

лабораторная работа №4 (часть 2)  
**История развития электротехники.  
Изобретение и становление многофазных систем.**

**Цель работы:** знакомство с историей изобретения многофазных систем, с творческим путем наиболее выдающихся ученых и инженеров, внесших вклад в открытие вращающегося магнитного поля, изобретение асинхронного двигателя, способов получения многофазных систем.



Основные этапы изучения  
электрических и магнитных явлений,  
разработки  
электротехнических устройств

Контрольные вопросы

Ученые, исследовавшие  
электричество и магнетизм,  
электротехники, изобретатели,  
конструкторы  
электротехнических устройств

Использованная литература

Завершение работы

# Основные этапы изучения электрических и магнитных явлений, разработки электротехнических устройств

1. Открытие вращающегося магнитного поля  
и создание асинхронного электродвигателя

2. Разработка  
трехфазной системы  
и трехфазных асинхронных двигателей

3. Развитие электрического привода

4. Начало применения  
электроэнергии на транспорте

5. Первая трехфазная сеть

6. Становление трехфазных систем

7. Возникновение районных электростанций

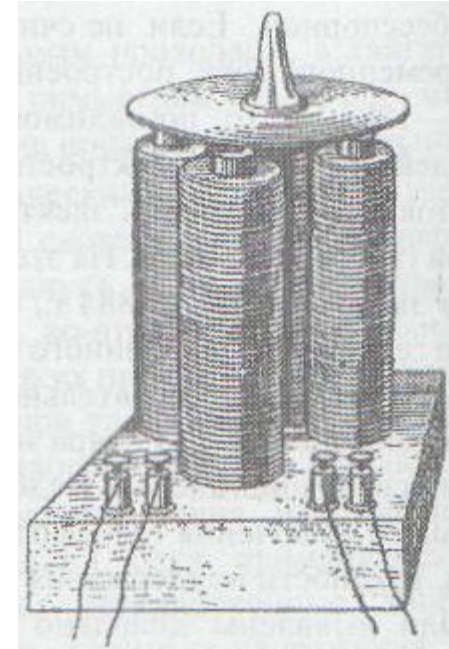
8. Появление энергетических систем



# 1. Открытие вращающегося магнитного поля и создание асинхронного электродвигателя

Над созданием двигателя переменного тока несколько лет работали ряд ученых. В 1879 г. английский ученый Уолтер Бейли сконструировал прибор, в котором пространственное перемещение магнитного поля осуществлялось с помощью неподвижного устройства — путем поочередного намагничивания четырех расположенных по окружности электромагнитов. Намагничивание производилось импульсами постоянного тока, посылаемыми в обмотки электромагнитов специально приспособленным для этого коммутатором. Полярность верхних концов стержней изменялась в определенной последовательности так, что магнитный поток изменял свое направление в пространстве на  $360^\circ$ . Над полюсами электромагнита, как и в опытах Д.Ф. Араго, был подвешен медный диск. У. Бейли указывал, что при бесконечно большом числе электромагнитов можно было бы обеспечить равномерное вращение магнитного поля.

Прибор У. Бейли не нашел никакого применения, но был связующим звеном между опытом Д.Ф. Араго и более поздними исследованиями



*Прибор Бейли*



# 1. Открытие вращающегося магнитного поля и создание асинхронного электродвигателя

Первым этапом в создании двигателя переменного тока стало открытие вращающегося магнитного поля. Над этим работали Марсель Дебре, американский ученый Илайю Томсон (1853—1937 гг.), американский электротехник Чарльз Бредли, немецкий инженер Фредерик Хазельвандер (1859—1932 гг.) и др.

Исчерпывающие и получившие наибольшую известность экспериментальные и теоретические исследования вращающегося магнитного поля выполнили независимо друг от друга выдающиеся ученые итальянец [Галилео Феррарис](#) Исчерпывающие и получившие наибольшую известность экспериментальные и теоретические исследования вращающегося магнитного поля выполнили независимо друг от друга выдающиеся ученые итальянец Галилео Феррарис (1847—1897 гг.) и серб [Никола Тесла](#) (1856—1943 гг.).

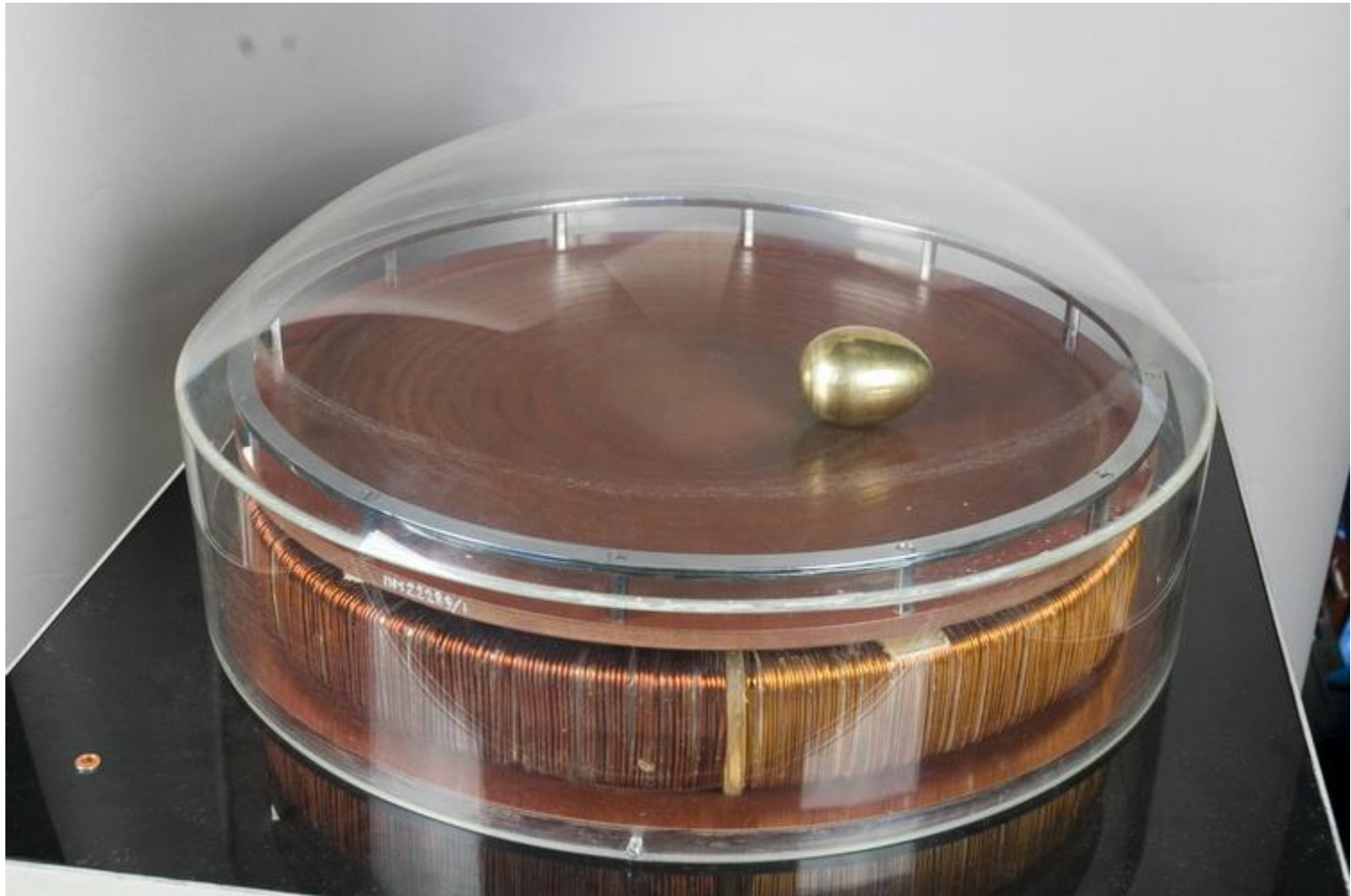
Г. Феррарис утверждал, что [суть явления вращающегося магнитного поля](#) Г. Феррарис утверждал, что суть явления вращающегося магнитного поля он осознал еще в 1885 г., но доклад «Электродинамическое вращение, произведенное с помощью переменных токов» он сделал в Туринской академии (членом которой он состоял с 1880 г.) 18 марта 1888 г. Перевод доклада Г. Феррариса в английском журнале попал в свое время в руки [М.О. Доливо-Добровольскому](#) и вызвал первый импульс в серии последующих замечательных изобретений.

Н. Тесла в своей автобиографии рассказывал, что идея двухфазного асинхронного двигателя родилась у него еще в 1882 г., когда он работал в Будапештской телеграфной компании. Шесть лет спустя, 16 мая 1888 г. на конференции в американском Институте инженеров он сделал доклад, т.е. на два месяца позднее доклада Г. Феррариса, но первую заявку на получение патента на многофазные системы Н. Тесла подал еще 12 октября 1887 г., т.е. ранее выступления Г. Феррариса. Н. Тесла, один из самых известных и плодовитых ученых в области электротехники, начинавший свою научную карьеру в 80-х годах XIX в., получил только в области многофазных систем 41 патент. Некоторое время Н. Тесла работал в Эдисоновской компании в Париже (1882—1884 гг.), а затем переехал в США. В 1888 г. все свои патенты по многофазным системам Н. Тесла продал главе известной фирмы Д. Вестингаузу, который в своих планах развития техники переменного тока сделал ставку на работы Н. Теслы. Впоследствии Н. Тесла много внимания уделял технике высоких частот (трансформатор Теслы) и идее передачи электроэнергии без проводов. Интересная деталь: при решении вопроса о стандартизации промышленной частоты, а диапазон предложений был от 25 до 133 Гц, Н. Тесла решительно высказался за принятую им для своих опытных установок частоту 60 Гц. Первоначально инженеры Вестингауза от предложения Н. Теслы отказались, но вскоре именно эта частота была принята в США в качестве стандартной.

