его третья обмотка питает Тр 2

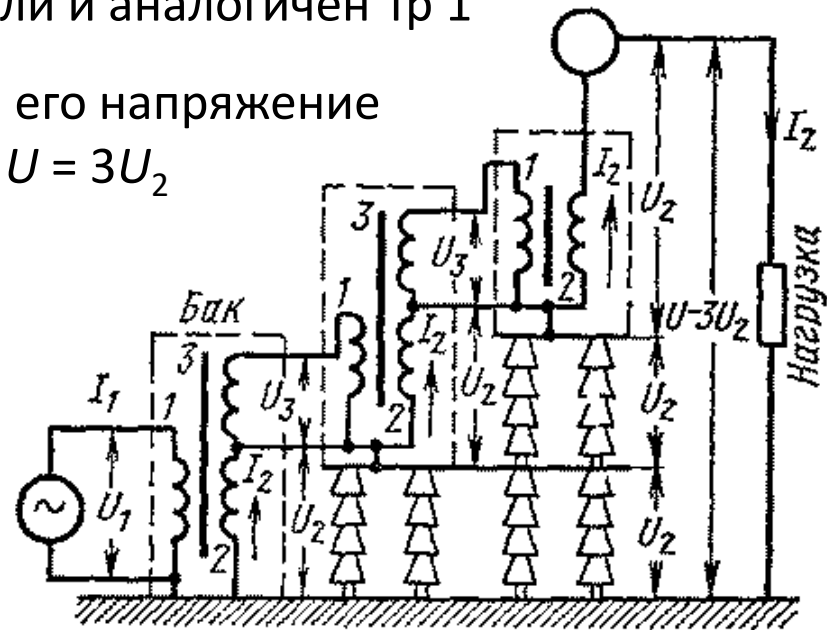
Тр 2 изолирован от земли и аналогичен Тр 1

Тр 3 также изолирован; его напряжение относительно земли $U = 3U_2$



Изоляция Тр1 и Тр2 – на $U_2 + U_3$

Изоляция Тр3 – на U_2



Трансформаторы

Преобразование числа фаз

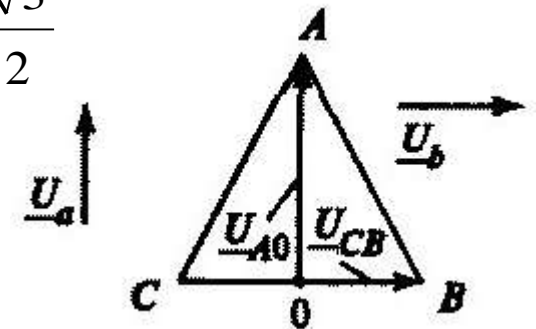
Двухфазная система напряжений:

- $U_a = U_b$
- $\varphi_{ab} = 90^\circ$

Использование 3-фазной системы:

- Угол между U_{A0} и $U_{CB} = 90^\circ$

- из Δ -ка $A0C$:
$$U_{A0} = \sqrt{U_{1л}^2 - \left(\frac{U_{1л}}{2}\right)^2} = U_{1л} \frac{\sqrt{3}}{2}$$

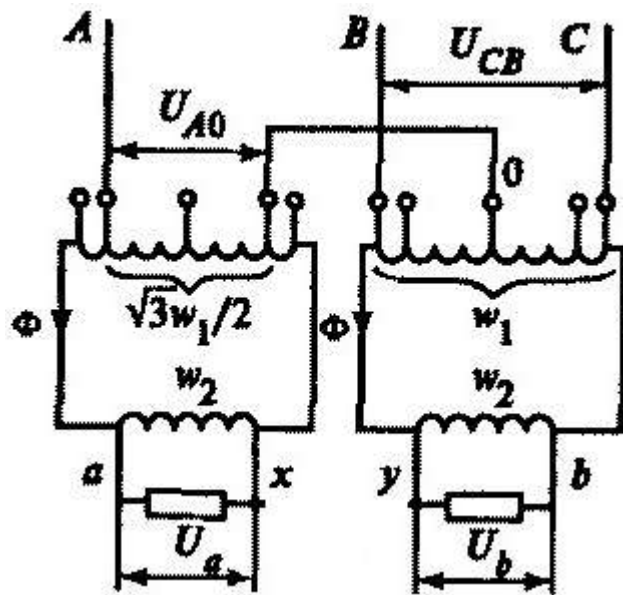


Трансформаторы

Преобразование числа фаз

С помощью двух однофазных трансформаторов преобразуем:

- напряжение U_{CB} – в напряжение фазы b
- напряжение U_{A0} после уменьшения в $\frac{2}{\sqrt{3}}$ раз – в напряжение фазы a



Трансформаторы одинаковые с отпайками на

$$w_1; \quad \frac{w_1}{2}; \quad \frac{\sqrt{3}w_1}{2}$$

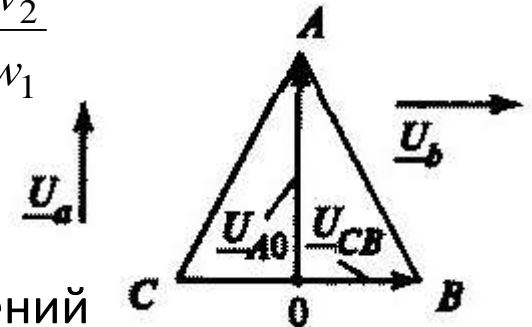
Напряжение U_b $U_b = U_{CB} \frac{w_2}{w_1} = U_{1л} \frac{w_2}{w_1}$

Напряжение U_a

$$U_a = U_{A0} \frac{w_2}{w_1 \sqrt{3}/2} = U_{1л} \frac{w_2}{w_1}$$

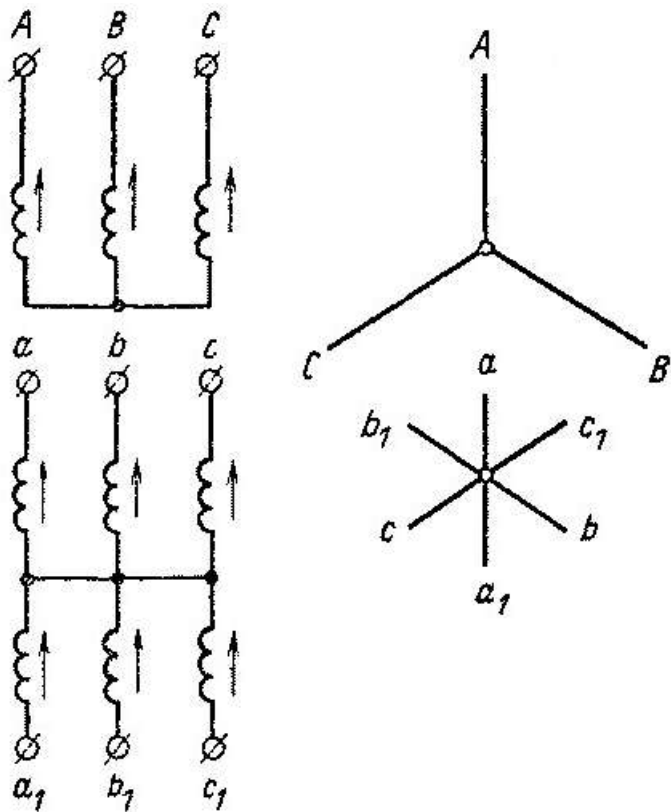
Получаем $U_a = U_b, \varphi_{ab} = 90^\circ$

→ 2-фазная система напряжений



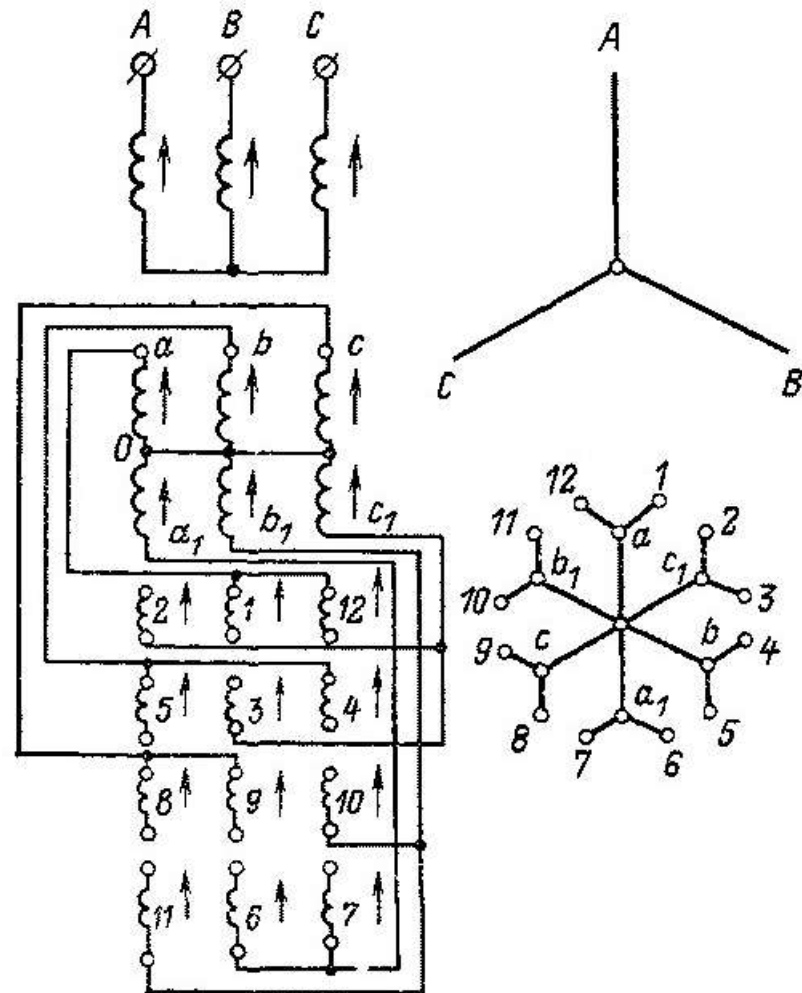
Трансформаторы

Преобразование числа фаз



6-фазная система напряжений

12-фазная система напряжений



Ширинский С.В. каф.ЭМ, МЭИ

Трансформаторы

Преобразование частоты

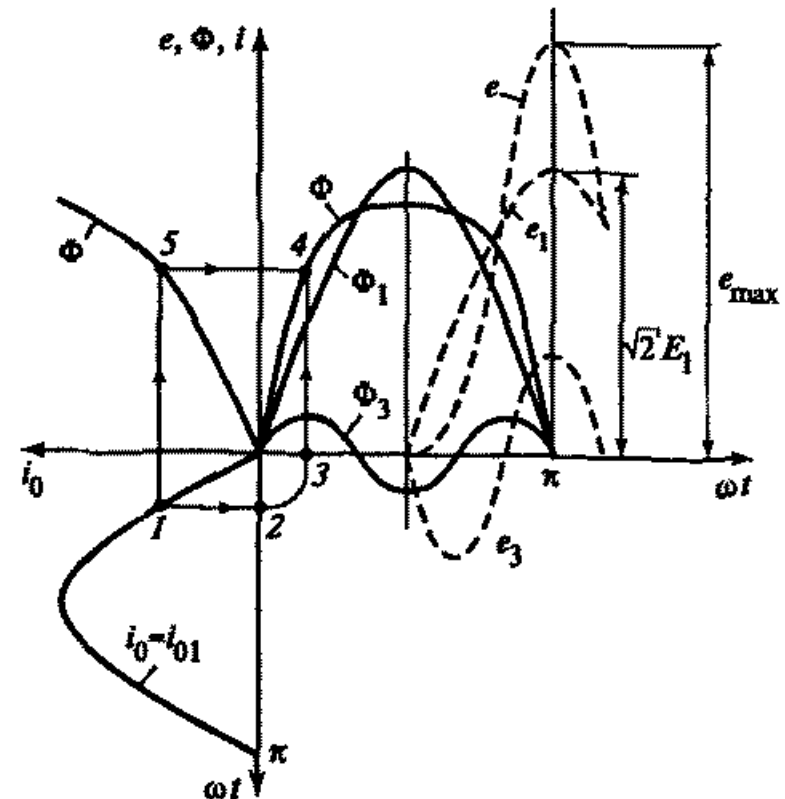
Для утроения частоты используют 3-ю гармонику потока в магнитопроводах группы однофазных трансформаторов В 3-фазной Y токи синусоидальны (нет 3 гармоники)

- проявляется 3 гармоника потока (уплощение кривой Φ)
- наводится 3 гармоника ЭДС (заостренная форма e)

$$f_3 = 3f_1$$

Особенность 3 гармоники в многофазной системе – фазовый сдвиг 3-х гармоник всех фаз = 0

