

Посвящается памяти

**КУВШИНОВА
ГЕННАДИЯ
ЕВГРАФОВИЧА**



**Бурков А. Ф.
A. F. Burkov**

КРАТКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДО КОНЦА XIX ВЕКА

BRIEF EVOLUTION OF ELECTRIC MACHINES TILL THE END OF THE XIXth CENTURY

Бурков Алексей Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Судовая энергетика и автоматика» Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, Россия, г. Владивосток, ул. Суханова, 8; тел. 8(423)265 24 29. E-mail: rectorat@dvfu.ru.

Mr. Aleksey F. Burkov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Ship Power Engineering and Automation Department, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanov str., 8; tel. 8(423)265 24 29. E-mail: rectorat@dvfu.ru.

Аннотация. Разработка и модернизация электрических машин, используемых в современных системах электродвижения судов, невозможны без анализа их эволюции в процессе развития судовой энергетики. В данной статье рассмотрен наиболее значимый исторический период, связанный с интенсивным совершенствованием систем электродвижения, затем нашедших применение на судах самого различного назначения. Приведённый материал позволяет проследить не только основные тенденции технической модернизации оборудования, но и наметить пути дальнейшего его улучшения. Статья является научной основой для начинающих исследователей, занимающихся вопросами проектирования и эксплуатации электромеханических преобразователей. Проанализированные информационные источники охватывают широкий диапазон отечественных и международных публикаций, начиная с самых первых сообщений о теоретических возможностях применения электроэнергии до практических реализаций, появившихся в конце XIX века и связанных с именем М. О. Доливо-Добровольского, который предложил первый трёхфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором в виде беличьей клетки.

Summary. Development and modernization of electric machines used in modern systems of electric propulsion of ships is impossible without an analysis of their evolution in the development of marine energy. This article describes the most significant historical period associated with the intensive improvement of electric propulsion systems, then found application on ships of various purposes. The given material allows to trace not only the main tendencies of technical modernization of the equipment, but also to outline ways of its further improvement. The article is a scientific basis for beginning researchers dealing with the design and operation of Electromechanical converters. The analyzed information sources cover a wide range of domestic and international publications, from the very first reports on the theoretical possibilities of using electricity to practical implementations that appeared at the end of the XIXth century and associated with the name of M. O. Dolivo-Dobrovolsky, who proposed the 1st three-phase asynchronous motor with squirrel cage rotor.

Ключевые слова: электрическая энергия, электротехника, электромеханический преобразователь.

Key words: electrical energy, electrical engineering, electromechanical converter.

Современное общество тесно связано с использованием электрической энергии (ЭЭ) в различных областях его деятельности.

Термин «энергия» в современном его смысле ввёл в науку в 1860 г. английский физик Уильям Томсон (William Thomson) (1824–1907), получивший за научные заслуги титул лорда Кельвина (Kelvin) [1; 2].

Предысторией проблемы преобразования различных видов энергии в электрическую и наоборот, использования ЭЭ явились физические природные явления, проводимые опыты, теоретические разработки и их практическая реализация в виде создания опытных образцов, экспериментальных устройств и промышленных установок.

В литературе по истории техники развитие электротехники условно разделяется на несколько исторических периодов. Например, в [1; 3] приведено следующее деление на условные периоды: до 1800 г. – становление электростатики; с 1800 по 1830 г. – период, в течение которого разрабатывались основы электродинамики, закладывался фундамент электротехники, её научные основы; с 1831 по 1870 г. – период, характеризующийся зарождением электротехники; с 1870 по 1891 г. – становление электротехники, как самостоятельной отрасли науки и техники; после 1891 г. – начало периода, когда решена проблема передачи ЭЭ переменного тока на расстояние.

Применительно к открытиям и исследованиям в области электротехники, касающимся создания и развития электрических машин (ЭМ), предлагается более тесно увязывать периоды открытий и исследований с историческими этапами общественного развития.

Середину 30-х гг. XIX в. можно отнести к объективным предпосылкам создания электро-механического преобразователя вращательного движения – электродвигателя (ЭД). Инспектор гавани в Пиллау Борис Семенович (Мориц Герман) Якоби (Moritz Hermann Jacobi) (1801–1874) обосновал преимущества такого преобразователя и обозначил контуры будущей машины, которую он первоначально называл магнитный аппарат [4]. Идя по пути усовершенствования магнитного аппарата 1834 г., Б. Якоби создал сдвоенный горизонтальный ЭД, достаточно полно описанный в литературе, например в [5; 6].