В патентах Н. Теслы были описаны различные варианты многофазных систем. В отличие от Г. Феррариса Н. Тесла полагал, что [токи следует получать от многофазных источников](#), а не пользоваться фазосмещающими устройствами. Утверждая, что двухфазная система, являясь минимальным вариантом системы многофазной, окажется и наиболее экономичной, Н. Тесла, а вслед за ним и фирма «Вестингауз», основное внимание сосредоточили именно на этой системе. Однако встретившиеся экономические и технические трудности задерживали внедрение двухфазной системы в практику. Фирма «Вестингауз» построила несколько станций по этой системе, из которых наибольшей по массе была Ниагарская гидроэлектростанция.



# 1. Открытие вращающегося магнитного поля и создание асинхронного электродвигателя



*Установка для демонстрации образования вращающегося магнитного поля по системе Тесла. Дар Николы Теслы Политехническому музею*

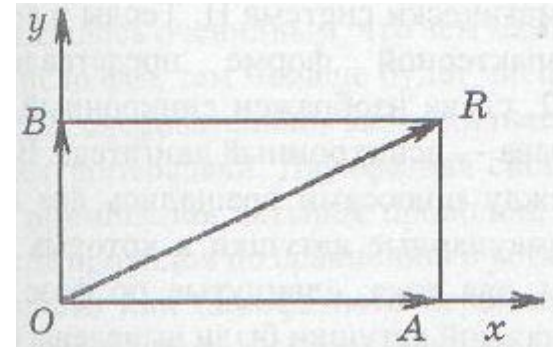


# Открытие вращающегося магнитного поля Феррарисом. Двигатель Феррариса (дополнительная информация)

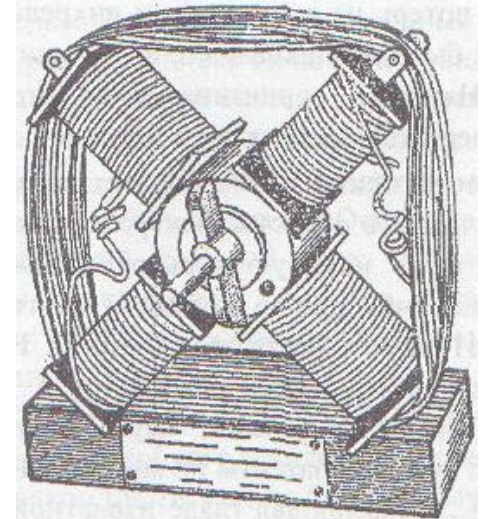
Г. Феррарис умел в очень ясной форме объяснять трудные физические процессы. Вот как им было объяснено явление вращающегося магнитного поля. Рассмотрим показанную на пространственную диаграмму, на которой ось  $x$  представляет собой положительное направление вектора магнитной индукции, создаваемой одной из катушек, а ось  $y$  — положительное направление поля другой катушки. Для момента времени, когда одна магнитная индукция в точке  $O$  изображается отрезком  $OA$ , а другая —  $OB$ , суммарная результирующая магнитная индукция изобразится отрезком  $OR$ . При изменении  $OA$  и  $OB$  точка  $R$  перемещается по кривой, форма которой определяется законами изменений во времени двух полей. Если две напряженности магнитного поля имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты по фазе на четверть периода, то геометрическим местом точки  $R$  станет окружность. Налицо вращение магнитного поля. Если фазу одной из напряженностей магнитного поля или возбуждающего его тока изменить на  $180^\circ$ , то изменится и направление вращения результирующего магнитного поля. Если поместить в это магнитное поле снабженный валом и подшипниками медный цилиндр, то он будет вращаться. Позднее асинхронные двигатели с полым ротором в виде медного стакана получили название двигателей Феррариса.

Но как получить два переменных тока, сдвинутых один относительно другого по фазе? Г. Феррарис предложил метод «расщепления фаз», при котором искусственным путем создавался сдвиг по фазе при включении в цепь двух взаимно перпендикулярно расположенных катушек фазосмещающих устройств. На рис. показан внешний вид модели двухфазного асинхронного двигателя, хранящейся в музее г. Турина, директором которого до конца жизни был Г. Феррарис.

Г. Феррарисом был сделан существенный вклад в теорию переменных токов. В 1886 г. в своем труде «О разности фаз у токов, о запаздывании вследствие индукции и о потерях в трансформаторе» он впервые рассматривает разность фаз токов в первичной и вторичной обмотках трансформаторов, а также дает методы расчета потерь на гистерезис и вихревые токи. В 1898 г. был опубликован его фундаментальный труд «Научные основания электротехники», вскоре переведенный на русский язык.



*К пояснению открытия Феррариса*



*Модель двигателя Феррариса*



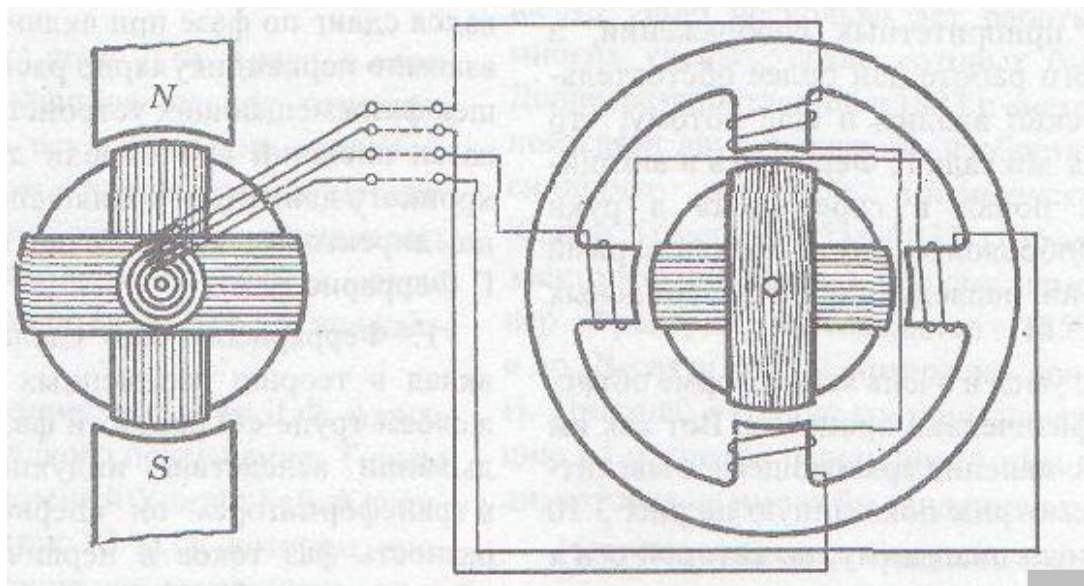


# Двухфазная система и асинхронный двигатель Н. Tesla. (дополнительная информация)

Схематически система [Н. Теслы](#) представлена на рис. слева изображен синхронный генератор, справа — асинхронный двигатель. В генераторе между полюсами вращались две взаимно перпендикулярные катушки в которых генерировались два тока, сдвинутые по фазе на  $90^\circ$ . Концы каждой катушки были выведены на кольца, расположенные на валу генератора (на чертеже для ясности эти кольца имеют различные диаметры). Ротор двигателя имел обмотку в виде двух расположенных под прямым углом одна к другой замкнутых на себя катушек.

Конструкция двигателя оказалась неудачной, что сказалось на его характеристиках и пусковых свойствах. Неудачным оказался и выбор двухфазной системы токов из всех возможных многофазных систем. Известно, что значительную долю стоимости установки для передачи электроэнергии составляют затраты на линейные сооружения и, в частности, на линейные провода. В связи с этим казалось очевидным, что чем меньше принятое число фаз, тем меньше будет число проводов и тем, следовательно, экономичнее устройство электропередачи. Двухфазная система требовала применения четырех проводов, а удвоение числа проводов по сравнению с установками постоянного или однофазного переменного токов представлялось нежелательным. Поэтому Н. Тесла предлагал в некоторых случаях применять в двухфазной системе трехпроводную линию, т.е. делать один провод общим. В этом случае число проводов уменьшалось до трех. Однако расход металла на провода при этом снижался меньше, чем можно было ожидать, так как сечение общего провода должно было быть примерно в 1,5 раза (точнее, в  $\sqrt{2}$  раз) больше сечения каждого из ~~двух~~ других проводов.

*Конструктивные схемы генератора и двигателя Н.Тесла*





**2. Разработка трехфазной системы и трехфазных асинхронных двигателей**  
В разработке трехфазной системы и трехфазных асинхронных двигателей была разработана более совершенная электрическая система — трехфазная.

Наибольших успехов в развитии многофазных систем добился [Михаил Осипович Доливо-Добровольский](#), который сумел придать своим работам практический характер. Поэтому он по праву считается основоположником техники трехфазных систем.