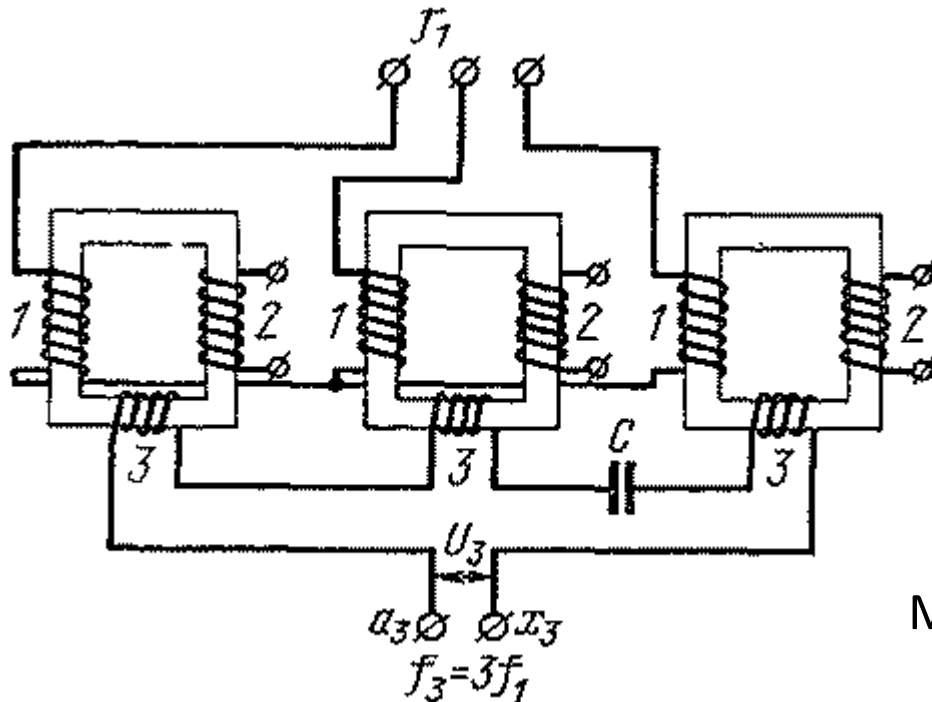
$$\dot{E}_{A3} = \dot{E}_{B3} = \dot{E}_{C3}$$



Трансформаторы

Преобразование частоты

Первичные обмотки 1 группового трансформатора соединены в Y и подключены к 3-фазной сети с f_1



Вторичные обмотки 3 соединены последовательно \rightarrow 3 гармоники суммируются: U_3 с $f_3 = 3f_1$

1 гармоники в них отсутствуют, т.к.

$$\dot{E}_{A1} + \dot{E}_{B1} + \dot{E}_{C1} = 0$$

Для компенсации падения U при нагрузке включают C

Можно использовать и обмотки 2, соединенные в Y для лучшего использования магнитной системы

Трансформаторы

Преобразование частоты

Для удвоения частоты используют трансформатор с расщепленным магнитопроводом

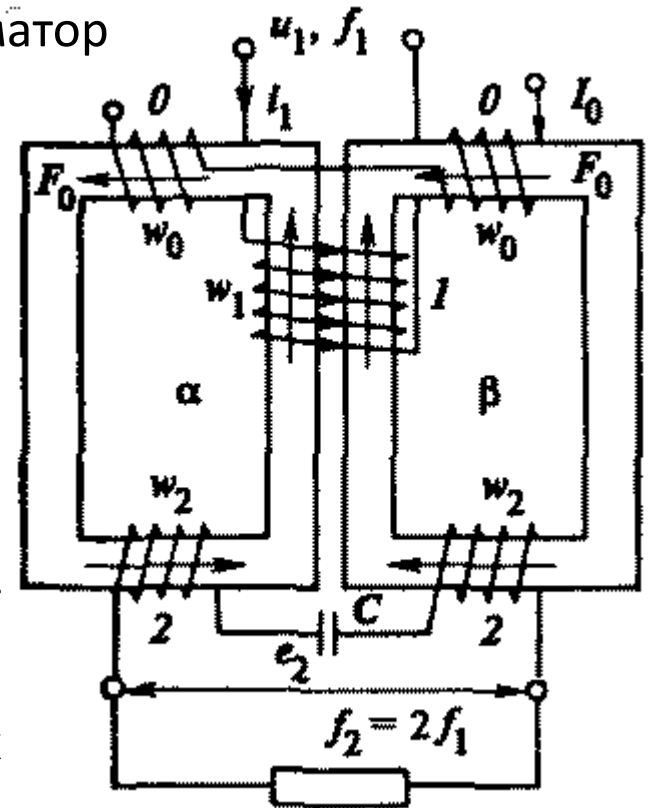
Первичная обмотка 1 едина и создает потоки двух магнитопроводов Φ_α и Φ_β частотой f_1

Ее ЭДС e_1 пропорциональна $\Phi_\alpha + \Phi_\beta$

Катушки вторичной обмотки 2 включены встречно и ее ЭДС $e_2 \sim \Phi_\alpha - \Phi_\beta$

Катушки подмагничивающей обмотки 0 включены согласно, питаются постоянным током и создают МДС смещения F_0

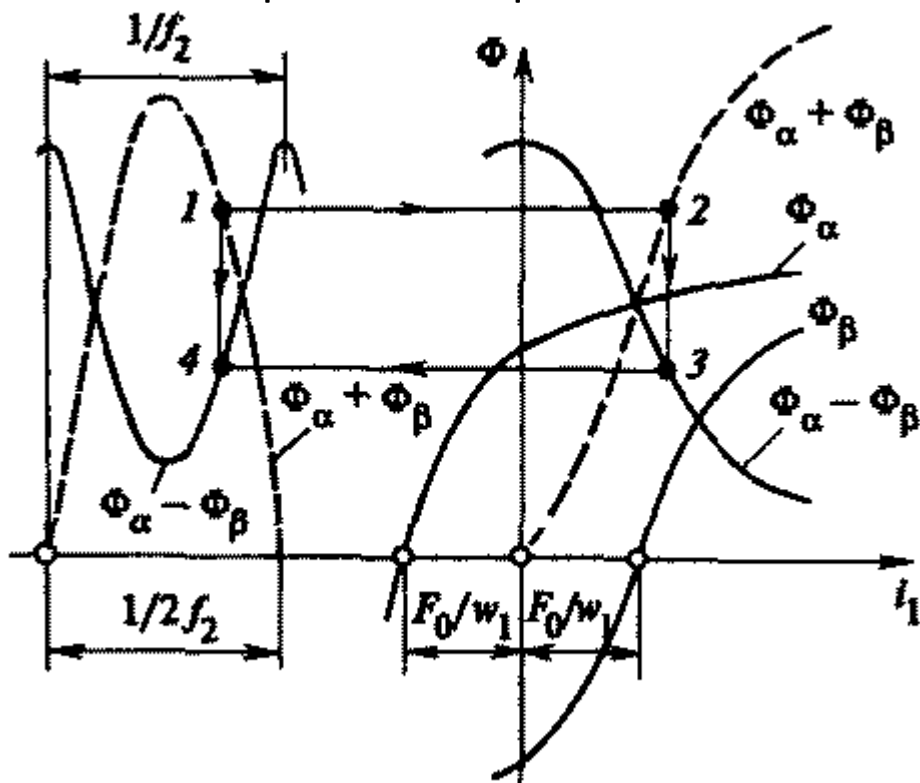
→ кривые намагничивания $\Phi(i)$ в магнитопроводах α и β смещены в разные стороны



Трансформаторы

Преобразование частоты

Кривые намагничивания $\Phi(i)$ в магнитопроводах α и β смещены в разные стороны



$$\text{ЭДС } e_1 \sim \Phi_\alpha + \Phi_\beta$$

$$\text{ЭДС } e_2 \sim \Phi_\alpha - \Phi_\beta$$

При изменении $(\Phi_\alpha + \Phi_\beta)$ с частотой f_1 разность потоков $(\Phi_\alpha - \Phi_\beta)$ изменяется с частотой $f_2 = 2f_1$

Т.е. во вторичной обмотке наводится ЭДС e_2 с частотой $f_2 = 2f_1$

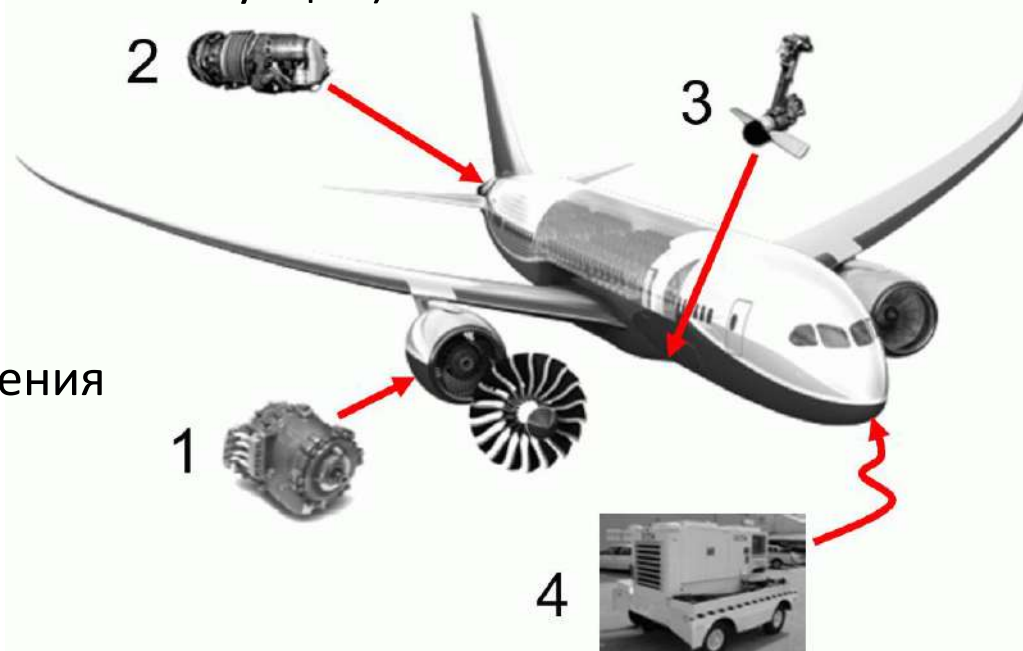


Авиационные электрические машины

Бортовая система электроснабжения (СЭС) – генерирование, регулирование, распределение электроэнергии: 115 В 400 Гц и 28 В dc

На борту несколько генераторов (для надежности, для покрытия пиковых нагрузок, для аварийных ситуаций):

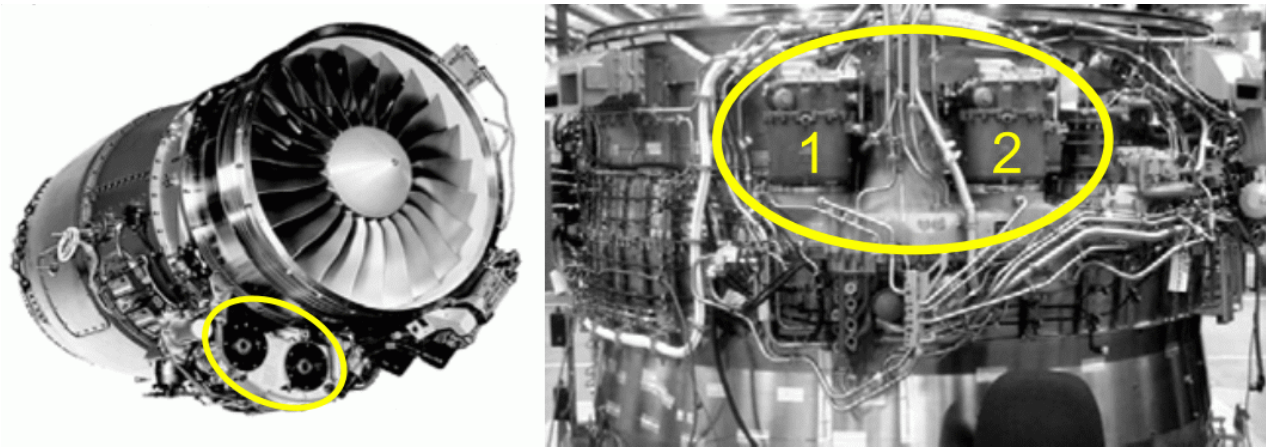
1. Основные генераторы
2. Вспомогательный блок электроснабжения
3. Аварийная турбина
4. Наземный блок электроснабжения (мобильный)



Авиационные электрические машины

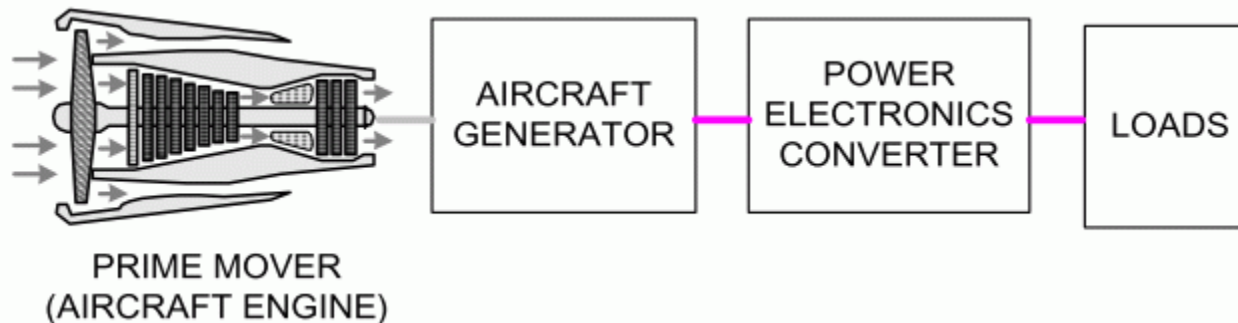
Основные генераторы

Места установки и сами генераторы на турбовинтовом двигателе



Используются во время полета как основной источник энергии

Силовой конвертор используется для регулирования U и f



Авиационные электрические машины

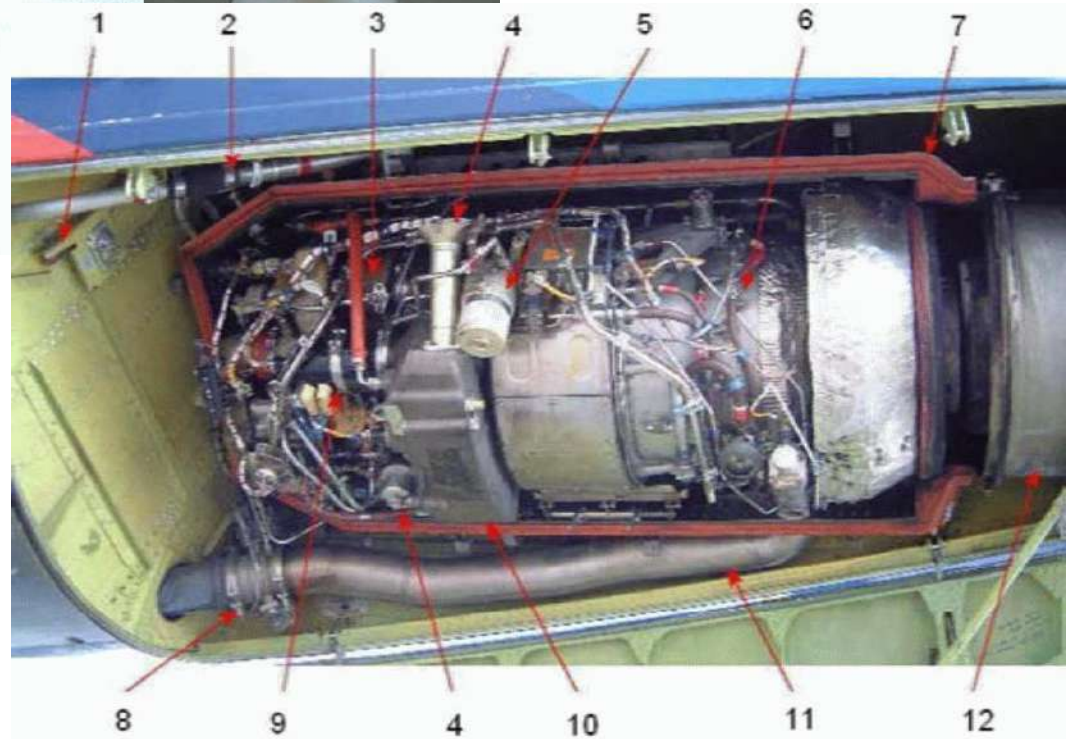
Вспомогательный блок электроснабжения

Устанавливается в хвостовой части, используется на стоянке



Может быть резервным источником в полете

- 3 – генератор
- 6 – камера сгорания
- 9 – стартер
- 10 – топливный бак
- 11 – подача воздуха
- 12 – выхлоп



