

## Краткий исторический обзор этапов создания и развития электрических машин

К. А. Колупицкий<sup>✉</sup>, Д. В. Самохвалов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ [barly.brend@gmail.com](mailto:barly.brend@gmail.com)

**Аннотация.** Для того чтобы глубоко разобраться в закономерностях развития любой отрасли знания, необходимо знать ее историю. В данной статье представлен обзор технической информации, связанной с созданием электрических машин и развитием электромеханики – науки об электрических машинах. Обзор выполнен на основании анализа профильных литературных источников и включает в себя: предпосылки появления электромеханических преобразователей энергии – электрических машин, открытие их принципов работы, развитие электрических генераторов постоянного тока, электрических двигателей постоянного тока, электрических машин переменного тока, а также этапы развития теоретических исследований в области электромеханики. Информация, содержащаяся в статье, будет полезна для расширения кругозора студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника», а также для всех лиц, проявляющих хоть какой-нибудь интерес к электромеханике. История развития электрических машин, которая рассматривается в данной статье, весьма поучительна и заслуживает большого внимания.

**Ключевые слова:** электрическая машина, электрический генератор, электрический двигатель

**Для цитирования:** Колупицкий К. А., Самохвалов Д. В. Краткий исторический обзор этапов создания и развития электрических машин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 4. С. 81–92. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-4-81-92.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Review article

## A Brief Historical Overview of the Stages of Creation and Development of Electric Machines

K. A. Kolupitsky<sup>✉</sup>, D. V. Samokhvalov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ [barly.brend@gmail.com](mailto:barly.brend@gmail.com)

**Abstract.** In order to deeply understand the patterns of development of any branch of knowledge, it is necessary to know its history. This article provides an overview of technical information related to the creation of electric machines. The review is based on the analysis of specialized literature sources and includes: prerequisites for the appearance of electromechanical energy converters – electric machines, the discovery of the principles of operation of electric machines, the development of DC electric generators, the development of DC electric motors, the development of AC electric machines, as well as the stages of development of theoretical research in the field of electromechanics. The information contained in the article will be useful for expanding the horizons of students studying in the direction of «Electric Power and Electrical Engineering», as well as for

all persons showing at least some interest in electrical engineering. The history of the development of electric machines, which is considered in this article, is very instructive and deserves a lot of attention.

**Keywords:** electric machine, electric generator, electric motor

**For citation:** Kolupitsky K. A., Samokhvalov D. V. A Brief Historical Overview of the Stages of Creation and Development of Electric Machines // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 4. P. 81–92. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-4-81-92.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** Уже в древнейшие времена человечество нуждалось в силе, в двигателях, которые помогали бы выкорчевывать деревья, приводили бы в действие устройства для подачи воды на поля, вспахивали бы землю, приводили бы во вращение жернова, которые перемалывали зерно, и т. п. В странах Древнего Востока, в Египте, Индии и Китае для этого уже в третьем тысячелетии до н. э. использовались животные и рабы. Затем на смену живым двигателям постепенно пришло водяное колесо. Тогда же люди начали использовать паруса для движения лодок, а в VII в. н. э. персы изобрели ветряную мельницу с крыльями. Водяные колеса и ветряные мельницы вплоть до XVII в. служили основными источниками движущей силы.

В конце XVII – начале XVIII вв. в европейских странах и России производились многократные попытки создать двигатель, не зависящий от воды рек и силы ветра. Благодаря размышлениям и опытам древних мыслителей возникла идея использования пара для создания движущей силы. Герон из Александрии еще в 70-е гг. н. э. изобрел простейшую паровую турбину – эолипил Герона [1]. В середине XVIII в. человечество вплотную подошло к одному из важнейших моментов в истории технического творчества – использованию водяного пара для приведения в действие различных механизмов. Паровые машины выполняли свое назначение, однако были очень громоздки и неудобны в эксплуатации.

Позднее, после изобретения различного рода двигателей – ветровых, водяных, паровых, турбореактивных, внутреннего сгорания – встал вопрос о передаче энергии на расстояние. Передачи изобретались самые разные – ременные, гидравлические, пневматические, но все они имели огромный недостаток – они передавали энергию на небольшие расстояния и со значительными потерями. Развитие промышленности, строительство фабрик, заводов, рост крупных городов требовали все больше энергии и передачи ее на все более дальние расстояния.

Важнейшей вехой в развитии энергетической базы промышленности, сельского хозяйства, бытовых удобств стало изобретение и применение электрических двигателей (ЭД). ЭД удобнее и надежнее других двигателей – паровых, ветряных и водяных. Они всегда готовы к работе, могут управляться дистанционно и позволяют регулировать скорость вращения, к тому же передача энергии при помощи электричества возможна на значительные расстояния при малых потерях, что способствовало решению проблемы концентрированного производства, передачи и использования электроэнергии. ЭД – это всего лишь один из видов преобразователей энергии, который относится к большому классу преобразователей – электрическим машинам (ЭМ) или электромеханическим преобразователям (ЭМП).

Открытие и использование электричества – одно из величайших достижений человечества. Ему предшествовали усилия многих людей различных профессий в разные эпохи. Перечислим в исторической хронологии некоторые особо значимые открытия и изобретения, а также примеры применения электричества и вспомним их создателей.

В древней Греции на стыке VII–VI вв. до н. э. ученый Фалес Милетский натирал обрезком меховой шкурки кусок янтаря, после чего тот получал способность притягивать к себе всевозможные легкие предметы. Спустя столетия элементарная заряженная частичка стала называться электроном (*греч.* – янтарь) [2].

Основоположником науки о магнетизме считается англичанин У. Гильберт (1540–1603). В 1600 г. вышел его труд «О магните, магнитных телах и большом магните – Земле», в котором он описал различные полюса у магнита (северный и южный) и поведение одноименных и разноименных полюсов [1].