М.О. Доливо-Добровольский изобрел [трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым фазным ротором](#) М.О. Доливо-Добровольский изобрел трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым и [фазным ротором](#) М.О. Доливо-Добровольский изобрел трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым и фазным ротором, [трехфазный трансформатор](#) М.О. Доливо-Добровольский изобрел трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым и фазным ротором, предложил [способ получения трехфазной системы](#) М.О. Доливо-Добровольский изобрел трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым и фазным ротором, трехфазный трансформатор, предложил [способ получения трехфазной системы](#) и обосновал [преимущества трехфазной системы](#) по сравнению с двухфазной

В 80—90-х годах XIX в. значительное место в электропотреблении занимала осветительная нагрузка, которая часто вносила существенную несимметрию в систему. Кроме того, иногда потребителю было желательно иметь в своем распоряжении не одно, а два напряжения: одно — для осветительной нагрузки, другое, повышенное, — для силовой.

Чтобы можно было регулировать напряжение в отдельных фазах и располагать двумя напряжениями в системе (фазным и линейным), М.О. Доливо-Добровольский разработал в 1890 г. четырехпроводную схему трехфазной цепи, или, иначе, систему с нейтральным проводом. Одновременно он указал, что вместо нейтрального, или нулевого, провода можно использовать землю.

Таким образом, в течение 2—3 лет были конструктивно разработаны все основные элементы трехфазной системы электроснабжения; трансформатор, трехпроводная и четырехпроводная линии передачи и асинхронный двигатель в двух его основных модификациях (с фазным и короткозамкнутым ротором). Из всех возможных конструкций многофазных синхронных генераторов, принцип построения которых был уже известен, получили широкое применение только трехфазные машины. Так зародилась и подучила свое начальное развитие трехфазная система электрического тока. Решающую роль в ее зарождении и развитии сыграли труды М.О. Доливо-Добровольского.

М.О. Доливо-Добровольский рекомендовал принять в качестве основной формы кривой тока синусоиду. В отношении частоты тока он высказался за 30—40 Гц. Позднее в результате критического отбора получили применение лишь две частоты промышленного тока: 60 Гц в США и 50 Гц в других странах. Эти частоты оказались оптимальными, ибо повышение частоты ведет к чрезмерному возрастанию частоты вращения электрических машин (при том же числе полюсов), а ее снижение неблагоприятно сказывается на равномерности освещения.

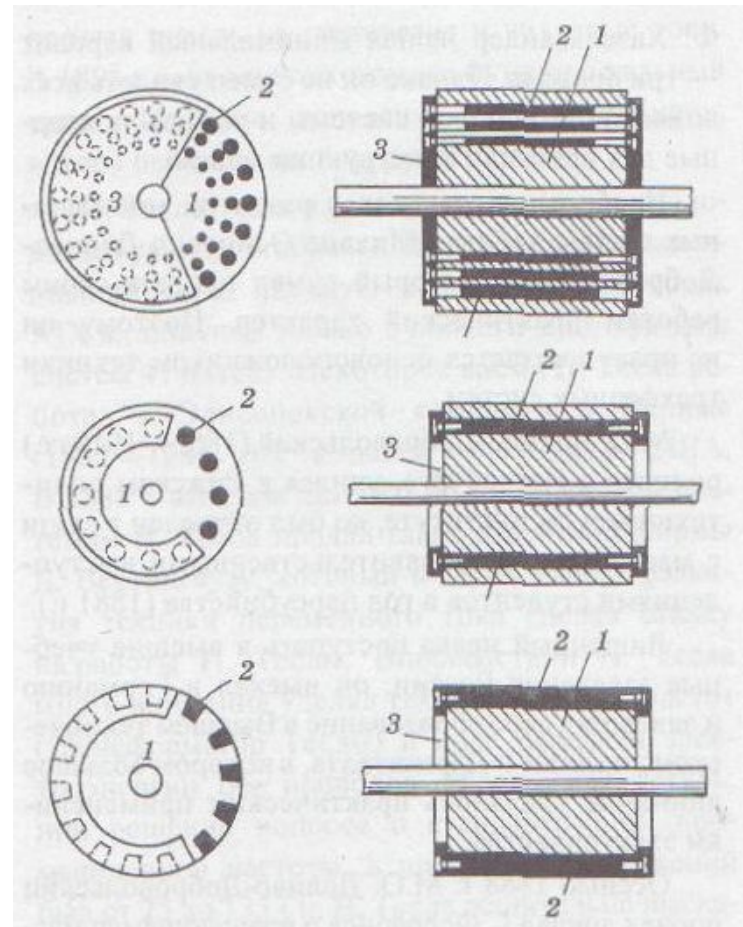


# Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором М.О. Доливо-Добровольского (дополнительная информация)

Осенью 1888 г. [М.О. Доливо-Добровольский](#) Осенью 1888 г. М.О. Доливо-Добровольский прочел доклад [Г. Феррариса](#) о вращающемся магнитном поле и был крайне удивлен его выводом о практической непригодности «индукционного» электродвигателя.. «Я тотчас же сказал себе, — вспоминал позднее М.О. Доливо-Добровольский, — что если сделать вращающееся магнитное поле по методу Г. Феррариса и поместить в него короткозамкнутый якорь малого сопротивления, то этот якорь скорее сам сгорит, чем будет вращаться с небольшим числом оборотов. Мысленно я прямо представил себе электродвигатель многофазного тока». Так М.О. Доливо-Добровольский пришел к выводу о целесообразности изготовления обмотки ротора с малым сопротивлением.

Усиленная деятельность в этом направлении привела к разработке трехфазной электрической системы и совершенной, в принципе не изменившейся до настоящего времени, конструкции асинхронного электродвигателя.

Первым важным шагом, который сделал М.О. Доливо-Добровольский, было изобретение ротора с обмоткой в виде беличьего колеса. Для уменьшения сопротивления обмотки ротора лучшим конструктивным решением мог быть ротор в виде медного цилиндра, как в двигателе Г. Феррариса. Но медь является плохим проводником для магнитного поля статора, и КПД такого двигателя был бы очень низким. Если же медный цилиндр заменить стальным, то магнитный поток резко возрастает. Однако электрическая проводимость у стали меньше, чем у меди. М.О. Доливо-Добровольский нашел блестящее решение — выполнить ротор в виде стального цилиндра (что уменьшало магнитное сопротивление ротора) и в просверленные по периферии последнего каналы закладывать медные стержни (что уменьшает электрическое сопротивление ротора). На лобовых частях ротора эти стержни должны быть хорошо электрически соединены.



*Варианты ротора с обмоткой в виде беличьего колеса (из патента Доливо-Добровольского):*

- 1 — стальной цилиндр;
- 2 — медные стержни;
- 3 — медные пластины или кольца



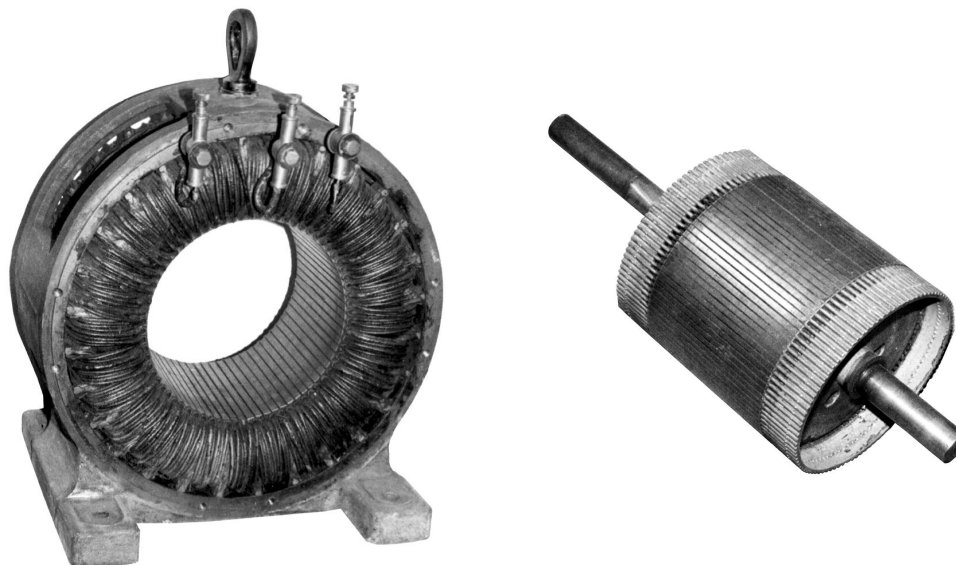
# Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором М.О. Доливо-Добровольского

Весной 1889 г. был построен первый трехфазный асинхронный электродвигатель мощностью около 100 Вт. Этот двигатель питался током от трехфазного одноякорного преобразователя и при испытаниях показал вполне удовлетворительные результаты.