Авиационные электрические машины

Аварийная турбина

Используется при выходе из строя всех остальных источников энергии

Вращается набегающим потоком воздуха

Вращает электрогенератор и гидравлический насос



Авиационные электрические машины

Наземный блок электроснабжения



Авиационные электрические машины

Авиационный генератор

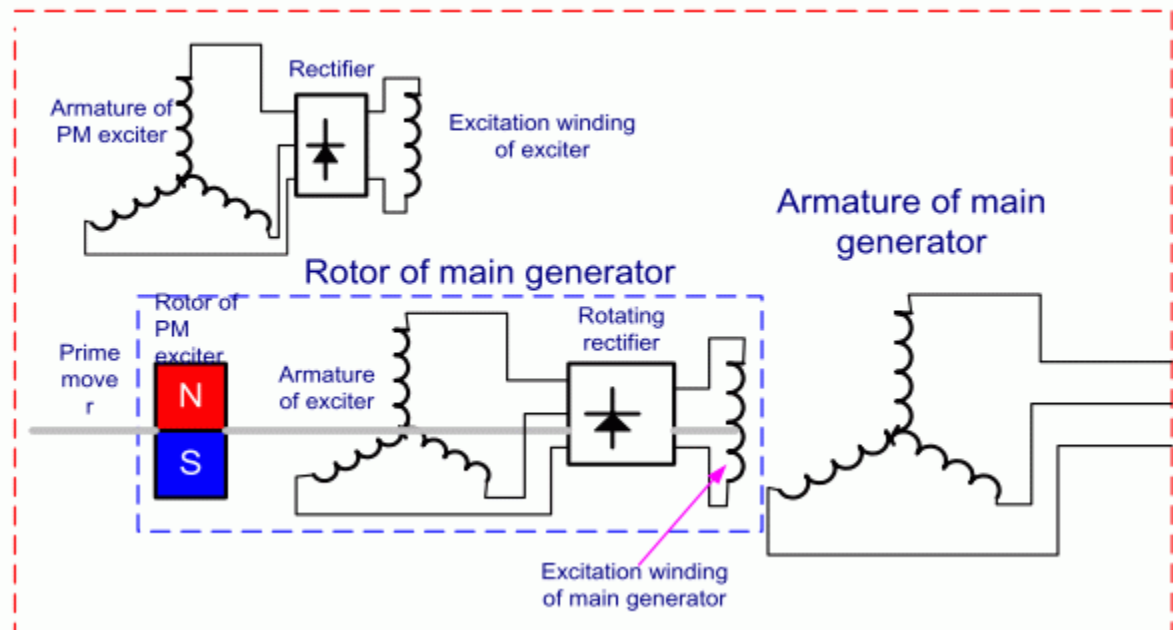
P от 30 до 250 кВт

n от 7200 до 27000 об/мин

Обычно соединен с двигателем через трансмиссию

Может быть встроен в двигатель

AIRCRAFT GENERATOR



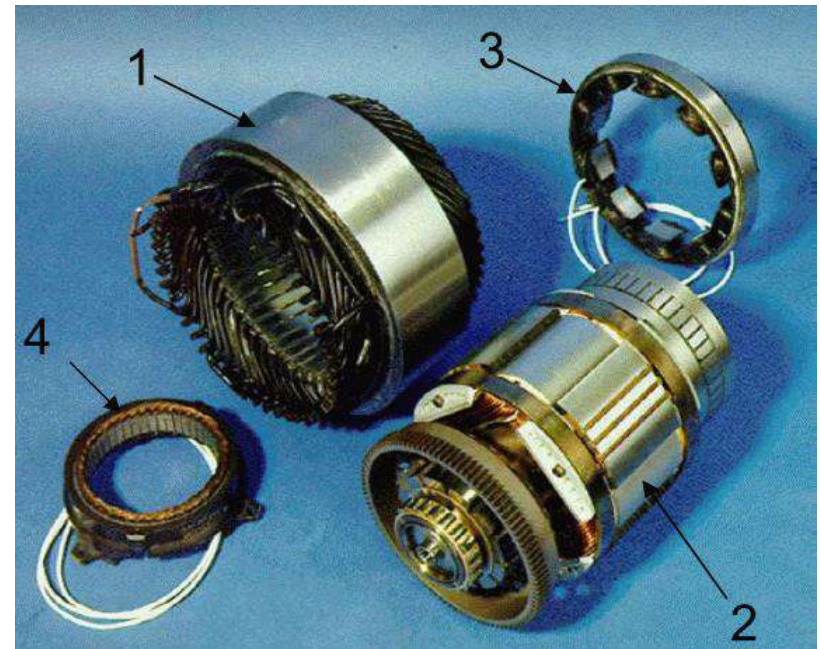
- Синхронный 3-фазный генератор с ОВ
- Блок вращающихся выпрямителей
- Возбудитель обратной конструкции
- Подвозбудитель с ПМ на роторе

Авиационные электрические машины

Авиационный генератор

90-кВт генератор:

1. Статор
2. Ротор
3. Возбудитель (полюсы с обмоткой возбуждения)
4. Подвозбудитель (якорь)



Число зубцов от 24 до 108

Число полюсов от 2 до 12

Обмотка статора 3-фазная двухслойная с укороченным шагом и q от 4 до 10 (для уменьшения гармоник индукции)

При больших n обмотка имеет малое число витков и много параллельных ветвей

Авиационные электрические машины

Авиационный генератор

Частота вращения авиационного двигателя изменяется

- Система постоянной скорости постоянной частоты
(с 1946 г. трансмиссия с дифференциалом и гидравлическим регулятором обеспечивает постоянную n генератора при переменной n авиадвигателя)
- Система переменной скорости постоянной частоты
(после генератора – полупроводниковый преобразователь: выпрямитель → цепь постоянного тока → инвертор постоянной частоты)
- Система переменной частоты ($f \sim n$)
(годится только для резистивной нагрузки: нагреватели противообледенительной системы)

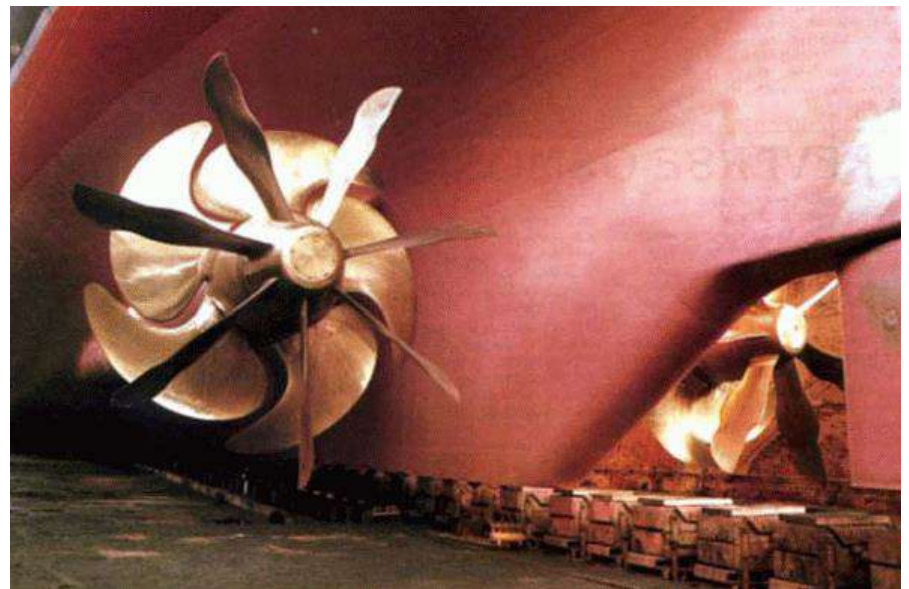


Судовые электрические машины

Недостаток парового/дизельного привода – непосредственная механическая связь с гребным винтом (потери в трансмиссии, вал задает компоновку силовых агрегатов)

Электрический привод –
гибкость в передаче
мощности и управлении;
меньший расход топлива

Силовая электроника: после 80-х
«полностью электрический
корабль»



Судовые электрические машины

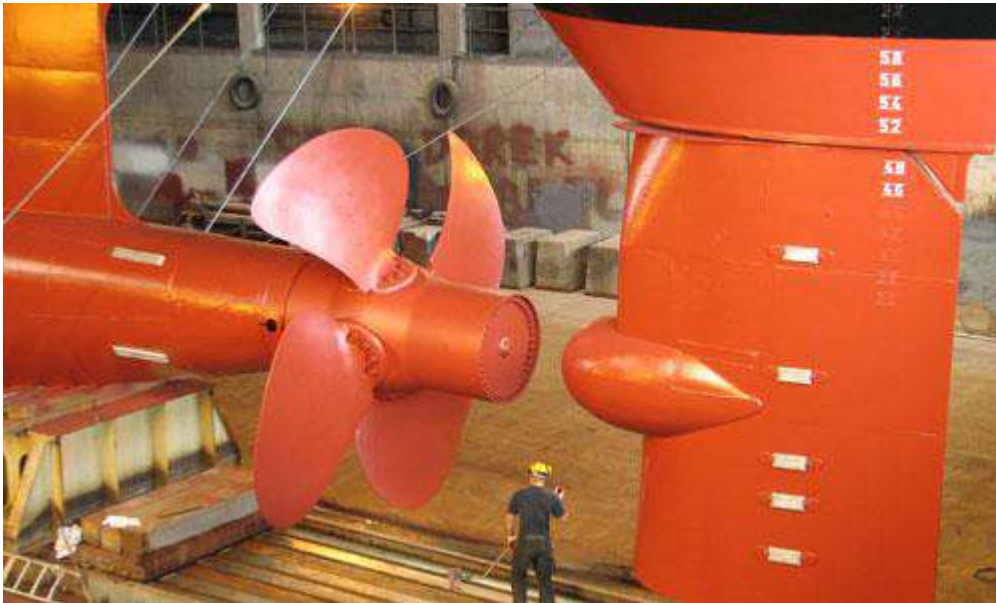
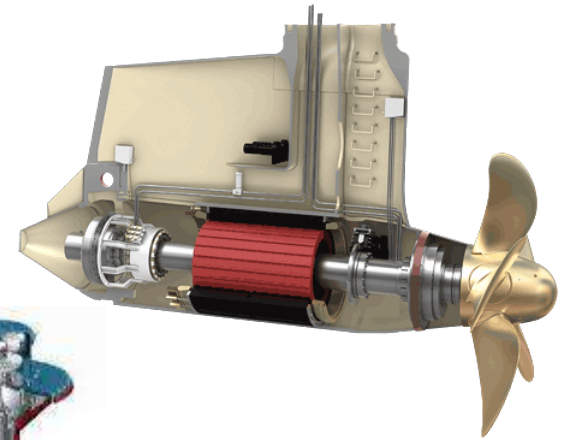
Современная трансмиссия

- *Первичный двигатель* – дизельный / газотурбинный / паротурбинный / парогазовый
- *Генератор* – 3-фазный синхронный генератор с бесконтактным возбудителем и автоматическим регулятором напряжения; перспективны генераторы с ВТСП
- *Распределительный щит* – разделен на секции для надежности
- *Трансформатор* – для изолирования распределительной системы и подразделения на секции (разное U , фазовый сдвиг), демпфирования высокочастотных шумов
- *Тяговый двигатель* – асинхронный двигатель, синхронный двигатель с ОВ, с ПМ с радиальным / аксиальным / поперечным потоком

Судовые электрические машины

Двигатель

- Гребной винт на валу
- Азимутальные подруливающие устройства
- Внешний двигатель
- Встроенный мотор-винт



Судовые электрические машины

Queen Elizabeth 2

- 9 трехфазных генераторов 10,5 МВт, 10 кВ, 60 Гц (от дизелей)
- 2 синхронных двигателя по 44 МВт, 144 об/мин, 60 Гц