**Предпосылки к созданию электрических машин.** Считается, что история ЭМ начинается в 1821 г. с создания М. Фарадеем ЭД, представляющего собой постоянный магнит, вокруг которого вращался проводник с током. Открытие Фа-

радея не было случайностью, оно было подготовлено трудами многих ученых-физиков и даже коллективов ученых.

В 1650 г. О. Герике описал первую ЭМ трения, состоящую из сделанного из серы шара, который при вращении нагирался ладонями рук. В начале XVIII в. Ф. Гауксби выполнил замену шара из серы на полый стеклянный шар. В 1743 г. в эту машину был введен скользящий контакт, и она стала непрерывно отдавать электрическую энергию [3].

Атмосферным электричеством много занимались Б. Франклин, Г. В. Рихман и М. В. Ломоносов [2]. В 1785 г. Ш. Кулон описал закон взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов [4]. В это же время в России инженерами-изобретателями А. Т. Болотовым и И. П. Кулибиным [2] создавались переносные емкостные ЭМ, используемые для лечения больных и проведения психологических опытов. Они продолжали развиваться и в XIX–XX вв., но как силовые ЭМП применялись только индуктивные ЭМ, а о емкостных ЭМ практически забыли.

Итальянский физик А. Вольта в 1799 г. сконструировал электрохимический генератор – вольтов столб, состоящий из металлических дисков, разделенных смоченными в кислоте прокладками [4].

В 1802 г. русский академик В. В. Петров построил батарею из 4200 медных и цинковых пластин. Он был первым в истории, кому удалось наблюдать электрическую дугу. Экспериментальные работы, выполненные с вольтовым столбом, дали возможность изучить магнитное и тепловое действие электрического тока [3].

В 1813 г. датчанин Х. К. Эрстед (1777–1851) издал труд о влиянии электричества на магнит [4], а в 1820 г. им же были выполнены ряд опытов, позволивших ему открыть совершенно новое явление – образование магнитного поля вокруг проводника при протекании по нему электрического тока. Произошло это на одной из его лекций по физике, когда он решил доказать слушателям отсутствие взаимосвязи между электричеством и магнетизмом, и когда магнитная стрелка начала отклоняться после включения тока, Эрстед принял это случайно полученное явление как факт, установленный экспериментально. Результат своего исследования, Эрстед описал в знаменитой книге «О воздействии электрического конфликта на магнитную стрелку» [5], которая впоследствии была опубликована в Копенгагене на шести языках. Его опыты привлекли многих ученых и исследователей к открытию новых явлений.

В августе 1820 г. Андре Мари Ампер (1775–1836) [2], который узнал об опытах Эрстеда от ученого секретаря Парижской академии наук Ф. Араго, присутствовавшего на одной из публичных демонстраций данного эксперимента [6], сумел дать им правильное толкование. В том же 1820 г. Ампер сообщает обществу о взаимодействии двух проводников с током и формулирует закон этого взаимодействия. В течение короткого периода времени им были выполнены ряд важнейших исследований, которые подтвердили его мысли. Позднее Ампер систематизировал результаты своих научных исследований в книге «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта» [7], которую он издал в 1826 г. В 1822 г. Ампер открыл магнитный эффект катушки с током, установив, что любой проводник, по которому течет ток, создает вокруг себя магнитное поле [3].

В конце 1820 г. Ф. Араго выполнил исследования, из которых наиболее важным было открытие в 1824 г. явления магнетизма вращения [4], которое в дальнейшем послужило фундаментом для изобретения ЭД переменного тока. А в 1821 г. им была впервые выдвинута идея вращающегося магнитного поля.

В том же 1820 г. французские ученые-физики Ж. Био (1774–1862) и Ф. Савар (1791–1841) экспериментально установили и доказали создание электрическим током магнитного поля, а также сформулировали закон, по которому ток действует, а математическое описание данного явления выполнил П. Лаплас (1749–1827).

В 1821 г. английский физик Майкл Фарадей (1791–1867) [8], выполнив исследования взаимодействия проводников с электрическим током и магнитом, доказал, что ток заставляет проводник вращаться вокруг магнита, тем самым утвердив принципиальную возможность создания ЭД. Фарадей поставил огромное количество экспериментов и впоследствии сделал целый ряд открытий в области электромагнетизма. Его открытия лежат в основе создания ЭД и электрогенераторов (ЭГ), трансформаторов, электролиза, оптических и других явлений. Им доказана неразрывная связь электричества и магнетизма. Превосходное мастерство Фарадея и его одержимость дали результат – через 11 лет после проведения опытов Эрстедом 17 окт. 1831 г. [4] он открыл и на лекции в Королевском институте объяснил еще никому неизвестное физическое явление, названное электромагнитной индукцией, а затем сформулировал

закон электромагнитной индукции. Через несколько дней после открытия этого явления Фарадей представляет проект на бумаге и создает первый в мире электрогенератор, получивший название диска Фарадея. Опыты Фарадея показали, что электромагнитная индукция возникает и в подвижном, и в неподвижном проводнике в зависимости от рода магнитного поля. Он доказал, что ток образуется только при движении проводника поперек силовых линий магнитного поля. Открытие Фарадеем явления электромагнитной индукции, без сомнений, относится к одним из самых значимых событий XIX в. Принцип электромагнитной индукции лежит в основе работы всех трансформаторов, ЭГ и ЭД.

В 1825 г. В. Стерджен изобрел магнит с железным сердечником, давший возможность получить более сильные магнитные поля [9].

Последующие исследования электромагнитной индукции привели к формулированию русским ученым Э. Х. Ленцем (1804–1865) в 1832 г. [5] закона о направлении индуктированного тока, который позволял определять направление этого тока и позволил ученому открыть принцип обратимости ЭМ. Работы Ленца и Фарадея дали возможность создать первые в мире ЭГ и ЭД.