В первых асинхронных двигателях [М.О. Доливо-Добровольского](#) использован ряд прогрессивных конструктивных решений: стержни «беличьего колеса» выполнены неизолированными, сердечник ротора массивным и шихтованным, стержни по торцам соединены короткозамыкающими кольцами, для статора впервые применены полузакрытые пазы

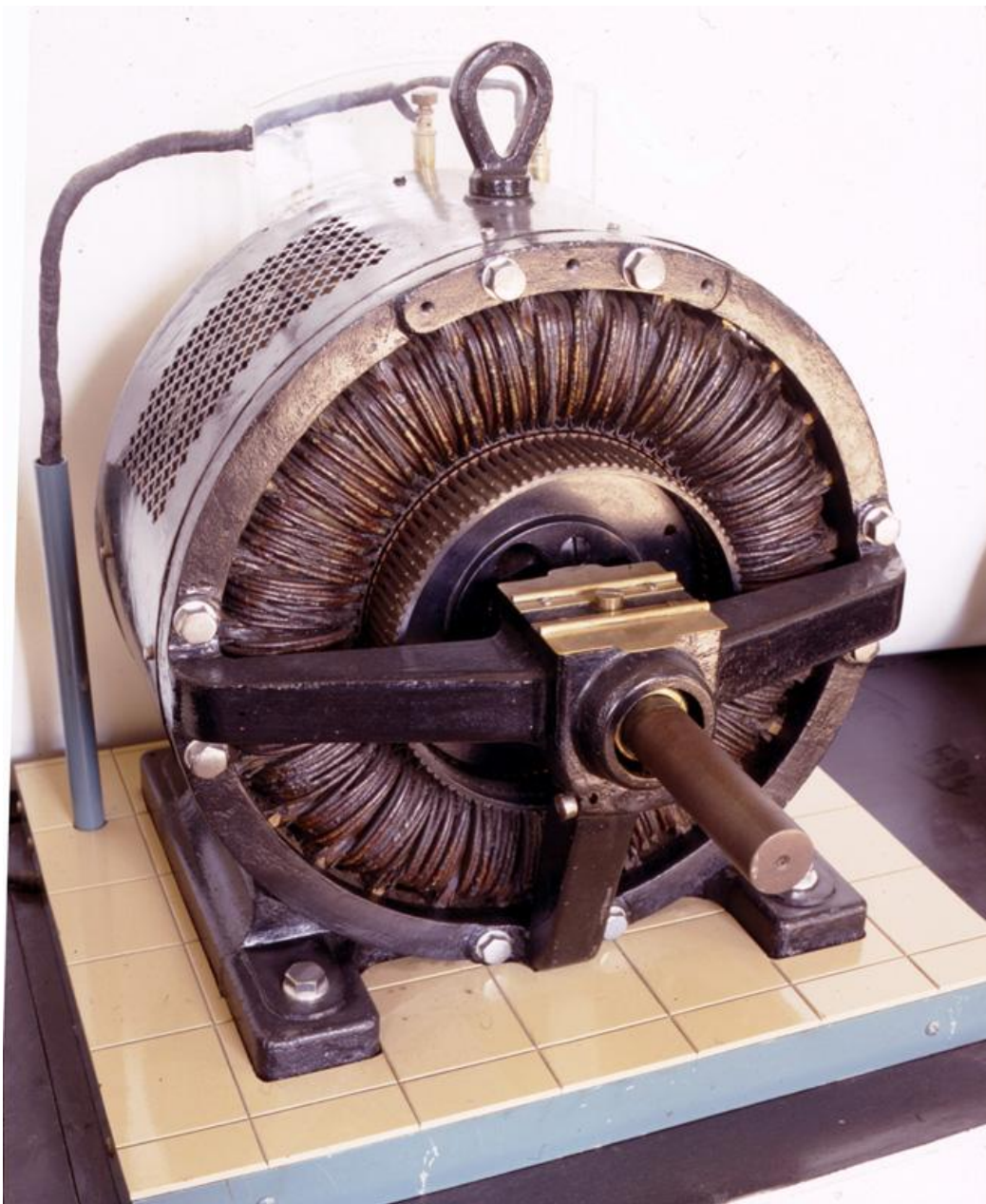
Важным достижением М.О. Доливо-Добровольского явилось также то, что он отказался от выполнения двигателя с выступающими полюсами и сделал обмотку статора распределенной по всей его окружности, благодаря чему значительно уменьшилось магнитное рассеяние по сравнению с двигателями [Н.Теслы](#). Так трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором получил современные конструктивные формы. Вскоре М.О. Доливо-Добровольским было внесено еще одно усовершенствование: кольцевая обмотка статора была заменена барабанной. После этого асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором приобрел современный вид.

*Первый трехфазный асинхронный двигатель М.О. Доливо-Добровольского (в разобранном виде)*





## Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором М.О. Доливо-Добровольского



Трехфазный асинхронный электродвигатель типа «DR80» мощностью 6 л. с. (4 кВт) выпуска 90-х гг. XIX в. из собрания Политехнического музея является одним из первых серийных трехфазных двигателей фирмы АЕГ. Об этом свидетельствует наличие кольцевой обмотки на статоре. Впоследствии от таких обмоток отказались, перейдя на более совершенные - барабанные.

Основные элементы двигателя - трехфазная обмотка статора, шихтованный ротор с короткозамкнутой обмоткой типа «беличья клетка» - предложены и разработаны [М.О. Доливо-Добровольским](#).

Электродвигатель находится в рабочем состоянии. История его появления в Политехническом музее полностью не выяснена, однако, существует версия, что М.О. Доливо-Добровольский лично передал его в дар музею.



# Поиск способов получения многофазных систем (дополнительная информация)

М.О. Доливо-Добровольский пришел к верному выводу о том, что при увеличении числа фаз улучшается распределение намагничивающей силы по окружности статора асинхронного электродвигателя. Уже переход от двухфазной системы к трехфазной дает значительный выигрыш в этом отношении. Дальнейшее увеличение числа фаз нецелесообразно, так как оно привело бы к значительному увеличению расхода меди на провода.

М.О. Доливо-Добровольский и Н. Тесла предложили различные способы получения многофазных систем.

Н. Тесла построил синхронный генератор, в котором имелись три независимые катушки, расположенные под углом  $60^\circ$  одна к другой. Такой генератор давал трехфазную систему токов, но требовал для передачи энергии шесть проводов, так как в этом случае получалась несвязанная трехфазная цепь с токами, сдвинутыми по фазе на  $60^\circ$ .

К тому времени был известен способ, при помощи которого обычную машину постоянного тока можно было превратить в генератор переменного тока. Н.Н. Яблочков и З. Грамм еще в конце 70-х годов XIX в. секционировали кольцевой якорь генератора и получали от каждой секции переменный ток. В середине 80-х годов были построены первые вращающиеся одноякорные преобразователи. Эти преобразователи получались из обычной машины постоянного тока: от двух диаметрально противоположных точек обмотки якоря двухполюсной машины делались отпайки, которые выводились на контактные кольца. В этом случае к коллектору машины подводился постоянный ток, а с колец снимался переменный. Если в том же якоре машины постоянного тока сделать отпайки от четырех равноотстоящих точек, то на четырех кольцах легко получить двухфазную систему тока.

М.О. Доливо-Добровольский в результате исследования различных схем обмоток сделал ответвления от трех равноотстоящих точек якоря машин постоянного тока. Таким образом были получены токи с разностью фаз  $120^\circ$ . Сохранив в этой машине коллектор, можно было использовать ее в качестве одноякорного преобразователя.

Вслед за первым одноякорным преобразователем был создан второй, более мощный, а затем началось изготовление трехфазных синхронных генераторов. Уже в первых генераторах применялись два основных способа соединения обмоток: в звезду и треугольник. В дальнейшем М.О. Доливо-Добровольскому удалось улучшить использование статора с помощью широко применяемого в настоящее время метода, заключающегося в том, что обмотку делают разрезной и противоположные катушки соединяют встречно.



a)



б)

Схемы двухфазного (а)  
и трехфазного (б)  
однойякорных  
преобразователей



# Обоснование целесообразности трехфазной системы

М.О. Доливо-Добровольский пришел к верному выводу о том, что при увеличении числа фаз улучшается распределение намагничивающей силы по окружности статора асинхронного электродвигателя. Уже переход от двухфазной системы к трехфазной дает значительный выигрыш в этом отношении. Дальнейшее увеличение числа фаз нецелесообразно, так как оно привело бы к значительному увеличению расхода меди на провода.

М.О. Доливо-Добровольский нашел способ получения связанной трехфазной системы, при которой для передачи и распределения электроэнергии требуется только три провода. В двухфазной системе Н. Теслы также имелась возможность обойтись тремя проводами, однако достоинства симметричной связанной трехфазной цепи подкреплялись другими преимуществами как двигателей, так и вообще трехфазной системы. Последняя является симметричной, уравновешенной и экономичной. На три провода в трехфазной системе для передачи одинаковой мощности требуется затратить металла на 25 % меньше, чем на два провода в однофазной. Экономия металла была одним из главных аргументов в пользу трехфазной системы.

Дальнейшее увеличение числа фаз привело бы к некоторому улучшению использования электрических машин, но вызвало бы соответствующее увеличение числа линейных проводов. Таким образом, трехфазная система электрических токов является оптимальной многофазной системой.

Системе трех «сопряженных» токов М.О. Доливо-Добровольский дал специальное наименование «Drehstrom», что в переводе на русский язык означает «вращающийся ток». Указанный термин, хорошо характеризующий способность образовывать вращающееся магнитное поле, до настоящего времени сохранился в немецкой литературе.