Queen Mary 2

- 2 газовые турбины и 4 дизеля – 118 МВт
- 4 тяговых двигателя по 21,5 МВт

Liberty of the Seas

- 6 генераторов по 17,6 МВА → 105,6 МВА
- двигатели: 3 по 14 МВт и 4 по 3,4 МВт
- 160,000 тонн, 339 м длины 56 м ширины
- 3634 пассажира + экипаж 1360 чел на 18 палубах

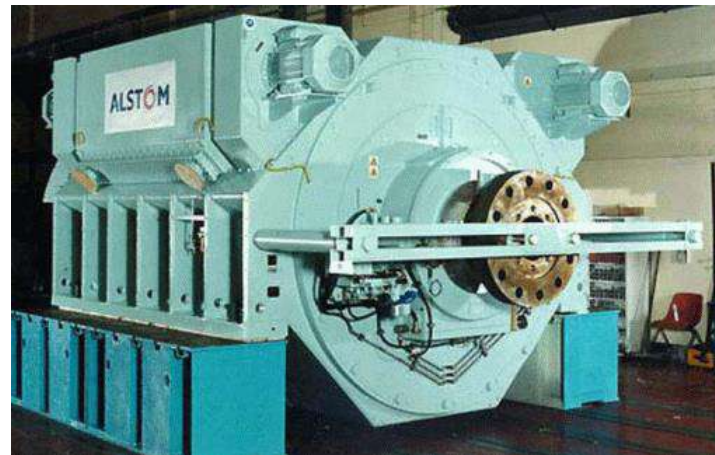
Судовые электрические машины

Генераторы

- Синхронные генераторы с ОВ и бесконтактным возбуждением

Тяговые двигатели

- Асинхронный двигатель (например, 19 МВт, 150 об/мин)
- Синхронный двигатель (например, 44 МВт, 144 об/мин)
- СД с постоянными магнитами (например, 18 МВт)



- Дисковый СД с ПМ с аксиальным потоком
- Двигатель с поперечным потоком (прототип 2-фазный 2 МВт, 76 полюсов, 195 Гц, 308 об/мин)



Высокоскоростные электрические машины

Высокоскоростные генераторы мегаваттного класса

- перспективное энергетическое оружие (лазеры, микроволновое излучение, пучки частиц) воздушного базирования
- радарные системы

требуют высоковольтный источник энергии мегаваттного класса

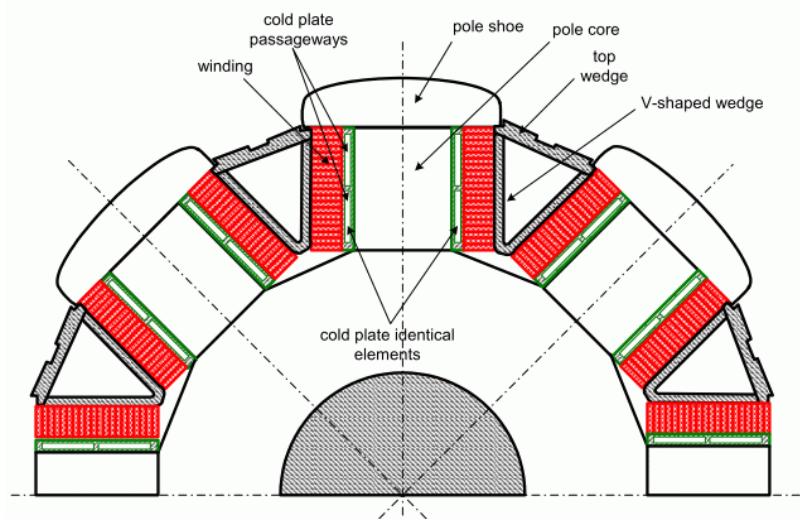
Традиционный синхронный генератор слишком тяжел для самолета

- Повышение частоты вращения уменьшает габариты и массу
- Усиливается проблема отвода тепла (потери – десятки кВт)

Высокоскоростные электрические машины

Охлаждение / плотность тока / габариты

Системы охлаждения	J А/мм ²
Радиаторы	5 – 8
Водяной/масляный кожух	10 – 15
Непосредственное жидкостное охлаждение	до 30
Испарительное охлаждение лобовых частей	около 28
Охлаждающая плита на полюсе	около 22



Innovative Power Solutions –
охлаждающая плита на полюсе
(в ней охладитель – жидкость
или газ)

Высокоскоростные электрические машины

Микротурбины

Газовая турбина со встроенным генератором
30-200 кВт, 60-120 тыс.об/мин

Статор из стали 0,2 – 0,1 мм

Ротор с ПМ в защитном кожухе:

- титан: v до 250 м/с, t° до 290°
- углепластик: v до 320 м/с, t° до 180°

Наработка на отказ до 47,000 час.

Capstone Turbine Corporation –
автономные электростанции
на основе микротурбин

Единичные модули: 30 / 65 / 200 кВт

Составные – до 1000 кВт



Высокоскоростные электрические машины

Микротурбины

Газовая турбина (сжигает газ)

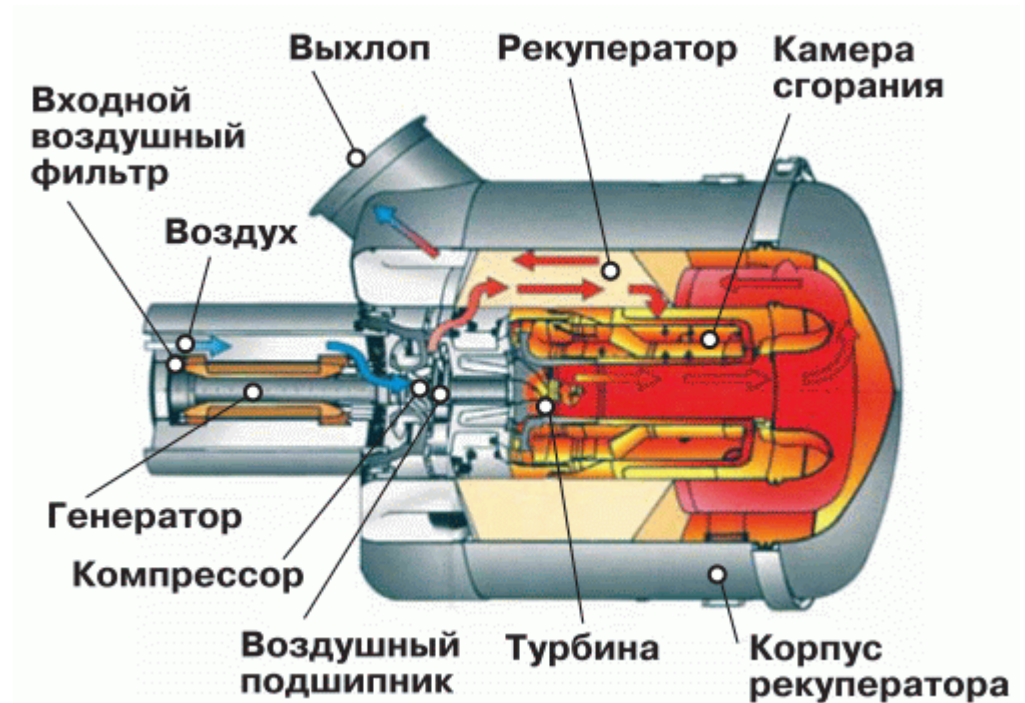
Частота вращения: 45000 – 96000 об/мин

Воздушные подшипники

Генератор с 2-полюсным ПМ

Охлаждение – входящим воздухом

Напряжение при n_{max} $U_{\sim} = 277$ В

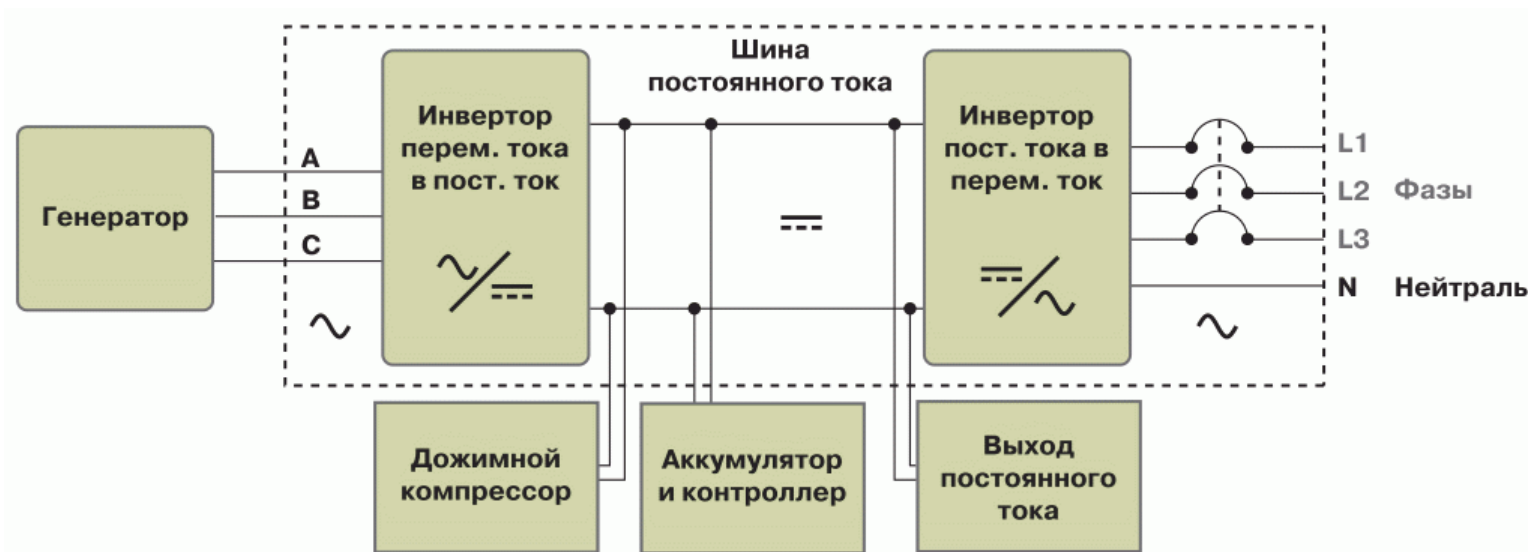


Высокоскоростные электрические машины

Микротурбины



Генератор с переменной n работает через преобразователь с буфером по постоянному току (АКБ)

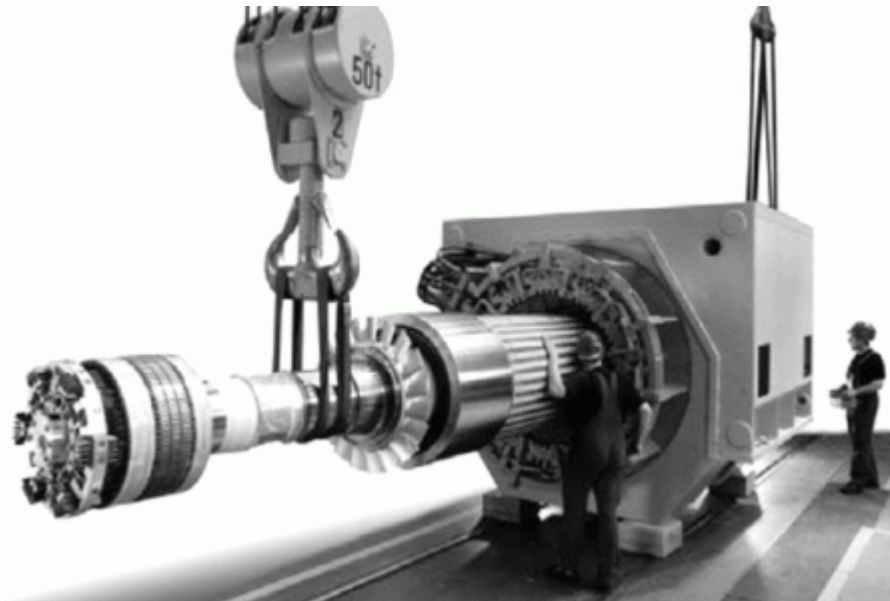


Высокоскоростные электрические машины

Компрессоры

Компрессоры для сжижения природного газа – привод от газовых турбин: (большие механические нагрузки, сверхмалые зазоры, малый КПД, выброс CO_x , снижение мощности при повышении температуры окружающей среды)

Синхронные двигатели – хорошая альтернатива



СД от Siemens: 65 МВт, 3600 об/мин,
водно-воздушное охлаждение

Высокоскоростные электрические машины

Компрессоры

Компрессоры в системах вентиляции и кондиционирования (heating, ventilation and air conditioning – HVAC)

- Высокоскоростной привод (18-48 тыс. об/мин)
- Безредукторный привод (пропеллер на валу ротора)
- Отсутствие смазки, минимальное обслуживание
- Низкий уровень шума