Современники М. Фарадея – английский ученый-физик Д. Джоуль (1818–1889) и русский ученый Э. Х. Ленц, в одно время, независимо друг от друга, установили закон, определяющий тепловое действие электрического тока. Спустя десятилетия Д. К. Максвелл (1831–1879) развил идею Фарадея, облек ее в точную математическую форму, создав математический аппарат теории электромагнитных взаимодействий – четыре теоремы, которые и по сей день широко используются и не подвергаются сомнению в мире инженеров-электромехаников [1].

Открытия и эксперименты А. Ампера, Д. Араго, Г. Эрстеда, Г. Ома, М. Фарадея и других ученых-изобретателей послужили толчком для изобретательской фантазии инженеров-электриков. Важнейшим этапом в развитии электроэнергетики стало создание и применение ЭМ.

Интересно рассмотреть основные этапы создания и развития ЭМ.

Основные устройства в технике и промышленности, которые используют при своей работе явление электромагнитной индукции, – это ЭГ, ЭД. Сперва развитие ЭГ и ЭД шло различными путями, и это в полной мере сопоставлялось с состоянием науки о магнетизме и электричестве

того периода: обратимость ЭМ была открыта в 30-х гг. XIX в., но ее практическое применение в широких масштабах началось лишь в 70-е гг. XIX в. Из-за этого рассмотрение отдельно друг от друга истории развития ЭД и ЭГ в период до 1870 г. правомерно.

Рассмотрим и проследим исторические этапы создания этих устройств и отметим авторов, разработавших их.

**Этапы развития ЭГ постоянного тока.** Расширение сферы использования электричества тормозилось отсутствием надежного и экономичного источника электрического тока. Первыми ЭГ, наиболее распространенными в период до 1870 г., были гальванические элементы, которые давали постоянный электрический ток. Использование постоянного тока и работа только на нем стали причиной того, что ученые-разработчики первых ЭМ были нацелены на получение от своих изобретений исключительно постоянного тока. Только создание совершенной конструкции ЭГ смогло решить проблему разработки экономичного источника электроэнергии.

Период создания и развития ЭГ, за который он получил все черты, присущие современной ЭМ, – это время с 1831 по 1886 гг. В течение этого периода ЭМ постоянного тока прошла четыре этапа своего развития:

1. Применение постоянных магнитов в магнитоэлектрической машине.
2. ЭМ с использованием магнитов с независимым возбуждением.
3. Самовозбуждение и элементарные якоря в ЭМ.
4. Усовершенствование якоря и магнитной системы в ЭМ.

Начальный этап развития ЭГ охватывает период с 1831 по 1851 гг., когда ЭМ из демонстрационного механизма учебных классов доросла до промышленной модели, которая была применена для целей освещения и электрохимии.

Имя первого изобретателя ЭГ, принцип действия которого был основан на явлении электромагнитной индукции, остается неизвестным и по сей день. Случилось это следующим образом: спустя некоторое время после озвучивания Фарадеем открытия явления электромагнитной индукции ученый обнаружил в своем почтовом ящике письмо, подписанное буквами латинского алфавита Р. М., к нему также был приложен чертеж. Как выяснилось позже, загадочное письмо содержало описание первого в мире синхронного

ЭГ, имевшего возбуждение от постоянных магнитов [4]. Изучив присланный проект, Фарадей, в надежде на то, что неизвестный автор обнаружит свой проект первого ЭГ опубликованным, отослал полученное письмо вместе с чертежом в журнал, где ранее был опубликован его знаменитый доклад. Спустя пять месяцев Р. М. направил в редакцию журнала пояснения к предложенной им ранее конструкции ЭГ, но имени своего так и не назвал. Таким образом, человечество, несмотря на скрупулезные поиски историков электротехники, до сих пор не ведает, кто же был автором одного из важнейших изобретений. Основные черты ЭМ Р. М. были обозначены настолько верно, что определили конструкцию ЭМ более поздних изобретателей-электриков, после чего началось бурное развитие синхронных ЭГ переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов.

В 1832 г. в Париже братьями Пикси – сыновьями изобретателя физических приборов [5], была создана вращающаяся ЭМ, в состав которой впервые входил выпрямитель электрического тока в виде коромысла Ампера. ЭМ братьев Пикси и Р. М. имели один существенный в то время недостаток – вращение тяжелых постоянных магнитов, что и привело изобретателей следующих конструкций к мысли о вращении более легких катушек между магнитными полюсами, а также о закреплении вращающейся части выпрямителя на одном валу с якорем [3].

В 1833 г. профессором физики Лондонского университета В. Риччи [5] была построена ЭМ с применением вывернутого коллектора, которая, как и машина Пикси, вырабатывала пульсирующий ток. Эта ЭМ стала прародительницей всех машин, предназначенных для превращения вращательной энергии в электрическую, и именно ее следует считать родоначальницей поколения ЭМ, вырабатывающих электрический ток.

До 1840 г. различные ученые-изобретатели создавали магнитоэлектрические машины, представлявшие собой конструктивные модификации машины Пикси и Риччи и отличавшиеся конструктивом выпрямителей электрического тока.

Первым ЭГ, получившим свое практическое применение, был магнитоэлектрический генератор, построенный в 1842 г. русским академиком Б. С. Якоби (1801–1874), занимавшимся тогда усовершенствованием способов электрического взрывания мин.

В том же 1842 г. Д. С. Вулрич создал мощный ЭГ постоянного тока, соединенный ременной передачей с паровой машиной, который использо-

вался для питания гальванических ванн. 1842 г. можно по праву считать годом рождения электрооборудования промышленных предприятий [1].