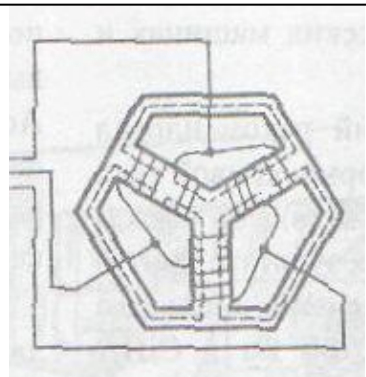


# Первые трехфазные трансформаторы М.О. Доливо-Добровольского

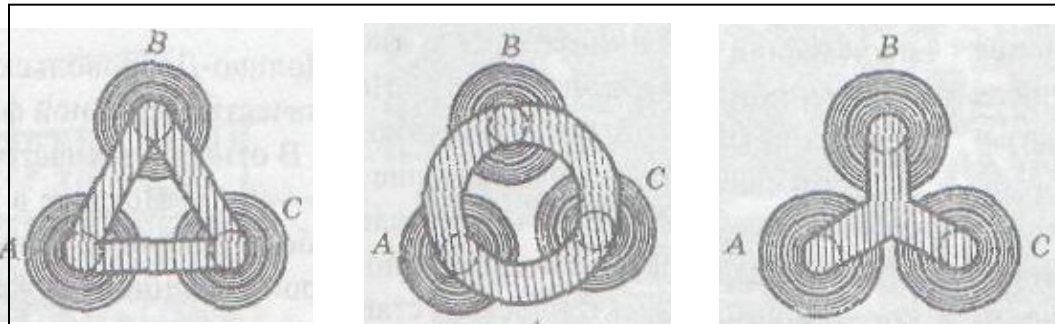
Трехфазная система не получила бы в первые же годы своего существования быстрого распространения, если бы она не решила проблемы передачи энергии на большие расстояния. Но электропередача выгодна при высоком напряжении, которое в случае переменного тока получается при помощи трансформатора. Трехфазная система не представляла принципиальных затруднений для трансформирования энергии, но требовала трех однофазных трансформаторов вместо одного при однофазной системе. Такое увеличение числа довольно дорогих аппаратов не могло не вызвать стремления найти более удовлетворительное решение.

В 1889 г. [М.О. Доливо-Добровольский](#) изобрел трехфазный трансформатор. Вначале это был трансформатор с радиальным расположением сердечников. Затем было предложено несколько конструкций так называемых «призматических» трансформаторов, в которых удалось получить более компактную форму магнитопровода. Наконец, в октябре 1891 г. была сделана патентная заявка на трехфазный трансформатор с параллельными стержнями, расположенными в одной плоскости. В принципе эта конструкция сохранилась до настоящего времени.

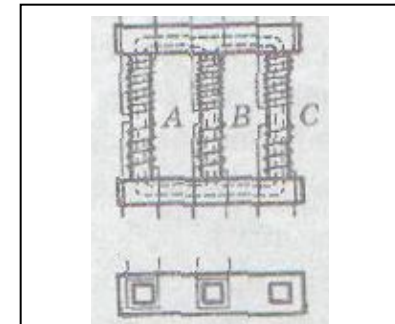
*Трансформаторы М.О. Доливо-Добровольского:*



*с радиальным расположением сердечников*



*«призматические»*



*с параллельным расположением стержней в одной плоскости*



## Первые трехфазные трансформаторы М.О. Доливо-Добровольского



Первый вариант трехфазного трансформатора [М.О.Доливо-добровольского](#) с радиальным размещением сердечников. Мощность - 100 кВА. Обмотки высшего и низшего напряжений размещались на сердечниках, а магнитные потоки замыкались по внешнему ярму.

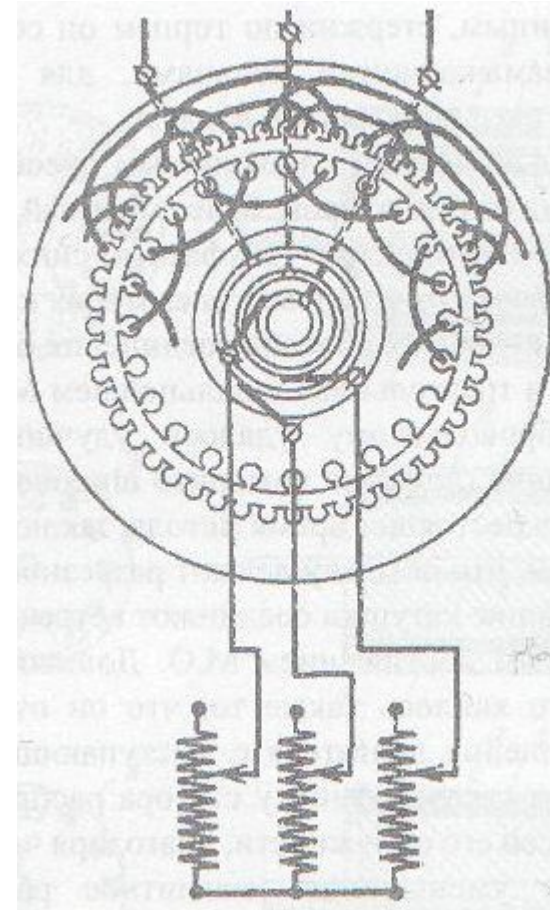
## Асинхронный двигатель с фазным ротором М.О. Доливо-Добровольского (дополнительная информация)

В развитии трехфазной техники возникло затруднение в связи с ограниченной мощностью первых источников энергии, как отдельных генераторов, так и электростанций в целом. Дело в том, что пусковой ток асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором может в несколько раз превышать номинальный, и поэтому включение двигателя мощностью свыше 2 кВт отражалось на работе других потребителей.

[М.О. Доливо-Добровольский](#) в 1890 г. изготовил двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью примерно 3,7 кВт и при первом же испытании обнаружил значительное ухудшение пусковых свойств. Причина этого заключалась в том, что короткозамкнутый ротор был «слишком замкнут накоротко». При увеличении сопротивления обмотки ротора пусковые условия заметно улучшались, но рабочие характеристики двигателя ухудшались.

Анализ возникших затруднений привел к созданию так называемого фазного ротора, т.е. такого, обмотка которого делается, подобно обмотке статора, трехфазной и ее концы соединяются с тремя кольцами, насаженными на вал. С помощью щеток эти кольца соединяются с пусковым реостатом. Таким образом, в момент пуска цепь ротора имеет большое сопротивление, которое уменьшается по мере нарастания частоты вращения. На рисунке, взятом из доклада М.О. Доливо-Добровольского на первом Всероссийском электротехническом съезде (1899), показана принципиальная конструкция двигателя.

Фазный ротор требовал устройства на валу контактных колец, а это рассматривалось многими электротехниками как недостаток по сравнению с короткозамкнутым ротором, не имевшим никаких трущихся контактов. Однако с этим недостатком пришлось мириться, и, несмотря на то что впоследствии были разработаны различные меры по улучшению условий пуска крупных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, двигатели с контактными кольцами применяются в промышленности до настоящего времени.



*Трехфазный асинхронный двигатель М.О. Доливо-Добровольского с фазным ротором и пусковым реостатом*



### 3. Развитие электрического привода

В 70—80-х годах XIX столетия начато использование электрического привода для различных исполнительных механизмов. Однако до начала 90-х годов применение электропривода носило эпизодический характер. Лишь в некоторых случаях, когда предприятия располагали блок-станциями для электрического освещения, электродвигатели применялись для привода вентиляторов, насосов, подъемников и других механизмов. Следует отметить, что на Всероссийской политехнической выставке в 1872 г. В.Н. Чиколев впервые демонстрировал швейную машину с электрическим приводом — это был первый в мире «электрифицированный станок».

Положение изменилось коренным образом в связи с изобретением асинхронного двигателя. В достаточно короткий срок этот тип двигателя занял доминирующее положение в системе электропривода промышленных предприятий. Чрезвычайная простота асинхронного двигателя, особенно с короткозамкнутым ротором, его надежность и невысокая стоимость позволяют установить в любом цехе сотни и тысячи двигателей при немногочисленном обслуживающем персонале.

Существенным недостатком асинхронного двигателя является трудность регулирования частоты вращения. Поэтому до настоящего времени еще очень велик удельный вес регулируемых машин постоянного тока в системе промышленного электропривода.

Развитие электропривода происходило двумя неравнозначными путями. Первый — замена паровых двигателей, работавших на трансмиссию, электродвигателями. Это был путь создания крупногруппового электропривода, который не исключал тяжелых производственно-гигиенических условий, определявшихся наличием трансмиссий. Второй путь — применение одиночного привода. Вначале одиночный привод применялся для крупных ответственных исполнительных механизмов, предъявлявших специфические требования к приводному двигателю (привод кранов, центрифуг, прокатных станов и т.п.). Но уже в конце века практика наглядно убеждала в преимуществах одиночного привода.





## 4. Начало применения электроэнергии на транспорте

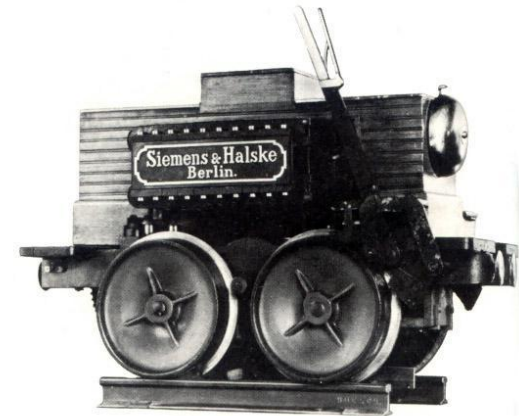
В 70-80-х годах XIX в. проводилось много работ по применению электричества на транспорте. Так называемые конно-железные дороги уже не удовлетворяли возросших потребностей городского населения, а применение парового городского транспорта оказалось неприемлемым из-за дыма и копоти. Реальная возможность для проведения опытов по электрификации транспорта появилась после изобретения генератора Грамма.