Danfoss Turbocor Compressors

Прямой привод с магнитными подшипниками – не требует смазки и ухода

Частотно-регулируемый СД с ПМ
250-700 кВт

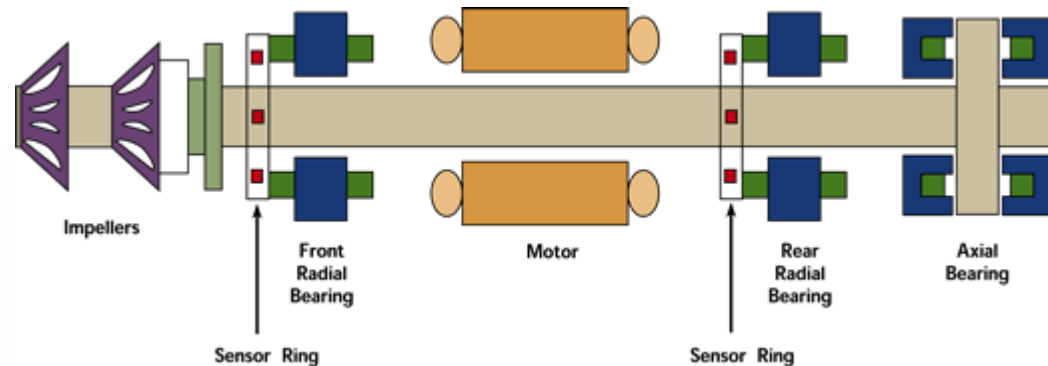


Высокоскоростные электрические машины

Компрессоры

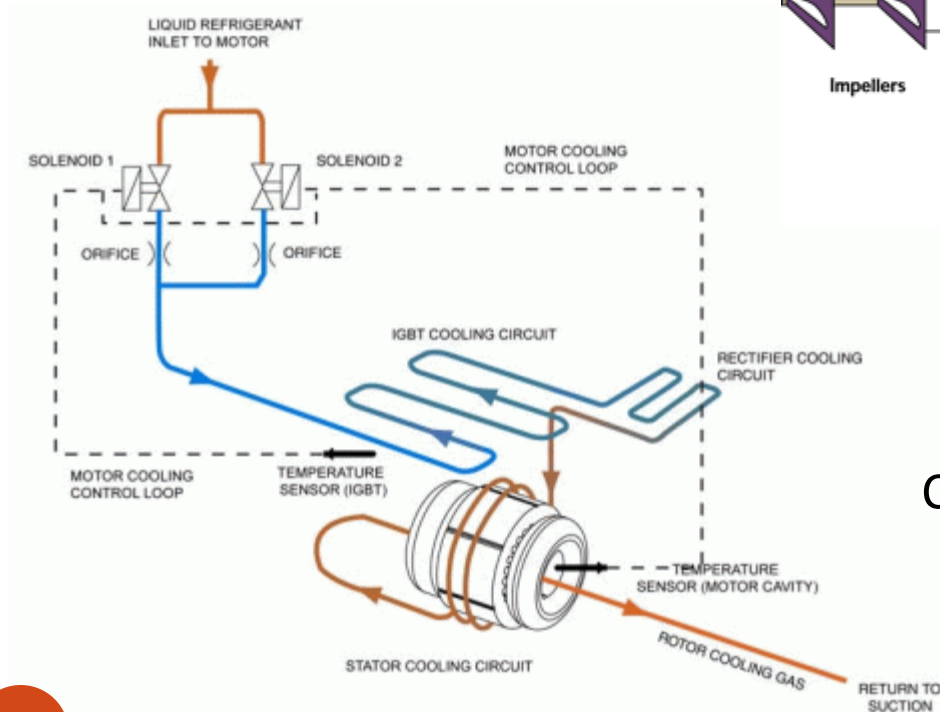
Магнитные подшипники с цифровым управлением по сигналам ДПР

- 2 радиальных / 1 аксиальный + карбоновый композитный упор при отключении питания



$n = 20-40$ тыс. об/мин

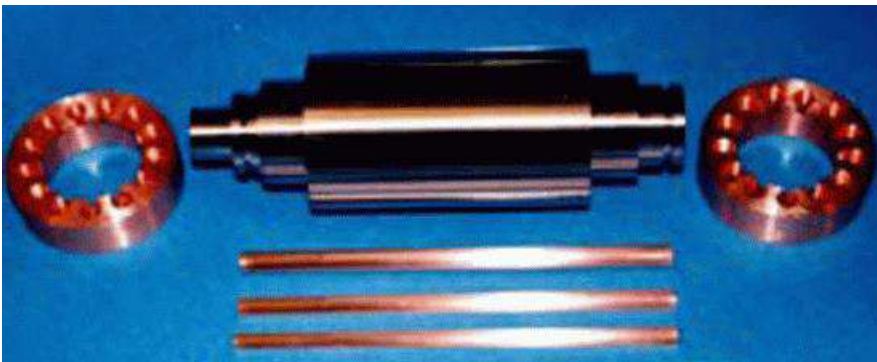
Система жидкостного охлаждения



Высокоскоростные электрические машины

Асинхронные двигатели

АД с КЗ ротором – на больших скоростях возникают проблемы с креплением стержней ротора



→ закрытые пазы,
особые КЗ кольца



Высокоскоростные электрические машины

Асинхронные двигатели

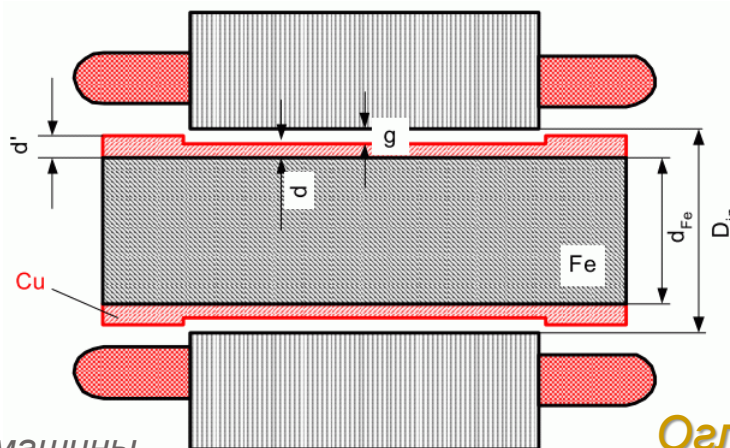
АД с массивным ротором – высокая механическая прочность, но меньше удельная мощность, КПД и $\cos\varphi$

Для минимизации недостатков:

- Материал ротора с малой магнитной проницаемостью и большой проводимостью
- Массивный ротор с дополнительной беличьей клеткой
- Многослойный ротор из магнито- и электропроводящего материалов



Массивный ротор с медным покрытием



Машины с высокой удельной МОЩНОСТЬЮ

Удельная мощность $kВт/кг$

Удельный момент $Н·м/кг$

В целях повышения удельной мощности разрабатывают новые виды ЭМ

- Машины с поперечным потоком
- Машины с дисковым ротором
- Машины с зубцовой обмоткой
- Машины с криогенным охлаждением

Машины с высокой удельной мощностью

Машины с поперечным потоком (Transverse Flux Machines)

Большая удельная мощность:

электромагнитная мощность $\sim A \cdot B_\delta$

при заданных J , B_δ и диаметре D_a можно увеличить $A \cdot B_\delta$ за счет p :

TFM имеют от 24 до 144 пар полюсов

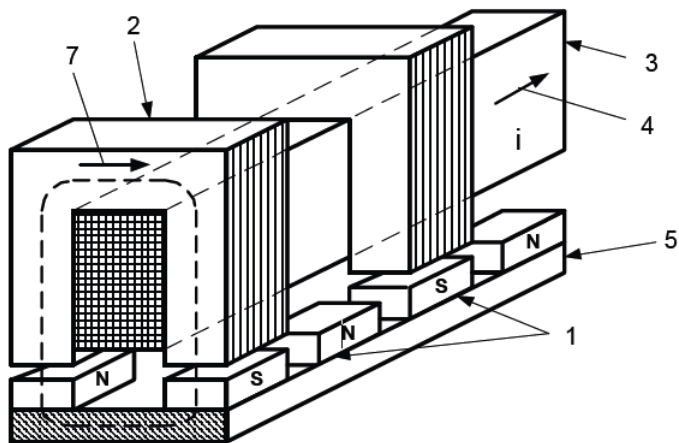
→ удельная мощность много больше, чем у традиционных ЭМ

Особенности конструкции

- простая конструкция обмотки (кольцевая обмотка)
- сложная конструкция сердечника (p сердечников)
- многополюсная машина → тихоходный двигатель / высокочастотный генератор

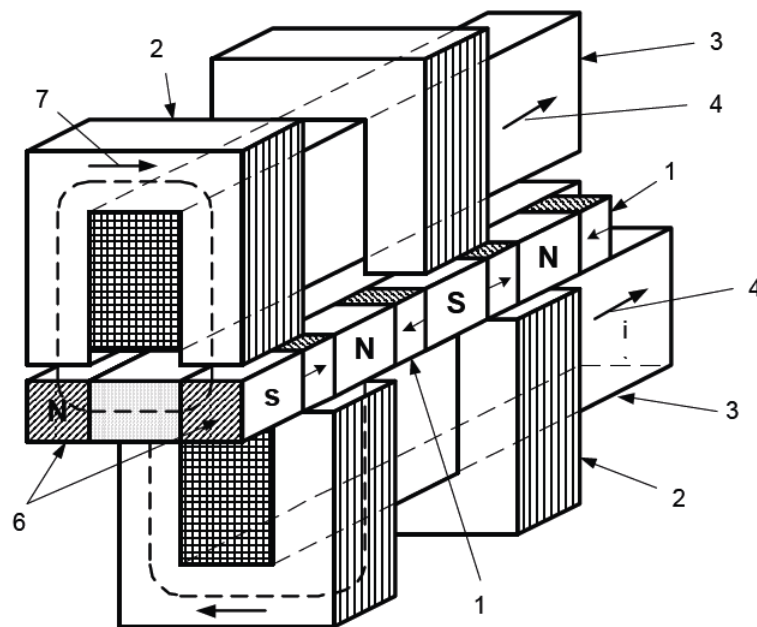
Машины с высокой удельной мощностью

Машины с поперечным потоком (Transverse Flux Machines)



односторонняя конструкция

- 1 – постоянные магниты
- 2 – сердечники статора
- 3 – обмотка статора
- 4 – ток статора
- 5 – ядро ротора
- 6 – полюсные наконечники
- 7 – магнитный поток

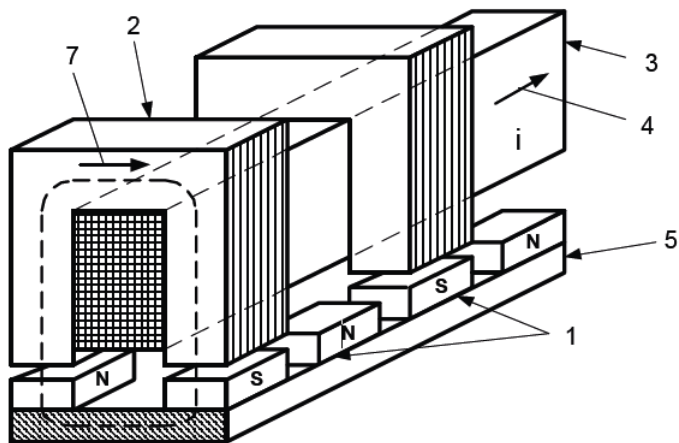


двусторонняя конструкция

Число ПМ на фазу равно $2p$

Машины с высокой удельной мощностью

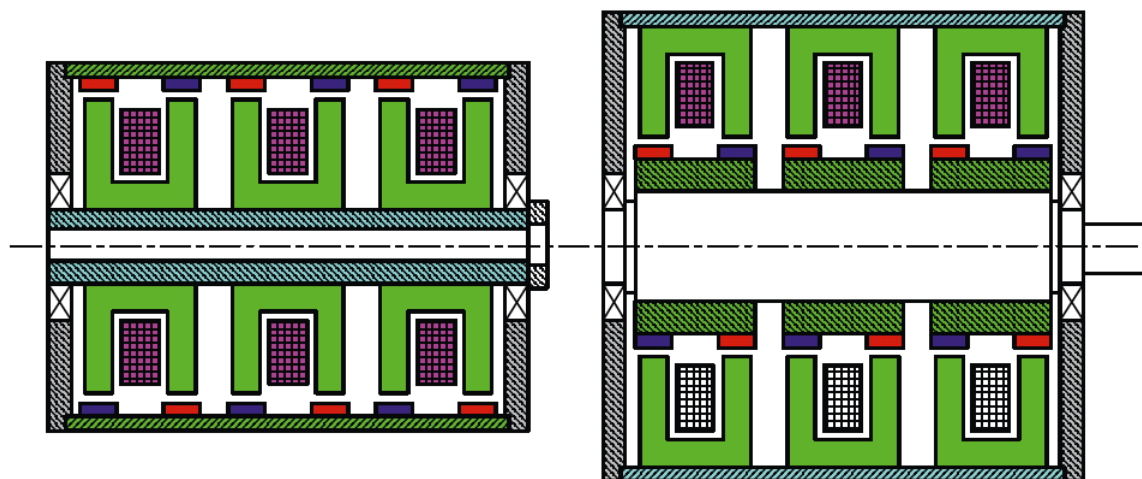
Машины с поперечным потоком (Transverse Flux Machines)



Принцип действия

Поток поперечен току и направлению вращения (моменту)

Многофазные двигатели состоят из однофазных модулей

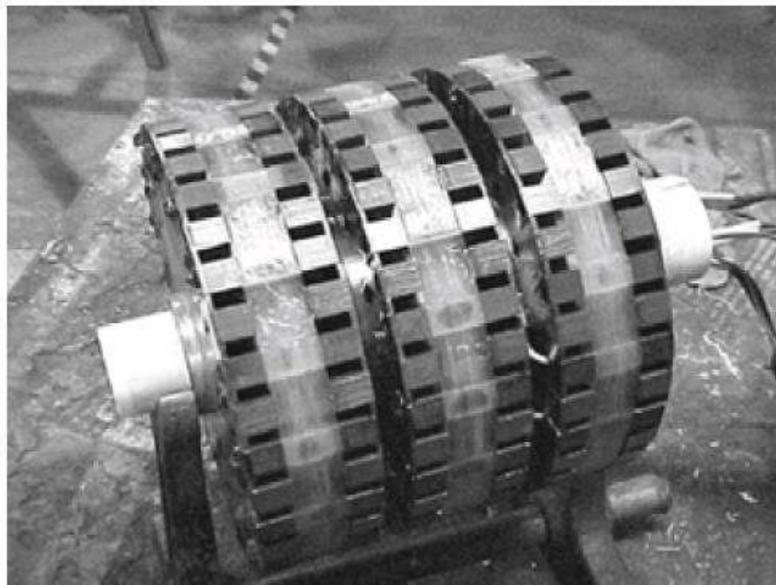


Внутренний статор
и внешний статор

Машины с высокой удельной мощностью

Машины с поперечным потоком (Transverse Flux Machines)