Изобретатели, стремясь увеличить мощность ЭМ, увеличивали количество магнитов и катушек. Сильнейшим толчком к созданию более мощных магнитоэлектрических генераторов послужили дуговые лампы с регуляторами. Последней модификацией магнитоэлектрической машины переменного тока первого периода развития ЭГ стала ЭМ производства «Compagnie L'Alliance», которую в 1851 г. сконструировал Ф. Хольмсе [4]. Она была одобрена Фарадеем и использовалась для целей электрохимии, а также для освещения зданий и маяков. В период с 1857 по 1865 гг. в промышленной эксплуатации находилось порядка 100 ЭМ «Альянс», принципиальный недостаток которых состоял в том, что вырабатываемый ими ток был резко пульсирующим, поэтому в последующие годы усилия изобретателей были направлены на создание ЭГ, вырабатывающих строго постоянный ток, для чего была необходима разработка совершенно новых коммутационных устройств.

Идея замены постоянных магнитов на электромагниты, которые возбуждались бы электрическим током от магнитоэлектрической машины, впервые высказал В. Зинстеден в 1851 г. [4]. Так стартовал второй этап развития ЭГ, который относится к промежутку времени с 1851 по 1867 гг. Его характерной чертой можно считать переход к ЭМ с возбуждением электромагнитов посредством стороннего или независимого источника, что положительно сказалось на постоянстве работы ЭГ и их относительной массе. В период с 1861 по 1867 гг. англичанин Г. Уайльд [5] технически разработывает принцип применения в ЭМ электромагнитов с питанием их от магнитоэлектрической машины.

К этому же промежутку времени относится важнейшее усовершенствование конструкции магнитоэлектрической машины, а именно создание В. Сименсом (1816–1892) в 1856 г. двух-Т-образного якоря [4], а также изобретение в 1860 г. кольцевого якоря итальянским электротехником А. Пачинотти (1841–1912). Якорь Сименса позволил улучшить работу магнитоэлектрической машины и предшествовал зубчатому цилиндрическому якорю, а кольцевой якорь с пазами, разработанный Пачинотти, стал громадным шагом вперед.

Для третьего этапа развития ЭГ, который охватывает временной промежуток с 1867 по 1871 гг., характерно открытие В. Сименсом в

1867 г. принципа самовозбуждения ЭМ, авторство которого на самом деле принадлежит судебному чиновнику С. Хиорту (1801–1870) [4], абсолютно четко сформулировавшему его еще в 1851 г., а в 1854 и 1855 гг. получившему патент и построившему первый ЭГ с самовозбуждением, доказав, что можно обойтись и без постоянного магнита. Многие ученые одновременно и независимо друг от друга вели научную деятельность, связанную с самовозбуждением ЭМ. К их числу помимо С. Хиорта и В. Сименса принадлежат: Ч. Уитстон, С. Варлей, Д. Мюррей, А. Йедлик, Н. Каллан, М. Г. Фармер и др.

В 1867 г. В. Сименс и Ч. Уитстон выступили с предложениями принципа самовозбуждения, а Максвелл тогда же представил обществу доклад об этом принципе. И все-таки В. Сименс, глава ведущего мирового электротехнического концерна, обеспечил широкую дорогу для промышленного изготовления ЭГ с самовозбуждением, именуемых в дальнейшем динамо-машинами, и тем самым поспособствовал мощному развитию ЭМ.

Таким образом, с введением принципа самовозбуждения отпала необходимость в отдельном ЭГ для питания обмотки электромагнита.

Четвертый этап – период разработки основных элементов конструкции современной ЭМ, охватывает 15 лет – с 1871 по 1886 г. За это время ЭМ постоянного тока приобрела все основные черты современной конструкции ЭМ. Первой решительной подвижкой в этом направлении было практическое внедрение бельгийским ученым-изобретателем Т. Граммом (1826–1901) [5] кольцевого якоря, разработанного А. Пачинотти. ЭМ Грамма оказалась первой машиной с самовозбуждением, успешно показавшей себя в промышленной эксплуатации.

В 1872 г. Ф. Гефнер-Альтенек [4] предложил созданный им барабанный якорь, который стал модификацией якорей Сименса и Грамма-Пачинотти. Такая довольно-таки сложная конструкция якоря с некоторыми усовершенствованиями применяется по сей день. Этот ЭГ быстро вытеснил генераторы других типов и получил широкое распространение.

В 1880 г. у Т. Эдисона появилась идея изготовления сердечников ЭМ шихтованными, т. е. набранными из тонких стальных листов, для снижения потерь на вихревые токи, что реализуется машиностроителями по сей день, а Х. Максим в этом же году предложил делить сердечник якоря на пакеты для улучшения охлаждения [3].

В 1882 г. Э. Вестон получил патент на двухслойную обмотку якорей ЭМ постоянного тока, а в 1883 г. Д. Крег предложил для улучшения коммутации изготавливать сердечники полюсов штампованными из листового материала [4]. В 1884 г. была разработана компенсационная обмотка, а годом позже – добавочные полюсы ЭМ постоянного тока.

В течение 70–80-х гг. XIX в. ЭМ постоянного тока приобрела все основные черты современной машины. Дальнейшие улучшения не касались основных принципов и конструктивных узлов ЭМ, а были направлены на повышение качества, улучшение использования активных материалов и усовершенствование изоляционных материалов.

Последующие усовершенствования синхронных ЭГ связаны с обширным применением системы трехфазного электрического тока, которая получила развитие в конце XIX в. благодаря научным трудам нашего соотечественника, ученого и инженера М. О. Доливо-Добровольского.

Развитие ЭМ наглядно показывает характерную взаимосвязь в развитии техники в целом, которая проявляется следующим образом: если развитие какой-то отрасли техники приостанавливается из-за недостаточного уровня другой отрасли техники или науки, то развитие последней подстраивается и ускоряется требованиями первой. Так, если отсутствие экономичного ЭГ сдерживало расширение практического применения электричества, то последнее стимулировало, ускоряло создание более совершенной конструкции ЭГ.