Развитие электротранспорта шло двумя путями: при питании электродвигателя от гальванической или аккумуляторной батареи, размещенной на транспортном средстве и от генераторов Грамма. В этом случае проблема электрической тяги могла найти решение лишь при условии разработки приемов экономичной передачи электроэнергии от места ее генерирования к движущемуся экипажу, вагону и т.п.

В 1879 г. **В. Сименсом** была построена первая небольшая электрическая железная дорога на промышленной выставке. Электрическая энергия по отдельному контактному рельсу передавалась к двигателю «локомотива», обратным проводом служили рельсы. К последнему были прицеплены три тележки, на которых могли разместиться 18 пассажиров.



*Электрическая железная дорога Сименса (1879 г.)*



*«Локомотив» электрической железной дороги Сименса*



## 4. Начало применения электроэнергии на транспорте

В России первые опыты неавтономной электрической тяги были проведены [Ф.А. Пироцким](#). Еще в 1875—1876 гг. он использовал для передачи электроэнергии обычный железнодорожный рельсовый путь. Чтобы улучшить проводимость рельсового пути, он применил стыковые электрические соединения, а для усиления изоляции двух ниток рельсов одной колеи (они были изолированы слоем окалины и шпалами) — смазку подошвы рельсов асфальтом.

В августе 1880 г. Ф.А. Пироцкий осуществил пуск электрического трамвая на опытной линии в районе Рождественского парка конной железной дороги в Петербурге. Питалась эта линия от небольшой электростанции, построенной в парке, с генератором мощностью 4, а позднее 6 л.с. Под трамвайный электровагон был приспособлен двухъярусный вагон конной железной дороги (масса с пассажирами 6,5—7,0 т), к раме которого был подвешен электродвигатель, приводивший в движение ведущую ось через двухступенчатую зубчатую передачу. Схема, предложенная Ф.А. Пироцким, некоторое время применялась для питания трамвайной сети и за рубежом. Она была достаточно проста и давала возможность обойтись без третьего рельса, затруднявшего уличное движение и усложнявшего все сооружение. Недостатком такой схемы было наличие больших потерь электроэнергии от токов утечки из-за плохой изоляции рельсов.

После изобретения способа питания от верхнего контактного провода, сделанного в 1883 г. независимо Ван-Депулем (США) и В. Сименсом (Германия), схему питания по двум рельсам перестали использовать.

На электрическом транспорте почти исключительное применение получил постоянный ток, обеспечивающий надежную работу тяговых электродвигателей и удобное регулирование скорости. Поэтому по мере развития техники переменного тока пришлось сооружать преобразовательные подстанции. Для преобразования переменного тока в постоянный использовалась двигатель-генераторная установка (двигатель переменного тока – генератор постоянного тока). В 1885—1889 гг. создаются первые одноякорные преобразователи переменного тока в постоянный, которые в каждом случае представляли собой комбинацию синхронного электродвигателя и генератора постоянного тока с общим якорем.





## 5. Первая трехфазная сеть

В 1891 г. состоялось испытание трехфазной системы на Международной электротехнической выставке в г. Франкфурте-на-Майне (Германия). Фирме АЕГ, в которой в то время работал [М.О. Доливо-Добровольский](#), было решено предложить передать посредством электричества энергию водопада на р. Неккар (близ местечка Лауфен) на территорию выставки во Франкфурт на расстояние 170 км. В Лауфене для этой цели выделялась турбина, дававшая полезную мощность 300 л.с. До этого времени дальность электропередачи не превышала 15 км, и некоторые компетентные специалисты полагали, что КПД установки может оказаться ниже 50%.

М.О. Доливо-Добровольскому предстояло в течение года спроектировать и построить асинхронный двигатель мощностью около 75 кВт и трехфазные трансформаторы мощностью 100—150 кВА. Изготовление генератора было поручено главному инженеру швейцарского завода «Эрликон» Ч. Броуну, который сотрудничал с М.О. Доливо-Добровольским в области конструирования многофазных машин. Срок был чрезвычайно коротким, а задачи — весьма ответственными: во-первых, новая система тока должна была подвергнуться испытанию перед лицом представителей всего мира: во-вторых, масштабы испытания были невиданными. Двигатели и трансформаторы на такие мощности еще никогда не строились.

25 августа 1891 г. на выставке впервые зажглись 1000 ламп накаливания, питаемых током от Лауфенской гидроэлектростанции (ГЭС); 12 сентября того же года двигатель М.О. Доливо-Добровольского привел в действие декоративный водопад. Налицо была своеобразная энергетическая цепь: небольшой искусственный водопад приводился в действие энергией естественного водопада, удаленного от первого на 170 км.

На гидроэлектростанции в Лауфене энергия, развиваемая турбиной, передавалась на вал трехфазного синхронного генератора (мощность 230 кВА, частота вращения 150 об/мин. напряжение 95 В). В Лауфене и Франкфурте находилось по три трехфазных трансформатора с магнитопроводом призматической формы. Трансформаторы были погружены в баки, наполненные маслом.

Трехпроводная линия была выполнена на деревянных опорах со средним пролетом около 60 м. Медный провод диаметром 4 мм крепился на штыревых фарфорово-масляных изоляторах. Интересной деталью линии являлась установка плавких предохранителей со стороны высокою напряжения: в начале линии в разрыв каждого провода был включен участок длиной 2,5 м. состоявший из двух медных проволок диаметром 0,15 мм каждая. Для отключения линии во Франкфурте посредством простого приспособления устраивалось трехфазное короткое замыкание, плавкие вставки перегорали, турбина начинала развивать большую скорость, и машинист, заметив это, останавливал ее.

На выставочной площадке во Франкфурте был установлен понижающий трансформатор, от которого при напряжении 65 В питались 1000 ламп накаливания, расположенных на огромном щите. Здесь же был установлен трехфазный асинхронный двигатель М.О. Доливо-Добровольского, приводивший в действие гидравлический насос мощностью около 100 л.с. Одновременно с этим мощным двигателем М.О. Доливо-Добровольский экспонировал асинхронный трехфазный двигатель мощностью около 100 Вт с вентилятором на его валу и двигатель мощностью 1,5 кВт с сидящим на его валу генератором постоянного тока.



## 5. Первая трехфазная сеть

Перед пуском электропередачи возникли неожиданные затруднения. Дело в том, что линия пересекала территории четырех германских земель, и местные власти очень опасались высокого напряжения. Люди испытывали страх перед деревянными столбами с табличками, на которых был изображен череп. Людей смущало и то, что оборудование на электростанции было заземлено, как заземлена была и нейтраль трансформатора. В связи с этим очень опасались обрыва провода и падения его на землю, хотя было разъяснено, что все опасности предусмотрены и линия надежно защищена. [М.О. Доливо-Добровольскому](#) пришлось провести опасный, но убедительный эксперимент. На границе двух земель собрались представители местных властей. Включили линию под напряжение и на глазах у присутствующих искусственным путем оборвали провод, который с яркой вспышкой упал на рельсы железной дороги. М.О. Доливо-Добровольский сейчас же подошел и поднял провод голыми руками — настолько он был уверен, что спроектированная им защита сработает надежно.

Испытания электропередачи, которые проводились Международной комиссией, дали следующие результаты: минимальный КПД электропередачи (отношение мощности на вторичных зажимах трансформатора во Франкфурте к мощности на валу турбины в Лауфене) 68,5%, максимальный 75,2 %; линейное напряжение при испытаниях около 15 кВ, а при более высоком напряжении — 25,1 кВ максимальный КПД составил 78,9 %.

Результаты испытаний электропередачи Лауфен—Франкфурт не только продемонстрировали возможности электрической передачи энергии, но и поставили точку в давнем споре. В борьбе «постоянный—переменный ток» победил переменный.



## 6. Становление трехфазных систем

Создание трехфазной системы — важнейший этап в развитии электротехники и электрификации. После закрытия Франкфуртской выставки электростанция в Лауфене перешла в собственность г. Хейльбронна, расположенного в 12 км от Лауфена и была пущена в эксплуатацию в начале 1892 г. На ней работали два одинаковых трехфазных синхронных генератора. Напряжение (фазное) при помощи трансформаторов повышалось с 50 до 5000 В. Электроэнергия использовалась для питания всей городской осветительной сети, а также ряда небольших заводов и мастерских. Понижающие трансформаторы устанавливались непосредственно у потребителей.

В 1892 г. была сдана в эксплуатацию линия Бюлах—Эрликон (Швейцария). У водопада в г. Бюлахе построили гидроэлектростанцию с тремя трехфазными генераторами мощностью 150 кВт каждый. Электроэнергия передавалась на расстояние 23 км для электроснабжения завода. Вслед за этими первыми установками началось довольно быстрое строительство ряда электростанций, причем наибольшее их число находилось в Германии.

Известные трудности в развитии электрификации на базе трехфазных систем возникали в связи с тем, что уже раньше в городах были построены станции постоянного или однофазного тока, а иногда и двухфазного. Владельцы и акционеры этих станций и электрических сетей всячески препятствовали внедрению трехфазной системы. Некоторым выходом явилось сочетание трехфазной электропередачи с распределением энергии на постоянном токе.



## 6. Становление трехфазных систем

В Америке первая трехфазная установка была сооружена в конце 1893 г. в Калифорнии. Гидроэлектростанция располагала двумя генераторами мощностью по 250 кВт. От электростанции провели две линии генераторного напряжения (2500 В). Первая из них длиной 12 км поставляла энергию для осветительных целей, а вторая длиной 7,5 км предназначалась для питания трехфазного асинхронного двигателя мощностью 150 кВт.