Пример: 3-фазный односторонний TFM мощностью 7,5 кВт и 600 об/мин ($\delta = 1$ мм, $D_a = 207$ мм)

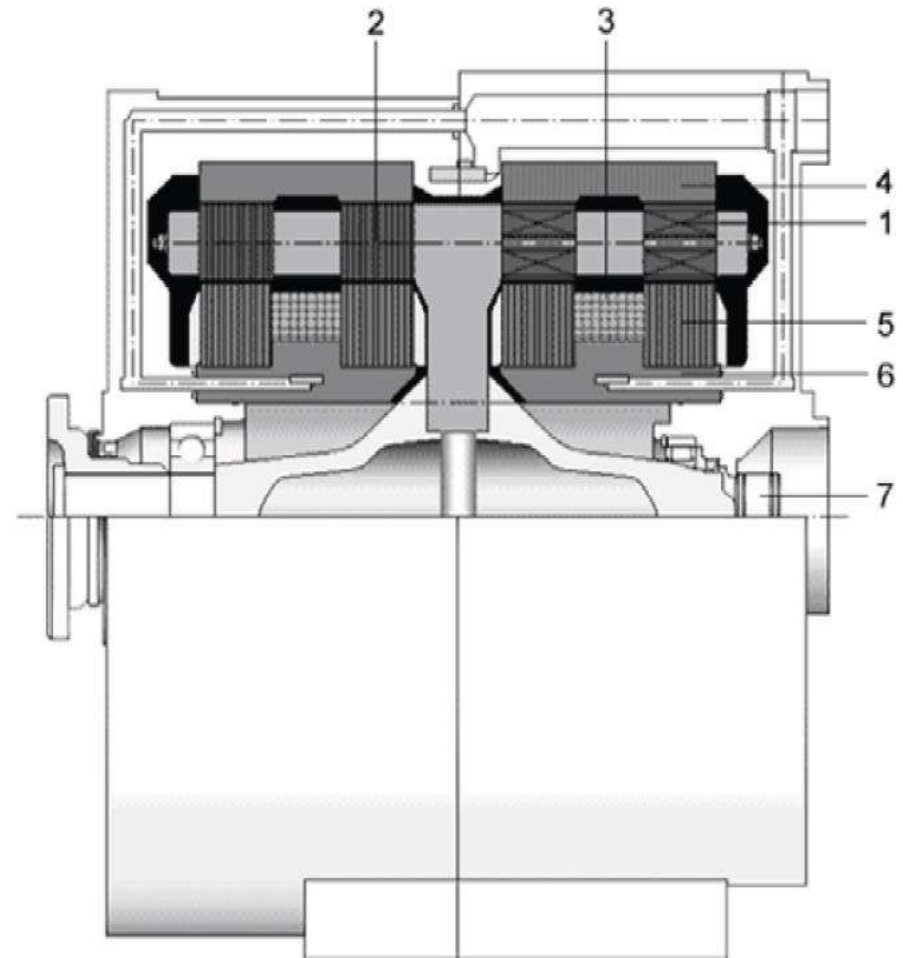


Машины с высокой удельной мощностью

Машины с поперечным потоком (Transverse Flux Machines)

Пример: 2-фазный TFM с водяным охлаждением для гибридного автобуса; мощностью 150 кВт, макс. скорость 2400 об/мин, ном. момент 1800 Н·м, макс. момент 2750 Н·м

- 1 – постоянные магниты
- 2 – шихтованные полюса ротора
- 3 – обмотка статора
- 4 – магнитомягкие ярма ротора
- 5 – шихтованные полюса статора
- 6 – магнитомягкие ярма статора
- 7 – датчик положения



Удельная мощность 0,8 кВт/кг

Машины с высокой удельной мощностью

Машины с поперечным потоком (Transverse Flux Machines)

Преимущества TFM (относительно бесконтактных СДПМ):

- Лучшее использование активных материалов → выше удельный момент или мощность
- Меньше объем проводников и стали при той же величине момента
- Простая и дешевая конструкция обмотки статора, нет лобовых частей и лишних соединений
- Обмоточный коэффициент = 1
- Чем больше полюсов, тем выше плотность момента и коэффициент мощности, меньше амплитуда пульсаций момента
- Многофазный двигатель собирается из одинаковых однофазных модулей
- Трехфазный TFM можно питать от стандартного инвертора с обычным датчиком положения
- Двигатель может быть тихоходным, генератор - высокочастотным

Машины с высокой удельной мощностью

Машины с поперечным потоком (Transverse Flux Machines)

Проблемы при создании TFM:

- Сложная конструкция ротора: содержит множество магнитов
- Статор и ротор имеют явно выраженные полюса и в каждом свой поперечный поток → надо следить за направлением шихтовки (радиальная шихтовка местами оказывается поперек потока, лучше использовать металлокерамику или гибридный сердечник)
- Объем постоянных магнитов больше, чем в обычном СДПМ
- Коэффициент мощности снижается при возрастании нагрузки и приходится применять средства его повышения
- Так как число полюсов статора равно числу магнитов на роторе, надо бороться с залипанием ротора

Машины с высокой удельной мощностью

Машины с дисковым ротором

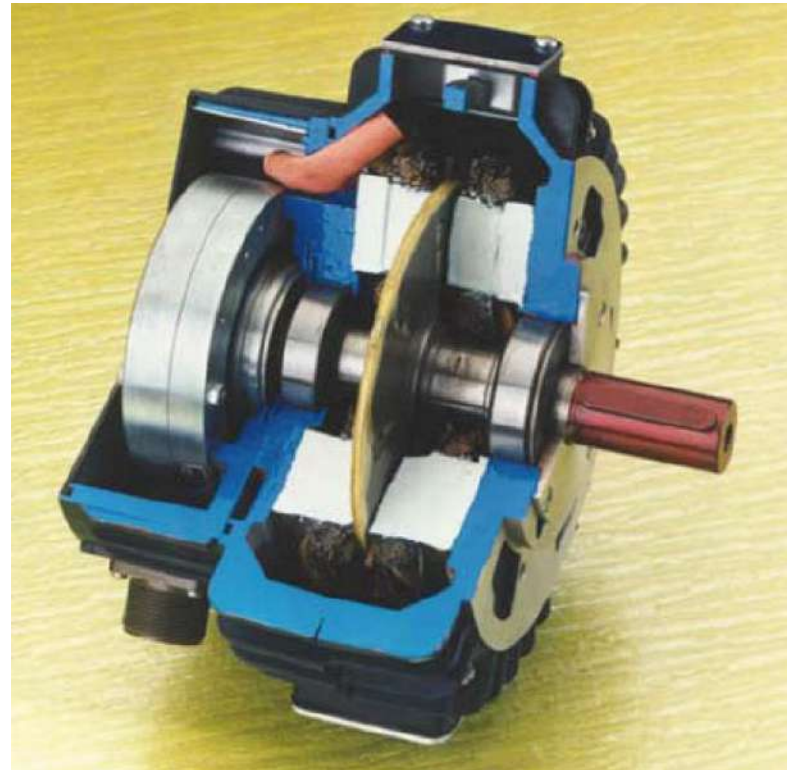
При плоских статоре и роторе магнитный поток пересекает зазор в аксиальном направлении

Обмотка статора

Полюса и ярмо статора

ПМ на роторе

Пример: двусторонний дисковый двигатель с ПМ и ферромагнитным сердечником статора

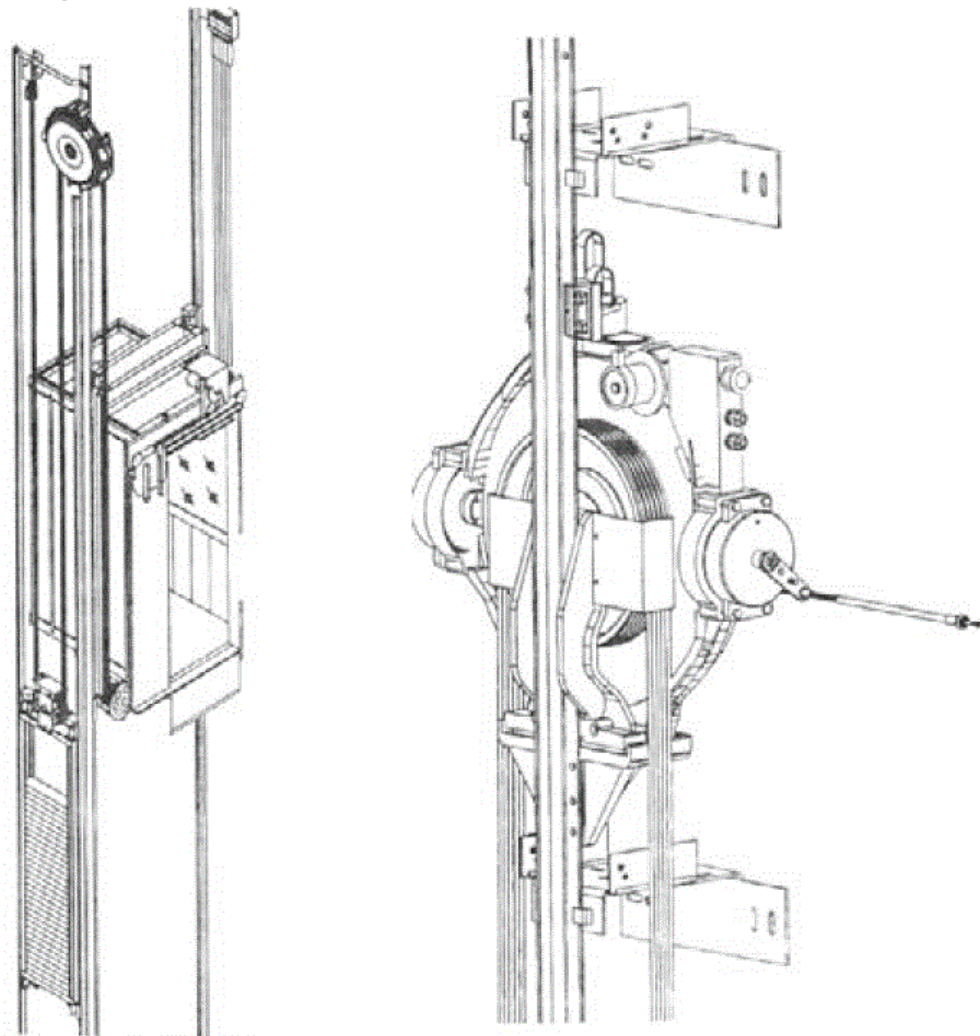


Пример: дисковый двигатель с ПМ мощностью 750 кВт, 3600 об/мин с жидкостным охлаждением (производитель DRS) имеет удельную мощность 2,2 кВт/кг.

Машины с высокой удельной мощностью

Машины с дисковым ротором

Плоские системы можно
встраивать в колесо или
использовать в
безредукторных лифтах



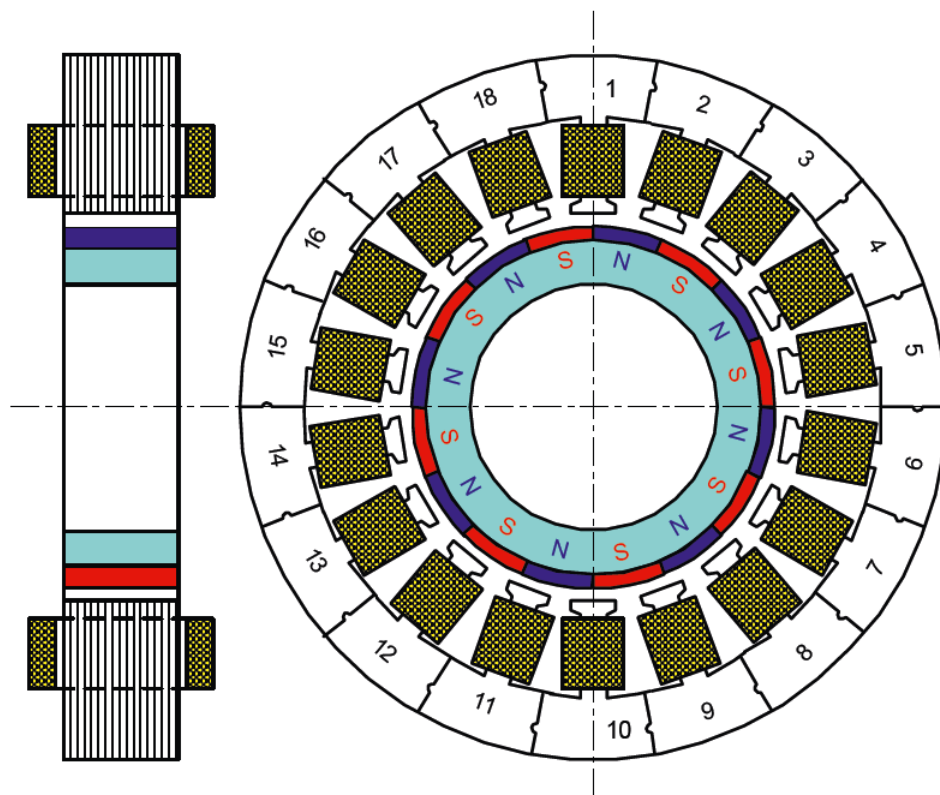
Машины с высокой удельной мощностью

Машины с зубцовой обмоткой

Зубцовая обмотка: сосредоточенные катушки вокруг отдельных зубцов (аналогично обмоткам возбуждения на полюсах)