**Этапы развития ЭД постоянного тока.** Начало конструированию ЭД – важнейшему этапу в развитии электроэнергетики, положил принцип превращения электрической энергии в механическую, который был сформулирован М. Фарадеем в 1822 г. История создания ЭД представляет собой длинную и сложную цепочку находок, изобретений и открытий. В истории создания ЭД можно отметить три достаточно условных этапа. Условных, потому что конструкции и принципы работы ЭД, характерные для одного периода времени, иногда появлялись вновь через много лет. В то же время, более поздние и более современные конструкции в их зачаточной форме часто встречаются в первоначальном периоде развития ЭД. Проследим эти три этапа развития ЭД.

Первый этап развития ЭД охватывает промежуток времени с 1821 по 1834 гг. и характеризуется созданием физических моделей, подтверждающих принципиальную возможность преоб-

разования электроэнергии в механическую энергию. Множество ученых-изобретателей стремились в своих разработках ЭД скопировать схему работы паровой машины с возвратно-поступательным движением, и каждый предлагал свою конструкцию. Например, в книге П. Барлоу «Исследование магнитных притяжений», которую он опубликовал в 1824 г. [3], исследователь описывает устройство, названное впоследствии колесом Барлоу и ставшее одним из исторических памятников предыстории создания ЭД. Оно не получило практического использования и по сей день остается лабораторной демонстрационной установкой. Американец Д. Генри в 1831 г. опубликовал статью «О качательном движении, производимом магнитным притяжением и отталкиванием» [4], а в 1832 г. предложил модель двигателя с возвратно-поступательным движением, в котором подвижный электромагнит по очереди притягивался к постоянным магнитам и отталкивался от них, тем самым замыкая и размыкая батареи гальванических элементов [1]. Еще одним примером конструкции ЭД первого этапа может служить прибор, описанный англичанином У. Риччи в 1833 г. [10]. Это был прообраз современного коллектора. Существовало еще множество попыток построения двигателей с качательным движением якоря, но все-таки более прогрессивными оказались попытки создать ЭД с вращающимся якорем.

Второй этап развития ЭД с 1834 по 1867–1870 гг. характеризуется созданием конструкций ЭД с вращающимся явнополюсным якорем [9] для практических целей с питанием от хорошо известных гальванических элементов. В мае 1834 г. русским академиком Б. С. Якоби был создан первый в мире многополюсный ЭД постоянного тока с вращательным движением якоря, имеющий устройство для переключения электрического тока – коллектор. Якоби, ввиду своеобразности элементов новизны своей машины, сравнивает ее с паровой машиной в созвучном той эпохе духе: «Механизм мотора очень несложен по сравнению с паровой машиной: нет ни цилиндра, ни поршня, ни клапанов, изготовление которых требует очень тонкой работы и стоит больших средств; нет также трения, из-за которого теряется больше половины всей производимой работы; в этой машине потерю составляет только трение в подшипниках. Далее, машина эта дает непосредственное постоянное круговое движение... кроме того, нет опасности взрыва» [10].

В 1838 г. Якоби построил магнитоэлектрический двигатель новой конструкции, который был испытан в Санкт-Петербурге на реке Неве для приведения в движение лодки с 16 пассажирами против течения реки, т. е. получил свое первое практическое применение [1] и, кроме того, положил начало электродвижению судов.

Однако русский ученый оказался не первым создателем подобной конструкции ЭД. В 1837 г. американским техником Т. Девенпортом [10] также был построен ЭД с непосредственным вращением якоря, который оказался более компактным благодаря тому, что подвижные и неподвижные части ЭД помещались в одной плоскости.

Испытания ЭД Якоби подтвердили возможность практического использования ЭД, но одновременно с этим обнаружили, что при питании ЭД током от гальванических батарей (а на лодке Якоби была установлена батарея из 320 гальванических элементов) механическая энергия получается очень дорогой. Это привело ученого к выводу, что использование ЭД находится в прямой зависимости от удешевления электрической энергии, т. е. от создания генератора более экономичного, чем гальванические батареи.

Третий этап развития ЭД охватывает период времени с 1867 по 1887 гг. и связан с открытием и применением на практике принципа самовозбуждения и окончательным осознанием принципа обратимости ЭМ. Питание ЭД теперь стало выполняться от ЭГ постоянного тока – более дешевого источника электроэнергии. На этом этапе необходимо отметить ЭД итальянца А. Пачинотти, в котором явнополюсный якорь был заменен на неявнополюсный. Барабанный якорь, в котором рабочим является проводник, составляющий виток, был изобретен В. Сименсом лишь в 1872 г., а через 10 лет в железе якоря появились обмоточные пазы (1882 г.). Барабанный якорь ЭМ постоянного тока стал таким, каким мы его видим в настоящее время

В 1867 г. Г. Уайльдом сформулирован принцип работы синхронного ЭД и показано синхронное вращение двух электрически связанных якорей постоянного тока. В 1883 г. Айртоном и Пири опубликована их совместная работа по управлению скоростью вращения ЭД постоянного тока, где впервые были представлены основные математические выражения, связывающие скорость вращения с электромагнитными величинами [1]. Уже к 1886 г. ЭД приобрел основные черты современной конструкции двигателя.

Несмотря на то, что ЭМ постоянного тока и сам постоянный ток постепенно отодвигался на второй план, работы по их совершенствованию все равно не прекращались. В 1891 г. Э. Арнольд предложил использовать последовательно-параллельную обмотку. Ему же принадлежит авторство общих правил выполнения и формул обмоток, а также исследований вопросов коммутации ЭМ постоянного тока и поведения щеточного контакта. В 1899 г. все тем же Э. Арнольдом совместно с Г. Ми создается теория коммутации ЭМ, не потерявшая своего значения до настоящего времени.