Темпы внедрения трехфазной системы в Америке вначале были заметно ниже, чем в Европе. Это объясняется тем, что одна из крупнейших американских фирм — компания «Вестингауз» настойчиво пыталась развернуть работы по сооружению электростанций и электрических сетей по системе Н. Теслы. Высшим достижением двухфазной системы считалась грандиозная по тому времени электростанция на Ниагарском водопаде, пущенная в эксплуатацию в 1896 г. На ней были установлены три двухфазных генератора по 5000 л.с. каждый с напряжением 2400 В. Вскоре началось расширение станции, и к началу XX столетия число агрегатов было увеличено до восьми, а общая мощность возросла до 40 000 л.с.

Американская фирма «Дженерал электрик», основной оппонент фирмы «Вестингауз», быстро переориентировалась и в противовес конкурирующей фирме развила бурную деятельность по сооружению трехфазных установок. Фирма «Вестингауз» проиграла: Ниагарская гидроэлектростанция со временем была переоборудована в трехфазную.

В России первым предприятием с трехфазным электроснабжением был Новороссийский элеватор. Он представлял собой грандиозное сооружение и задача распределения энергии по его этажам и различным зданиям могла быть решена наилучшим образом только с помощью электричества. Строитель элеватора инженер А.Н. Щенснович решил применить только что ставшую известной трехфазную систему. Летом 1892 г. швейцарскому заводу фирмы «Броун-Бовери» были заказаны чертежи трехфазных машин. В следующем 1893 г. элеватор был электрифицирован. Все машины по разработанным за границей проектам изготовлялись в собственных мастерских элеватора.

С 1897 г. началась электрификация крупных городов: Москвы, Петербурга, Самары, Киева, Риги, Харькова и др.

Для переходного периода в любой области техники характерны попытки комбинирования устаревающих и новых технических решений. Так, в течение почти двух десятилетий начиная с 1891 г. делались попытки «примирить» трехфазные системы с другими системами. В эти годы существовали электростанции, на которых одновременно работали генераторы постоянного, переменного однофазного тока, двухфазные и трехфазные или любая их комбинация. Напряжения и частоты были различными, потребители питались по отдельным линиям. Попытки спасти устаревающие системы, а вместе с ними и освоенное заводами электрооборудование, приводили к созданию комбинированных систем.

Однако судьба комбинированных систем, равно и систем электроснабжения постоянным и однофазным переменным токами, была предрешена, и уже с 1901—1905 гг. сооружаются трехфазные электростанции, которые вначале в основном были станциями фабрично-заводского типа.



## 7. Возникновение районных электростанций

Трехфазная техника позволяла строить крупные электростанции на месте добычи топлива, на водопаде или на подходящей реке, а вырабатываемую энергию транспортировать по линиям электропередачи в промышленные районы и города. Такие электростанции стали называть районными.

Первые районные электростанции были построены во второй половине 90-х годов XIX в., а в следующем столетии они составили основу развития электроэнергетики. Первой районной электростанцией считают Ниагарскую ГЭС.

Широкий размах строительство районных электростанций приобрело с начала XX в. Этому способствовал рост потребления электроэнергии, связанный с внедрением в промышленность электропривода, развитием электрического транспорта и электрического освещения городов.



## 8. Появление энергетических систем

Электрические станции становились крупными промышленными предприятиями по выработке электроэнергии; сети разных станций объединялись, создавались первые энергетические системы. Под энергетической системой стали понимать совокупность электростанций, линий электропередачи, подстанций и тепловых сетей, связанных общностью режима и непрерывностью процесса производства и распределения электрической и тепловой энергии.

До появления районных электростанций электрических систем практически не было. Электростанции работали изолированно, каждая имела свою нагрузку. При изолированной работе станций не было большой необходимости устанавливать стандартные частоты и напряжения, и последние принимались в зависимости от конкретных условий данной станции. Последствия этого еще долго сказывались в некоторых странах, например, в США и Японии приходилось подключать на параллельную работу электростанции, работавшие при различных частотах (50 и 60 Гц). Потребность объединить работу нескольких электростанций в общую сеть стала проявляться уже в 90-х годах XIX в. Было выяснено, что при совместной работе уменьшается необходимый резерв на каждой станции в отдельности, появляется возможность ремонта оборудования без отключения основных потребителей, создаются условия для выравнивания графика нагрузки базисных станций, для более эффективного использования энергетических ресурсов.

Первое известное объединение двух трехфазных электростанций было осуществлено в 1892 г. в Швейцарии. Две небольшие электростанции мощностью 120 кВА и 360 кВА соединялись двухкилометровой линией напряжением 5 кВ и питали распределительную сеть завода фирмы «Эрликон» по линии передачи протяженностью 24 км при напряжении 13 кВ. Возбуждение генераторов первой станции регулировалось со щита управления второй.





Ученые, исследовавшие электричество и магнетизм,  
электротехники, изобретатели, конструкторы  
электротехнических устройств

Н. Тесла

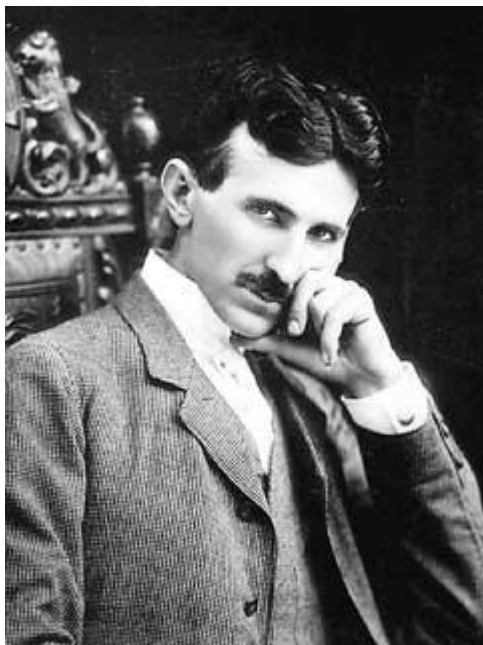
Г. Феррарис

М.О. Доливо-  
Добровольский

Э.В. Сименс

Ф.А. Пироцкий





**Тесла Никола (1856—1943 гг.)** — выдающийся югославский ученый-электротехник, творец многофазных систем и техники СВЧ, автор более 800 изобретений в области электротехники, радиотехники и автоматики. Родился в хорватском селении Смиляны, принадлежал к древнему сербскому роду.

В 1871 г. Н. Тесла поступил в Высшее реальное училище г. Карловец, а после его окончания стал студентом Высшей технической школы в г. Граце. Окончив Высшую техническую школу, он начал работать инженером, а затем стал инженером-электриком правительственной Телеграфной компании в Будапеште.

В 1888 г. открывает явление вращающегося магнитного поля и получает патенты на несколько типов двухфазных генераторов, двигателей и трансформаторов. В 1896 г. состоялось торжественное открытие крупнейшей в мире Ниагарской гидроэлектростанции, оборудованной машинами Н. Теслы.

В процессе создания многофазных систем Н. Тесла обратил внимание на особенности переменного тока высокой частоты и создал несколько высокочастотных генераторов. Но с увеличением частоты ухудшаются КПД и механическая прочность машин, поэтому Н. Тесла, изучив особенности колебательного характера электрических разрядов и явлений резонанса в электрических цепях, создает в 1891 г. свой знаменитый резонанс-трансформатор (трансформатор Теслы), сыгравший огромную роль в развитии электротехники и радиотехники. Н. Тесла предложил использовать резонанс-трансформатор для возбуждения проводника-излучателя, поднятого высоко над землей (это была первая антенна) и способного передавать энергию высокой частоты без проводов. В 1898 г. Н. Тесла получает патент на изобретение, положившее начало радиотелемеханике. С помощью своей установки он управлял специально оборудованными кораблями, находившимися в океане на расстоянии более 25 морских миль от берега и выполнявшими сложные маневры. Он первым ввел термин «телеавтоматика». Под его руководством была сооружена 47-метровая каркасная башня, где должна была быть установлена мощная радиостанция для передачи различных сигналов и сообщений. Он работал над осуществлением космической радиосвязи и передачи изображений на другие планеты.

В 1956 г. Международная электротехническая комиссия увековечила имя Н. Теслы, присвоив единице магнитной индукции название «Тесла».



**Феррарис Галилео (1847—1897)** — итальянский ученый, профессор, член Туринской академии наук. К открытию явления вращающегося магнитного поля (ВМП) он пришел еще в 1885г., но доклад «Электродинамическое вращение, произведенное с помощью переменных токов» он сделал в Туринской академии наук в 1888 г., т.е. почти одновременно с Н. Теслой. Г. Феррарис разработал теорию переменных токов и в ясной форме объяснил сложные физические процессы. Он показал, что если в двух взаимно перпендикулярно расположенных катушках переменные токи сдвинуты на четверть периода, то конец вектора суммарной магнитной индукции описывает окружность. Если поместить в это поле полый медный цилиндр, снабженный валом и подшипниками, то он начнет вращаться. Г. Феррарис построил модель двухфазного асинхронного двигателя. Для получения двух сдвинутых по фазе токов Г. Феррарис предложил метод «расщепления фаз», что позднее получило практическое применение. Вначале у Г. Феррариса магнитное поле получалось не круговым, а эллиптическим, из-за невыполнения всех условий создания кругового ВМП. При теоретическом анализе Г. Феррарис, находясь в плену «слаботочной техники», предположил, что двигатель должен работать в режиме, согласованном с источником питания, т.е. при максимальной мощности, поэтому КПД двигателя не мог превышать 50 %. На этом основании Г. Феррарис считал, что «аппарат ... не может иметь какого-либо практического значения». И поэтому использование «этого аппарата» ограничивалось применением в измерительных устройствах. Но именно эта ошибка Г. Феррариса привлекла внимание М.О. Доливо-Добровольского, создавшего первый трехфазный асинхронный двигатель. Позднее за открытие явления вращающегося магнитного поля Г. Феррарис был награжден прусским орденом.