Малые лобовые части:

- экономия меди
- снижение электрических потерь
- уменьшение полной длины машины
- коэффициент распределения однослойной обмотки = 1
- Высокий коэффициент заполнения паза

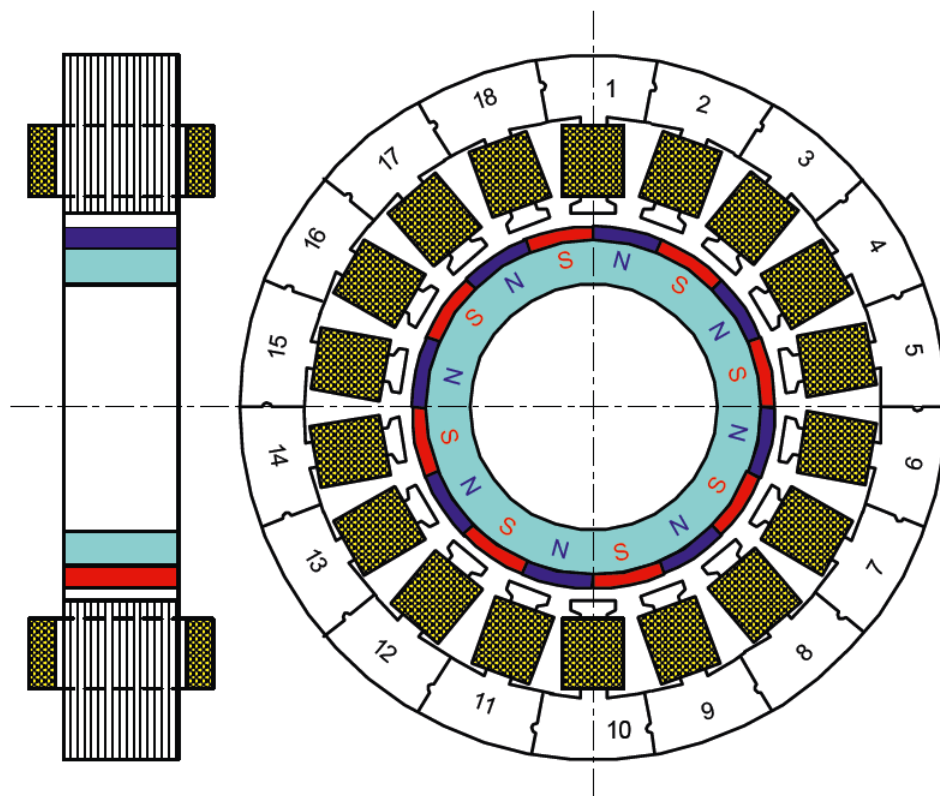


Машины с высокой удельной мощностью

Машины с зубцовой обмоткой

Возможно построение обмоток с дробным $q < 1$

При этом в зазоре – большое число гармоник, включая субгармоники → добавочные потери, пульсации момента



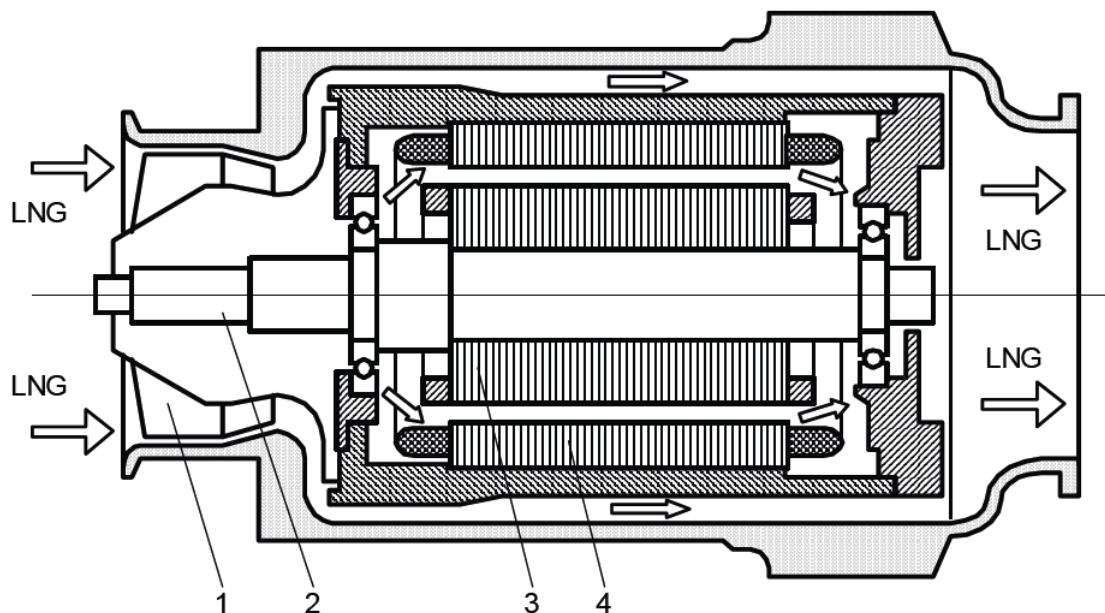
Машины с высокой удельной мощностью

Машины с криогенным охлаждением

Система перекачивания сжиженного газа – насос с погружным АД

Температура жидкого газа 112K (-161°C), он же – хладагент

Масса активных материалов – вдвое меньше традиционного АД



LNG – Liquid Natural Gas

1 – насос

2 – вал

3 – ротор

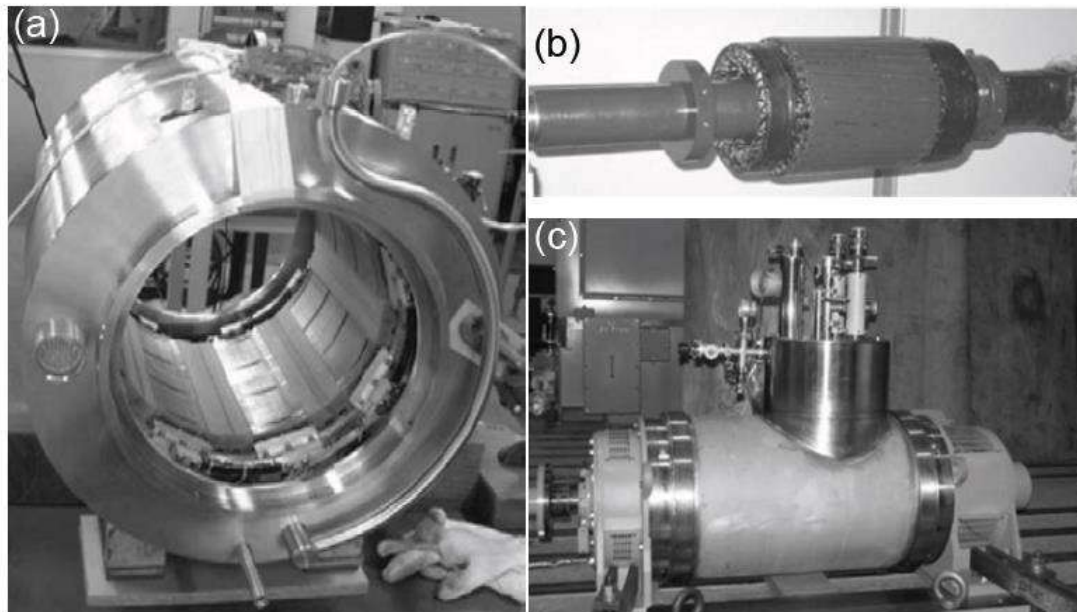
4 – статор

Машины с высокой удельной мощностью

Машины с криогенным охлаждением

Криогенное охлаждение позволяет использовать высокотемпературные сверхпроводники → большая плотность тока, отсутствие потерь

Пример: СМ с ВТСП возбуждением на статоре и вращающимся якорем: 15 кВт, 360 об/мин, $2p=4$ при $f=24$ Гц. Ток якоря 32 А, ток возбуждения 280 А



Новые типы электрических машин

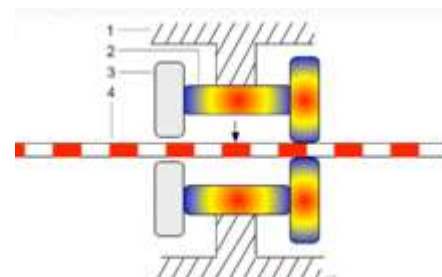
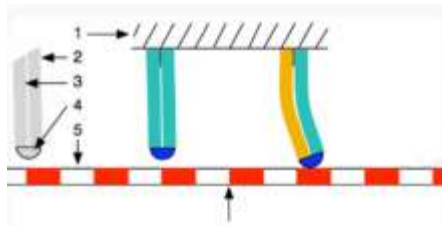
По книге J.F.Gieras “Advancements in Electric Machines”

Разработка новых типов или разновидностей ЭМ связана с развитием технологии

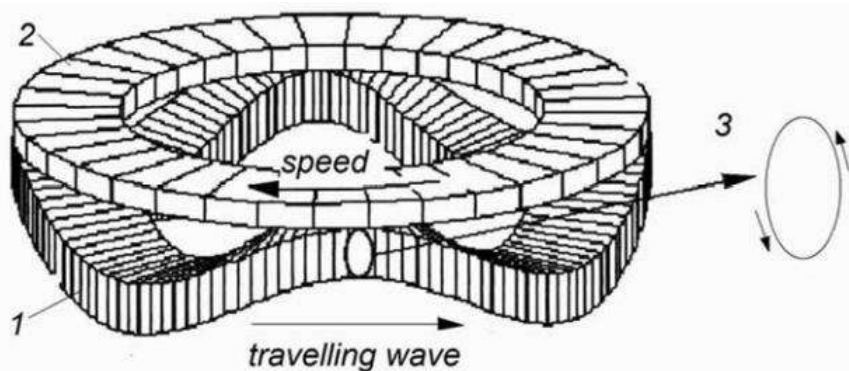
- Пьезоэлектрические двигатели
- Гистерезисные двигатели с подмагничиванием (written pole)
- Безопорные двигатели
- Беспазовые двигатели
- Двигатели без сердечника (торцевые, цилиндрические)
- Интегрированный стартер-генератор
- Мехатронные модули (интегрированный электропривод)

Пьезоэлектрические двигатели (ультразвуковые)

Пьезоэлектрический эффект: удлинение, искривление, создание бегущей волны при последовательном возбуждении



Вращающийся тихоходный двигатель: электроды статора (1) подключены к 2-фазному инвертору с частотой >20 кГц; ротор (2) лежит на статоре и движется против волны деформации за счет сил трения;
3 – траектория элемента поверхности



Пьезоэлектрические двигатели (ультразвуковые)

Применение: автофокус в фотоаппарате, шторы, часы, устройства точного позиционирования, электробритвы, потребительская электроника, привод роботов

Достоинства:

- высокий КПД
- большой удельный момент
- малая частота вращения без применения редукторов
- удержание ротора силами трения после отключения питания
- простая конструкция
- бесшумная работа

Недостатки:

- требуется высокочастотный блок питания
- изнашиваются трущиеся поверхности
- малый диапазон перемещений



Гистерезисные двигатели с подмагничиванием (written pole)

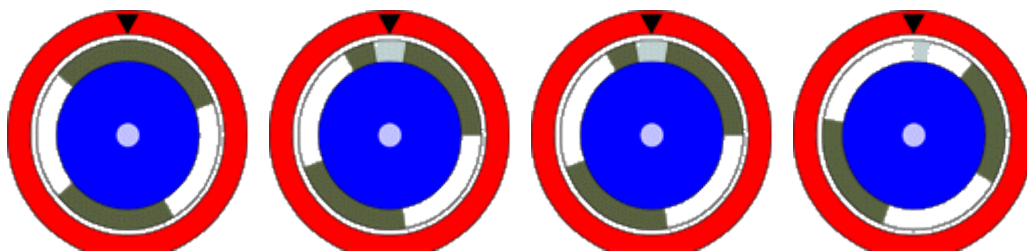
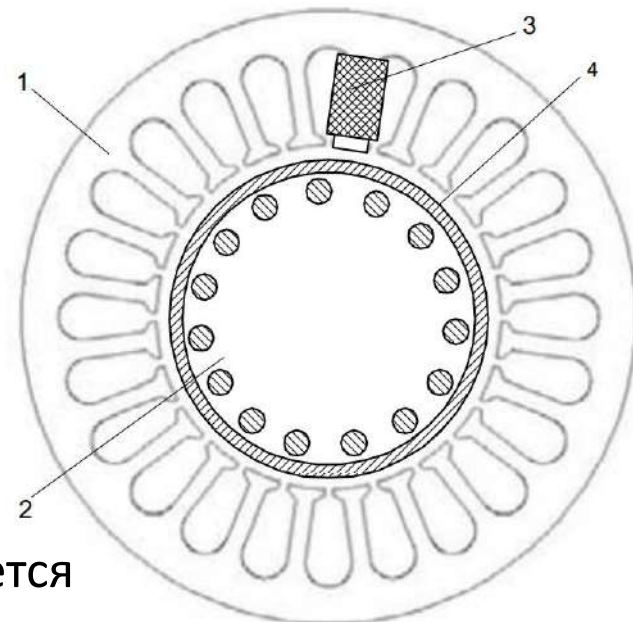
На статоре (1) – традиционная распределенная обмотка
+ сосредоточенная обмотка возбуждения (3)

На роторе (2) – «беличья клетка» с большим R_2
+ слой гистерезисного материала (4)

При пуске – асинхронный момент (линейный
из-за большого R_2) + гистерезисный момент

При $s = 0$ – только синхронный момент («беличья
клетка» не работает)

При s от 0,2 до 0 – обмотка возбуждения включается
на f сети, «прописывая» на роторе рисунок полюсов
→ синхронный момент на подсинхронной скорости
из-за дробного числа полюсов

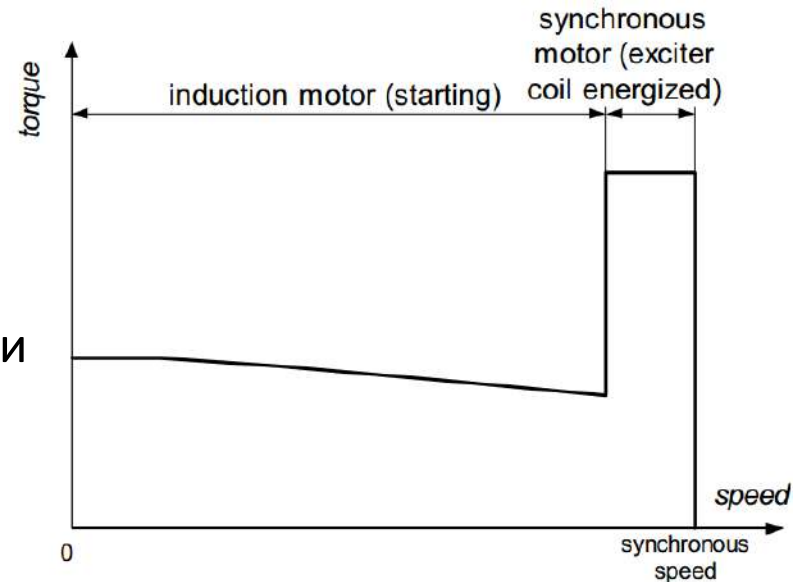


Гистерезисные двигатели с подмагничиванием (written pole)

- Хорошие пусковые свойства (большой момент, малый пусковой ток)
- Высокий КПД (как в машине с ПМ)
- Годится для тяжелых условий пуска
- Нечувствителен к перепадам U_1
- Допускает перерыв в питании до 15 с.