В дальнейшем ЭД все более и более совершенствовался. По роду электрического тока ЭД стали разделяться на ЭМ переменного и постоянного тока. В конце XIX в. в связи с развитием центральных электрических станций ЭД постоянного тока стали массово устанавливаться на крупных заводах Европы и полностью вытеснили дорогой и ненадежный ременной или цепной привод. Лидером по изготовлению ЭД постоянного тока в Германии были «Немецкие электрические заводы» в г. Ахен. В конце XIX в. в Швейцарии серия ЭД средней и большой мощности производилась на фирме «Эрликон», а в Америке были широко распространены ЭД небольшой мощности – такие, как двигатели конструкции Ф. Спраги [5].

Необходимо также отметить, что в начале XX в. история практической эксплуатации ЭД не достигла еще и 15-летнего возраста, а темпы и массовость их применения были очень значительными. Кроме того, в связи с массовым применением ЭД центральные городские электростанции, которые работали преимущественно в темное время суток для целей электрического освещения, получили возможность значительно более рационально использовать мощности своих ЭГ, производя электрическую энергию и в дневное время для питания многочисленных ЭД. Приход XX в. ознаменовался массовым использованием электропривода постоянного тока в различных отраслях промышленности.

**Этапы развития электрических машин переменного тока.** Создание ЭГ и ЭД на постоянном токе решало многие вопросы энергетики, существующей в то время, но передача электроэнергии на дальние расстояния оказалась затруднительной. Получение переменного тока никогда не вызывало принципиальных трудностей. Описанный ранее генератор Р. М., созданный в 1832 г. был, как отмечалось ранее, первым многополюсным синхронным ЭГ, однако все последующие

работы в области ЭМ были нацелены на разработку конструкций коммутирующих устройств, т. е. на превращение ЭГ переменного тока в ЭГ постоянного тока. Так как переменный ток достаточно длительное время не находил практического применения, то попытки спроектировать ЭМ переменного тока до конца 70-х гг. XIX в. носили эпизодический характер. Как правило такие генераторы представляли собой ЭМ постоянного тока, которые вместо коллектора имели контактные кольца.

В 1870 г. была создана конструкция асинхронных ЭД переменного тока, появление которых позволило необыкновенно расширить области практического использования электроэнергии.

Наиболее ощутимый толчок работам в области ЭМ переменного тока дала электрическая свеча Яблочкова. В 1878 г. русский академик П. Н. Яблочков вместе с инженерами завода Грамма [4] создал конструкцию двухфазного синхронного генератора с несвязанными фазами для питания переменным электрическим током изобретенных им свечей. Изобретенный Яблочковым генератор стал прообразом современного синхронного генератора. Яблочков предлагал и другие, не сыгравшие заметной роли, варианты конструкций ЭГ переменного тока – такие, как генератор с возвратно-поступательным движением якоря (1876 г.) [10] и индукторные генераторы (1877 и 1881 гг.) [10].

В 1879 г. Бейль сконструировал ЭД, в котором прерывисто-вращающееся магнитное поле создавалось двумя коммутированными токами от гальванической батареи [4], а в 1880 г. француз М. Депре осуществил аналогичным образом синхронную передачу движения, которая была необходима для развития и промышленного применения переменного тока.

В качестве еще одной из наиболее крупных для своего времени ЭМ переменного тока можно отметить генератор, созданный в 1882 г. английским инженером Д. Гордоном.

В том же 1882 г. русский электротехник И. Ф. Усагин, а в 1884 г. французский инженер Болард создали трансформатор напряжения [1] – устройство для повышения или понижения напряжения.

В 1885 г. итальянский ученый Г. Феррарис (1847–1897) [2] предложил применять двухфазный ток, дающий возможность получения вращающегося магнитного поля, и построил ЭД переменного тока. К открытию эффекта вращающегося магнитного поля в современном его понимании пришел, независимо от Феррариса, и серб

ский ученый-изобретатель Н. Тесла (1856–1943) [5], у которого еще в 1882 г. появилась идея создания бесколлекторного ЭД переменного тока. А в 1888 г. Н. Тесла построил, исходя из принципа вращающегося магнитного поля, двухфазные ЭГ и ЭД переменного тока, благодаря которым удалось создать систему из двухфазного генератора, трансформатора и двигателя, которая требовала четырех проводов для передачи электроэнергии и использовалась долгое время на Ниагарской гидростанции в США. Встретившиеся на пути Н. Теслы экономические и технические трудности притормозили внедрение двухфазной системы в практику.

Дальнейшее и чрезвычайно успешное развитие система переменного тока получила благодаря работам русского изобретателя М. О. Доливо-Добровольского (1862–1919), который в 1888 г. создал трехфазную систему переменного тока, получившую признание и распространение во всем мире как наиболее удобная и экономичная. В 1889 г. им же был построен трехфазный асинхронный короткозамкнутый двигатель, а в 1890 г. – трехфазный синхронный генератор. Трехфазная система, которая состояла из трехфазных ЭГ, ЭД и трансформатора, требовала для передачи и распределения электроэнергии всего трех проводов, в отличие от четырехпроводной системы Теслы. При помощи этой системы на Международной электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне в 1891 г. была продемонстрирована передача трехфазного тока на расстояние 170 км [1]. А в 1893 г. все тем же Доливо-Добровольским был разработан асинхронный двигатель с двойной беличьей клеткой, имеющий улучшенные пусковые свойства. Таким образом, его по праву можно назвать отцом трехфазных систем.

Одновременно с созданием системы трехфазного тока изобретателем Яблочковым разрабатывалась система дробления электрической энергии и в 1889 г. создан первый в мире силовой трансформатор.

В 1891 г. Н. Тесла сконструировал первый так называемый резонансный трансформатор, или трансформатор Теслы [6], позволяющий получать высокочастотные колебания напряжения, первым указал на физиологическое действие токов высокой частоты и исследовал возможность беспроводной передачи сигналов и энергии на значительные расстояния, а в 1899 г. публично продемонстрировал лампы и двигатели, работающие на высокочастотном токе без проводов.