**Доливо-Добровольский Михаил Осипович (1862—1919 гг.)** — выдающийся российский электротехник, основоположник техники трехфазных систем.

Родился в Санкт-Петербурге, окончил Одесское реальное училище, а в 1878 г. поступил в Рижский политехнический институт. В 1881 г. был исключен из института за участие в студенческих демонстрациях без права поступления в учебные заведения России. Мечтая получить электротехническое образование, М.О. Доливо-Добровольский уезжает в Германию и поступает в Дармштадское высшее техническое училище, одно из ведущих электротехнических учебных заведений Европы.

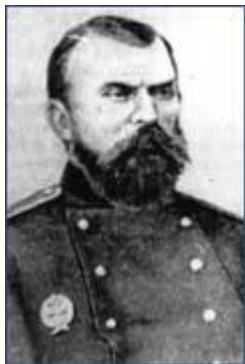
После успешного окончания училища в 1884 г. начал там же преподавать новый самостоятельный курс. Однако вскоре его приглашают на должность шеф-электрика знаменитой немецкой «Всеобщей компании электричества» (АЭГ). В 1888—1889 гг. он разрабатывает трехфазную электрическую систему, которая благодаря своим преимуществам сохранила ведущее положение в современной электроэнергетике. Критически изучив работы своих современников, он создает наиболее простой и надежный трехфазный асинхронный двигатель, конструкция которого в принципе не изменилась до наших дней.

М.О. Доливо-Добровольским были разработаны все элементы трехфазной системы: синхронный генератор, трансформатор, линия электропередачи (трехпроводная и четырехпроводная), несколько типов асинхронных двигателей, в том числе уникальный по простоте и надежности — с короткозамкнутым ротором. Им было получено более 50 патентов и привилегий на изобретения.

В 1918 г. М.О. Доливо-Добровольский впервые обосновал экономичность передачи электроэнергии на большие расстояния посредством постоянного тока; при этом генерирование и распределение энергии осуществляются переменным током, а передача энергии по линии — постоянным током высокого напряжения с использованием преобразовательных подстанций. Этим своим открытием он опередил современный ему уровень электроэнергетики на многие десятилетия.

К сожалению, судьба М.О. Доливо-Добровольского оказалась трагичной. В течение многих лет немецкие электропромышленники, нажившие на изобретениях М.О. Доливо-Добровольского огромные капиталы, безуспешно пытались заставить его принять немецкое подданство. Он стремился вернуться на Родину. Во время первой мировой войны он уехал в Швейцарию, где его здоровье резко ухудшилось, и в 1919 г. в Гейдельберге он скончался. «Умер великий инженер», — писали о его смерти многие газеты мира.





**Пироцкий Федор Аполлонович (1845— 1898 гг.)** — российский изобретатель в области электротехники.

Родился в Полтавской губернии в семье небогатого помещика. В 1869 г. поступил в Михайловскую артиллерийскую академию в Петербурге, после окончания которой в 1871 г. начал работать в Главном артиллерийском управлении, где увлекся применением электричества в военном деле.

Побывав в Финляндии, он решил заняться проблемой использования энергии воды для передачи ее в качестве «Двигательной силы» к различным механизмам. В 1874 г. Ф.А. Пироцкий представил свой проект в Главное артиллерийское управление. Не зная о существовании машины З. Грамма, он разработал свою конструкцию генератора и двигателя и предложил соединить их «весьма длинной железной, проволокой, поддерживаемой деревянными столбами». Он также указал на возможность выработки электроэнергии с помощью паровых машин, установленных в местах добычи дешевых каменных углей. Никто до Ф.А. Пироцкого ни в России, ни за рубежом не указывал на экономическую целесообразность производства электроэнергии на тепловых и гидравлических электростанциях и передачи ее на большие расстояния.

В 1876 г. он приобрел машину З. Грамма и начал опыты по передаче электроэнергии по рельсам заброшенной железнодорожной ветки, подсчитав, что сопротивление рельсов значительно меньше, так как их площадь поперечного сечения в 644 раза больше, чем у телеграфной проволоки. Ему удалось передать электроэнергию на расстояние около 1 км, предложив ряд способов изоляции рельсов от земли. Его идея об использовании рельсов для передачи электроэнергии позднее получила реализацию при электрификации железных дорог. В 1880 г. Ф.А. Пироцким впервые был осуществлен опыт приведения в движение по рельсам большого вагона с 40 пассажирами.



**Сименс Эрнст Вернер (1816—1892 гг.)** — немецкий электротехник и пионер электротехнической промышленности.

Закончил (1834 г.) Любекскую гимназию и поступил в артиллерийское инженерное училище в Берлине, после окончания которого в 1838 г. занялся изобретательской деятельностью и в 1842 г. получил первый патент на метод гальванического золочения и серебрения. Затем он был откомандирован в артиллерийские мастерские в Берлине. Здесь он стал членом Физического общества.

В 1846 г. он усовершенствовал конструкцию стрелочного электрического телеграфа и вместе с механиком И.Г. Гальске основал телеграфную строительную фирму «Сименс и Гальске», занимавшуюся изготовлением не только телеграфных аппаратов, но и различных электромедицинских приборов. В 1849 г. фирма получила правительственный заказ на прокладку первой в Европе дальней телеграфной линии между Берлином и Франкфуртом-на-Майне. Еще в 1847 г. Э.В. Сименс изобрел гуттаперчевый пресс для бесшовной изоляции медного провода. Имя Э.В. Сименса стало широко известно, и заказы на дальние телеграфные линии поступали один за другим. В 1851 г. на Первой Международной промышленной выставке в Лондоне стрелочный телеграф Э.В. Сименса был удостоен высшей награды.



В 1851 г. 75 пишущих телеграфов фирмы «Сименс и Гальске» были поставлены для единственной в то время телеграфной линии между Москвой и Петербургом. А в 1852 г. Э.В. Сименс прибыл в Петербург для переговоров о прокладке телеграфной сети. Вскоре современные автоматические телеграфные линии связали ряд отдаленных городов европейской части России. В 1853 г. телеграфные линии связывали Москву и Севастополь, а также Петербург и Кронштадт, где кабель был проложен через Балтийское море. Для быстрого определения места повреждения линии Э.В. Сименсом был предложен метод многократного использования одного провода, а также усовершенствован якорь динамомшины (1856 г.).

Одним из наиболее значительных вкладов Э.В. Сименса в развитие электромашиностроения явился предложенный им в 1866 г. принцип самовозбуждения, о котором он представил доклад в начале 1867 г. в Берлинскую академию наук. Этот принцип Э.В. Сименс назвал динамоэлектрическим. Необходимо отметить, что принцип самовозбуждения был разработан еще до Э.В. Сименса многими изобретателями и учеными (например, А. Йедликом в 1861 г.), но они не располагали возможностями и средствами для промышленного изготовления таких генераторов.

В 1879 г. он построил первую электротехническую железную дорогу на Берлинской промышленной выставке, усовершенствовал телефон, создал дуговую электропечь (1878 г.), получившую применение в промышленности.

На Первой Международной электротехнической выставке в Париже в 1889 г. фирме Э.В. Сименса была присуждена большая часть почетных дипломов. Э.В. Сименс был одним из основателей Имперского физико-технического института.



# Контрольные вопросы

1. Что собой представлял первый прибор, в котором создавалось вращающееся магнитное поле? Кто его сконструировал?
2. Кто и когда открыл вращающееся магнитное поле? В какой электрической машине впервые было использовано вращающееся магнитное поле?
3. Назовите направления технической деятельности Н. Теслы.
4. Сколько фаз было в многофазной системе Н. Теслы? Где была применена его многофазная система?
5. Чьи работы послужили толчком к изобретениям М.О. Доливо-Добровольского?
6. Автором каких изобретений является М.О. Доливо-Добровольский?
7. Что собой представлял первый станок с электроприводом?
8. Какое изобретение послужило толчком к началу широкого применения электрического привода? По каким направлениям шло его развитие?
9. Когда и кем была построена первая электрическая железная дорога? Что она собой представляла?
10. Каков вклад Ф.А. Пироцкого в развитие электротранспорта?
11. Где была построена первая трехфазная сеть? Кто ее спроектировал? Какие элементы она включала? Как прошли испытания?
12. Расскажите о первых шагах электрификации. Как происходило становление многофазных систем в Европе, Америке?
13. Какую электростанцию считают первой районной? Когда началось активное строительство районных электростанций?
14. Что собой представляла первая энергетическая система?





## Использованная литература

- История электротехники / Под ред. И.А. Глебова — М.: Издательство МЭИ, 1999. — 524с.
- История энергетической техники/ Белькинд Л. Д., Веселовский О. Н., Конфедератов И.Я., Шнейберг Я. Л. — М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1960.