Precise Power Corporation выпускает двигатели от 7,5 до 75 кВт

Применяется в сельских сетях, на удаленных объектах с плохим качеством эл.энергии



Двигатель-генератор с ротором-маховиком используют для улучшения качества энергии: не пропускает высшие гармоники из сети, сглаживает колебания напряжения, выдерживает кратковременные отключения

Применяется в дата-центрах, промышленной автоматике, медицине и здравоохранении

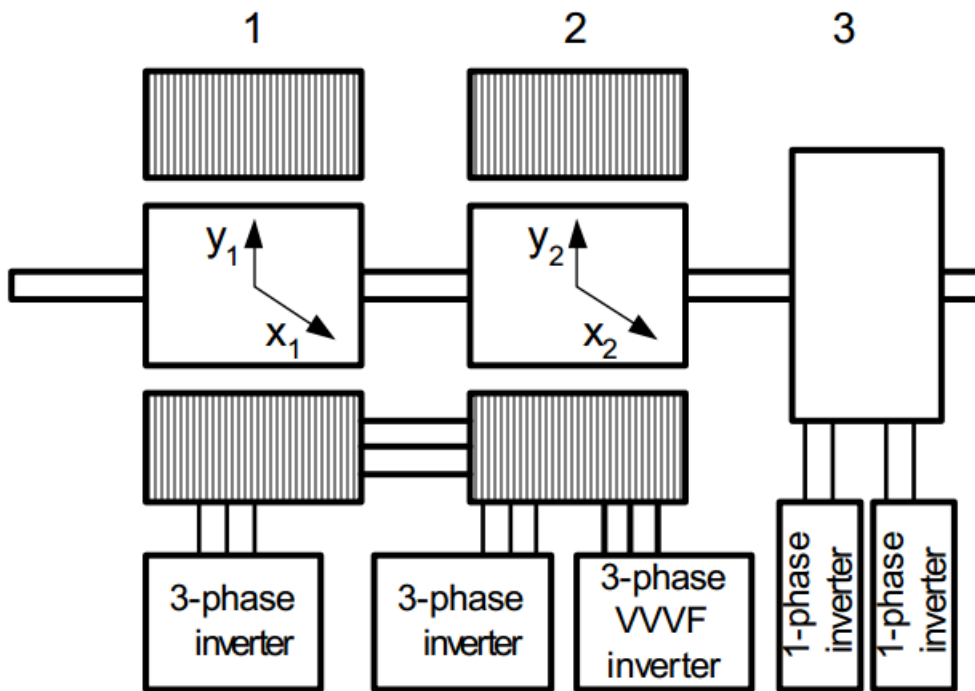
Безопорные двигатели

Радиальные магнитные опоры встроены в ротор → компактная конструкция с жестким валом

2 ротора создают вращающий момент и радиальные усилия опор в x_1y_1 и x_2y_2

2 статора имеют общую обмотку и независимые обмотки подвеса

ЭМ также имеет осевой магнитный подвес

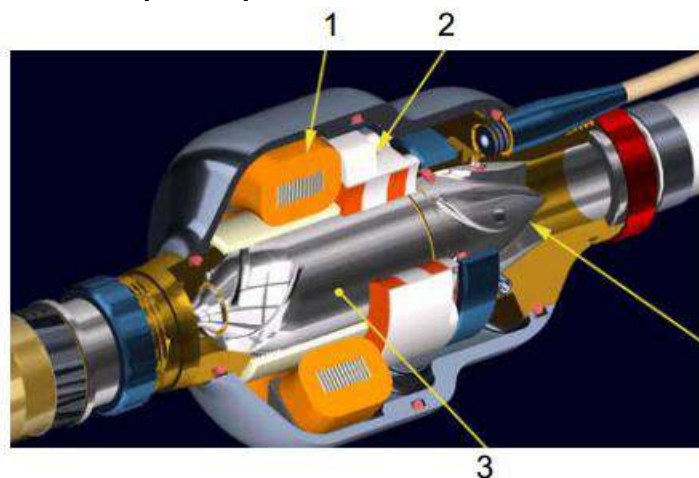


Система управления с обратными связями обеспечивает независимое управление 2 радиальными опорами и осевой опорой

Безопорные двигатели

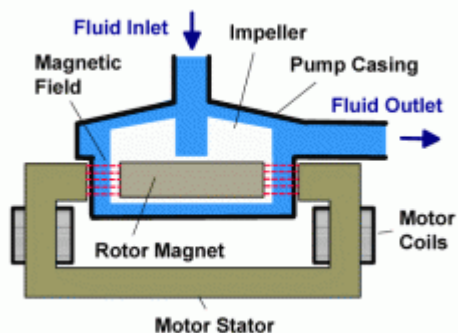
Другое применение – герметичные двигатели: ротор в агрессивной либо стерильной среде (уплотнения подшипника – риск утечки)

Blood pump *Streamliner*



- 1 – обмотка статора
- 2 – обмотка подвеса
- 3 – ротор
- 4 – пропеллер

Blood pump *Levitronix*



Турбомолекулярный насос
(для высокого вакуума)



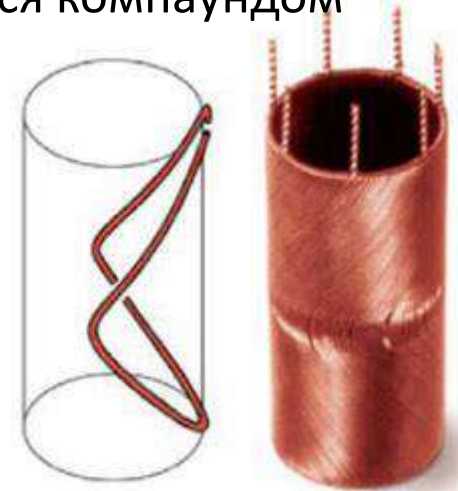
Беспазовые двигатели

Обмотка якоря размещается поверх ярма и фиксируется компаундом

Отсутствие зубцов:

- уменьшение высших гармонических поля в зазоре
- снижение пульсаций момента
- снижение шума
- уменьшение индуктивности статора
- снижение поверхностных / пульсационных потерь
- уменьшение массы стали и потерь в стали

- увеличение немагнитного зазора
- увеличение реактивного тока и эл.потерь
- либо увеличение толщины ПМ и стоимости

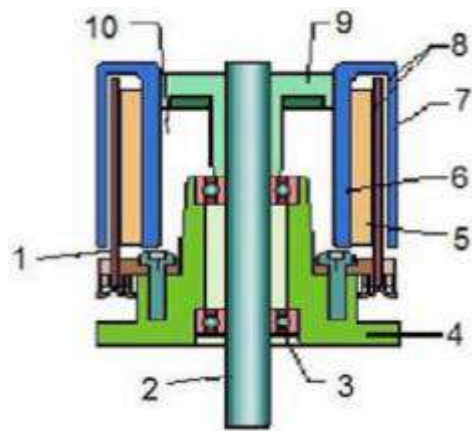
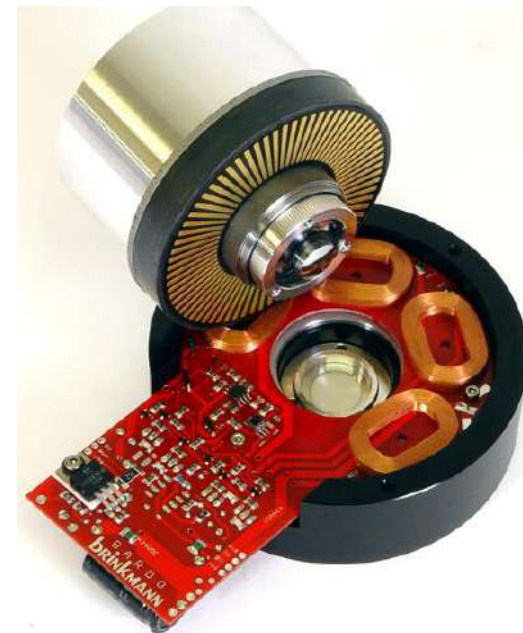


Двигатели без сердечника (торцевые, цилиндрические)

Отсутствует сердечник ротора: ПМ образуют массив Хальбах либо ротор с ПМ расположен между дисковыми статорами

Отсутствует сердечник статора

- малая масса двигателя
 - отсутствуют потери в стали
 - высокий КПД
 - нет пульсаций момента
 - нет сил магнитного тяжения
- (идеально для «солнечного» транспорта)



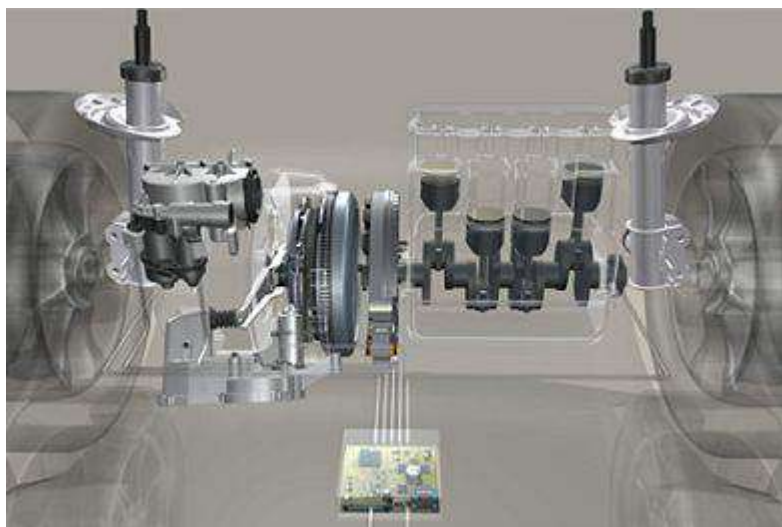
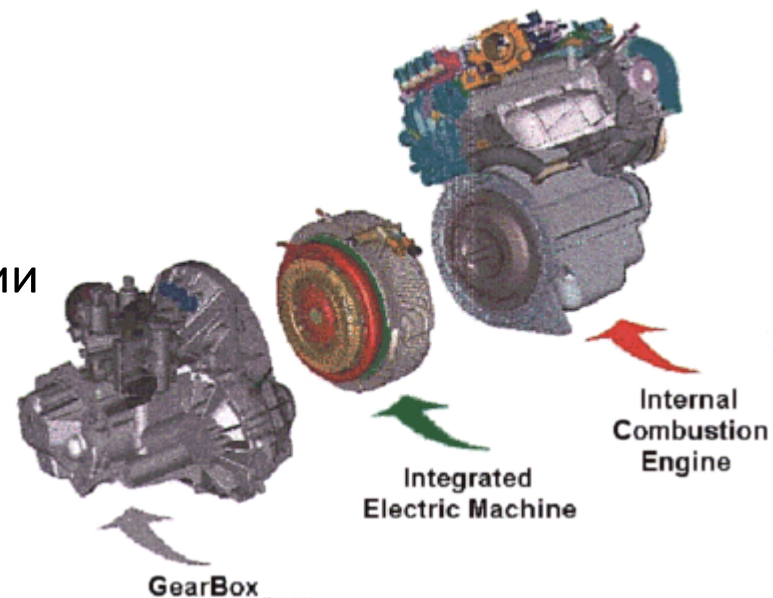
- 1 – обмотка статора
- 2 – вал
- 3 – подшипник
- 4 – опора
- 5 – ПМ
- 6,7 – сердечник ротора
- 8 – зазор
- 9 – втулка ротора
- 10 – свободное пространство



Интегрированный стартер-генератор

Объединяет стартер, генератор и маховик

- запуск ДВС
- автоматический старт-стоп
- дополнительная мощность при ускорении
- регенеративное торможение
- дополнительная эл.мощность
- заряд батарей



Мехатронные модули (интегрированный электропривод)

Двигатель, силовая электроника, датчики положения, скорости и тока, контроллер, система защиты, коммуникационная интегральная схема

- «все-в-одном» – минимум подключений, простая установка
- нет падения U между конвертором и двигателем
- нет проблем с совместимостью оборудования