Создание ЭГ, ЭД и трансформаторов требовало изучения свойств материалов: изоляционных, металлических и магнитных, создания их теории. Первыми в этом направлении считаются работы профессора Московского Университета А. Г. Столетова (1839–1896) [6], который в конце 80-х гг. XIX столетия обнаружил петлю гистерезиса и доменную структуру у ферромагнитных материалов, а П. Кюри в 1895 г. [6] доказал существование у ферромагнетиков критической температуры – точки Кюри, выше которой происходит исчезновение доменной структуры и потеря ферромагнетизма.

В 1893 г. Х. Гергесом была разработана схема каскадного соединения асинхронных ЭМ, Р. Даландером – схема с переключением числа полюсов, а М. Лебланом – пусковые и успокоительные клетки синхронных ЭМ. В 1901 г. М. Леблан создает фазокомпенсатор и одновременно с ним А. Гейланд и М. Оснос строят первые компенсированные двигатели [4].

В 1910 г. независимо и одновременно К. Шраге и Р. Рихтер [10] изобретают шунтовой регулируемый трехфазный коллекторный двигатель, завоевавший широкое признание промышленников и давший совершенное решение многих технических проблем.

Открытия и изобретения, касающиеся ЭМ и описанные в данной статье, завершили историю создания электрических машин до тех принципиальных и конструктивных стадий, на которых в настоящее время находятся современные ЭМ. Безусловно, составляющие части электрических машин, созданных гениями-изобретателями середины XIX – начала XX вв. многократно подвергались каким-либо изменениям, ведь прогресс не стоит на месте, однако суть изобретений сохранялась. После этих изобретений процесс развития ЭМ пошел по пути углубления их теории и методов расчета. Огромное внимание ученых и инженеров начала, середины и второй половины XX в. было уделено развитию методов исследования ЭМ, улучшению качества и применению современных и актуальных для своего времени материалов. Следует отметить, что на ход этого стремительного развития оказывали существенное влияние многие экономические, а иногда и политические факторы.

В начале и середине XX в. инженеры-промышленники стали выстраивать каскады из собираемых ими электрических машин, положив тем самым начало промышленного внедрения

электропривода, без которого невозможно себе представить жизнь современного человека.

Наряду с этим внедрение огромного количества автоматических и телемеханических компонентов в производственные процессы потребовало разработки ЭМ малой мощности – так называемых микро-электромашин, которые в конце XX – начале XXI вв. достигли стадии весьма быстрого развития.

**Этапы развития теоретических основ науки об электрических машинах.** Одновременно с созданием ЭМ развивалась и теория электромеханического преобразования энергии, которой в разное время касались Г. Ом, Г. Гельмгольц, Э. Ленц, А. Ампер, М. В. Ломоносов и множество других известных ученых-физиков. Огромные успехи в развитии теории электромагнетизма принадлежат Максвеллу, изложившему математический аппарат теории электромагнитного поля в своей публикации «Трактат об электричестве и магнетизме» [3], который стал фундаментом теории электромагнитного преобразования энергии и используется по сей день инженерами-электромеханиками, занятыми в выполнении расчетов ЭМ.

Первой публикацией по конструированию ЭМ считается работа Э. Арнольда по теории и проектированию обмоток ЭМ, опубликованная в 1891 г.

В середине 90-х гг. XIX в. Г. Каппа, М. О. Дольво-Добровольский и другие исследователи создали основу теории и методологии проектирования трансформаторов [11].

Огромное значение приобрели в 1893 г. работы Г. Феррариса в области теории трансформаторов и однофазных двигателей. Нельзя не упомянуть разработку символического метода И. П. Штейнметцом в 1897 г. и метода симметричных составляющих Ч. Фортескью в 20-е гг. XX в., имеющих огромное значение для создания новых ЭМ [3]. Первым обобщающим эти методы трудом была вышедшая в 1936 г. на русском языке книга электротехников из США К. Ф. Вагнера и Р. Д. Эванса [11].

К концу 20-х гг. XX в. вышли фундаментальные книги К. И. Шенфера, Э. Арнольда, Р. Рихтера по теории и проектированию ЭМ постоянного и переменного тока. К 1930-м гг. в работах В. А. Толвинского, Л. Дрейфуса, А. Блонделя, Э. Арнольда, К. А. Круга, М. Видмара, М. П. Костенко была довольно полно разработана теория установившихся режимов ЭМ [3].

Первым фундаментальным трудом по переходным процессам в ЭМ была монография Р. Рюденберга, опубликованная в 1923 г. в Германии и переведенная на русский язык. В ней была показана возможность представления мгновенных

значений переменных в многофазных обмотках ЭМ единичными пространственными векторами. Позже на основании теории Рюденберга электротехники из Венгрии И. Рац и К. П. Ковач создали теорию переходных процессов в ЭМ переменного тока [11].

Важным этапом развития теории ЭМ была публикация в 1929 г. Р. Г. Парка который вывел дифференциальные уравнения синхронной ЭМ.

Работа Г. Н. Петрова, опубликованная в 1934 г., стала базой для изучения переходных процессов в трансформаторах.

В 30–40-е гг. XX в. появляется фундаментальный труд Г. Крона по общей теории ЭМ, в котором он предлагает уравнения и математическую модель обобщенной машины, позволяющие выполнять анализ всех видов ЭМ. Работы Крона в значительной мере приподняли теорию ЭМ на следующую ступень развития [3].

Л. Н. Грузов в 1953 г. представил монографию, в которой описал особенности применения векторного анализа к исследованию ЭМ, сравнил различные преобразования координат с целью получения наиболее рациональных форм дифференциальных уравнений и их решений [11].

Обобщающим и последним научным трудом, посвященным применению аналитических методов решения дифференциальных уравнений ЭМ, стала работа Е. Я. Казовского, вышедшая в 1962 г.

Математическая модель обобщенной ЭМ была разработана И. П. Копыловым в 1963 г. и описывала ЭМ дифференциальными уравнениями для несинусоидального магнитного поля в воздушном зазоре, при учете любого числа контуров обмоток на статоре и роторе, для симметричных и несимметричных машин с учетом нелинейного изменения их параметров [11].

Следует отметить положительную роль, которую сыграла публикация в 1964 г. русского перевода монументального труда ученых из США Д. Уайта и Г. Вудсона по всем аспектам теории электромеханического преобразования энергии.

Весомый вклад в становление теории ЭМ и ее применение для анализа переходных и установившихся режимов работы ЭМ, устойчивости электромеханических и энергетических систем внесли и отечественные ученые: Н. Н. Щедрин, С. В. Страхов, А. А. Янко-Триницкий, И. И. Трещев, Р. А. Лютер, И. Д. Урусов, В. А. Веников, Л. Г. Мамиконянц, А. В. Иванов-Смоленский, И. А. Глебов [11].

**Заключение.** Электромашиностроение, несмотря на столь бурную историю развития, все-таки принадлежит к молодым отраслям челове-

ского знания. За время создания, развития и совершенствования ЭМ проделана огромная работа, преобразившая техническое и экономическое лицо современной промышленности и общественной жизни. Усовершенствования в ЭМ способствовали новым возможностям ее практического применения и стимулировали дальнейший прогресс и самое разнообразное использование электрической энергии, поэтому ЭМ ученые и инженеры уделяли столь большое внимание, и благо-

даря этому они быстрее приобрели техническую законченность своих конструктивных форм.

История создания и развития электрических машин или, попросту говоря, электромеханики, развивалась и продолжает развиваться быстрыми темпами, и в начале третьего тысячелетия наше поколение становится свидетелем появления абсолютно новых научно-технических направлений, которые смогут дать новые источники электрической энергии и послужить мощными импульсами для развития нашей цивилизации.

### Список литературы

1. Харламова Т. Е. История науки и техники. Электроэнергетика. СПб: СЗТУ, 2006. 126 с.
2. Белькинд Л. Д. История энергетической техники. 2-е изд. М.: ГЭИ, 1960. 664 с.
3. Копылов И. П. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1986. 360 с.
4. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Л.: Энергия, 1972. 544 с.
5. Бондаренко В. И., Варламов Г. Б., Вольчин И. А. Энергетика: история, настоящее и будущее. Киев: изд-во Киевского политехнич. ин-та, 2005. 304 с.
6. Веселовский О. Н., Шнейберг Я. А. Энергетическая техника и ее развитие. М.: Высш. шк., 1976. 304 с.
7. Кацман М. М. Электрические машины и трансформаторы. М.: Высш. шк., 1976. 181 с.
8. Алексеев А. Е. Конструкция электрических машин. М.: ГЭИ, 1958. 427 с.
9. Козярук А. Е. История развития электроэнергетики и электромеханики в России. СПб.: СПбГИ, 2000. 104 с.
10. Веселовский О. Н., Шнейберг Я. А. Очерки по истории электротехники. М.: МЭИ, 1993. 252 с.
11. Веселовский О. Н., Шнейберг Я. А. История электротехники / под ред. акад. РАН и АЭН РФ И. А. Глебова. М.: МЭИ, 1999. 523 с.

### Информация об авторах

**Колупицкий Константин Анатольевич** – ассистент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: barly.brend@gmail.com

**Самохвалов Дмитрий Вадимович** – канд. техн. наук, доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: dmitry.samokhvalov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5127-2511>

### References

1. Harlamova T. E. Istorija nauki i tehniki. Jelektrojenergetika. SPb: SZTU, 2006. 126 s. (In Russ.).
2. Bel'kind L. D. Istorija jenergeticheskoy tehniki. 2-e izd. M.: Gjel, 1960. 664 s. (In Russ.).
3. Kopylov I. P. Jelektricheskie mashiny. M.: Jenergoatomizdat, 1986. 360 s. (In Russ.).
4. Kostenko M. P., Piotrovskij L. M. Jelektricheskie mashiny. L.: Jenergija, 1972. 544 s. (In Russ.).
5. Bondarenko V. I., Varlamov G. B., Vol'chin I. A. Jenergetika: istorija, nastojashhee i budushhee. Kiev: izd-vo Kievskogo politehnic. in-ta, 2005. 304 s. (In Russ.).
6. Veselovskij O. N., Shnejberg Ja. A. Jenergeticheskaja tehnika i ee razvitie. M.: Vyssh. shk., 1976. 304 s. (In Russ.).
7. Kacman M. M. Jelektricheskie mashiny i transformatory. M.: Vyssh. shk., 1976. 181 s. (In Russ.).
8. Alekseev A. E. Konstrukcija jelektricheskikh mashin. M.: Gjel, 1958. 427 s. (In Russ.).
9. Kozjaruk A. E. Istorija razvitija jelektrojenergetiki i jelektromehaniiki v Rossii. SPb.: SPbGI, 2000. 104 s. (In Russ.).
10. Veselovskij O. N., Shnejberg Ja. A. Ocherki po istorii jelektrotehniki. M.: MJel, 1993. 252 s. (In Russ.).
11. Veselovskij O. N., Shnejberg Ja. A. Istorija jelektrotehniki / pod red. akad. RAN i AJeN RF I. A. Glebova. M.: MJel, 1999. 523 s. (In Russ.).

Information about the authors

**Konstantin A. Kolupitsky** – Assistant of the Department of Robotics and Automation of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.  
E-mail: barly.brend@gmail.com

**Dmitry V. Samokhvalov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Robotics and Automation of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.  
E-mail: dmitry.samokhvalov@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-5127-2511>

Статья поступила в редакцию 06.12.2023; принята к публикации после рецензирования 17.01.2024; опубликована онлайн 23.04.2024.

Submitted 06.12.2023; accepted 17.01.2024; published online 23.04.2024.

---