В начале 1837 г. американский изобретатель Томас Дэвенпорт (Tomas Davenport) (1802–1851) [7] создал конструкцию ЭД, подобную двигателю Б. Якоби и получил патент. Описание данного двигателя приведено в [6; 8]. Позднее Т. Дэвенпорт усовершенствовал свой ЭД, заменив неподвижные постоянные магниты неподвижными электромагнитами [9].

С учётом преимуществ конструкций двигателей Дэвенпорта Б. С. Якоби разработал ЭД с вертикальными валами [10]. Принцип действия его был аналогичен принципу действия двигателей, созданных Якоби в 1834 г., однако конструктивно двигатель претерпел большие изменения. Рисунков или чертежей этого ЭД обнаружить не удалось.

По данным, приведённым в [7], для практического применения ЭД в электроприводе (ЭП) Якоби, с учётом преимуществ конструкций двигателей Т. Дэвенпорта, разработал сдвоенный двигатель с вертикальными валами. В 1838 г. компоненты ЭД были готовы.

Общим недостатком ЭД Б. С. Якоби и Т. Дэвенпорта явилось изменение расстояния между подвижными и неподвижными полюсами электромагнитов в процессе работы. Таким образом, при значительных расстояниях между подвижными и неподвижными полюсами электромагнитов, несмотря на то, что по их обмоткам постоянно протекал электрический ток, сила взаимодействия между ними, зависящая от величины воздушного зазора, имела наименьшую величину.

Борис Николаевич Ржонсницкий (1909–1983) [11] так оценил деятельность Б. Якоби по созданию и развитию ЭД: «...Якоби в течение многих лет продолжал свои изыскания, побуждая трудиться над созданием нового двигателя многих русских исследователей и изобретателей, среди которых выделяются работы В. Кайданова...» [12].

В книге «Основы электропривода» Владимир Константинович Попов (1895–1948) [3] отметил: «...Первое применение электропривода имело место... на транспорте...» [13].

В 30-х гг. XIX в. Доминик Франсуа Жан Араго (Dominique François Jean Arago) (1786–1853) и Майкл Фарадей (Michael Faraday) (1791–1867) открыли и частично исследовали явление электромагнитного вращения [8].

Одной из основных причин, препятствующих развитию ЭД и ЭП в целом, являлось отсутствие экономически эффективных источников ЭЭ.

Б. Н. Ржонсницкий писал: «...Препятствием к широкому использованию электроэнергии для двигательных целей служили не недостатки в самих двигателях, а в источниках тока, расходовавших дорогостоящие цинк и электролиты и доводивших расходы на 1 л.с. до таких размеров, при которых “можно было считать, что электродвигатель обходится в 20-30 раз дороже паровой машины”...» [14].

Учитывая достоинства и недостатки основных электродвигательных устройств того времени, В. Кайданов предложил два варианта разработанного им ЭД [6; 8]. Эти ЭД, как и двигатели Б. Якоби и Т. Дэвенпорта, были первыми практически пригодными двигателями, которые представляли собой прототипы современных ЭД постоянного тока, принцип действия которых основан на взаимодействии магнитов. Вследствие больших потерь ЭЭ они имели низкий коэффициент полезного действия (КПД) и не имели постоянного момента вращения.

Английский физик Чарльз Уитстон (Charles Wheatstone) (1802–1875) [15] в 1841 г. сконструировал синхронный двигатель переменного тока [6] (термин синхронная машина был введён Чарльзом Протеусом Штейнмецем (Charles Proteus Steinmetz) (1865–1923) [16]). Принцип действия двигателя Ч. Уитстона был также основан на взаимодействии магнитов [6; 8]. ЭД Уитстона явился прообразом современных синхронных двигателей.

В 1853 г. Томасу Аллану в России была выдана привилегия на ЭД, конструкция которого в основном была заимствована у вертикальной компаундной паровой машины [6].

Электромеханические устройства с возвратно-поступательным движением, не дающие непосредственного вращения, явились неперспективными с точки зрения разработки и создания ЭД, не заслуживающими отдельного рассмотрения. Б. С. Якоби отмечал, что они будут «...не больше чем забавной игрушкой для обогащения физических кабинетов...», их «нельзя будет применять... с какой-нибудь экономической выгодой...» [17].

Дальнейшее развитие ЭД обусловлено изобретением кольцевого якоря.

Итальянский физик и изобретатель Антонио Пачинотти (Antonio Pacinotti) (1841–1912) [18] в 1860 г. впервые создал ЭД постоянного тока с кольцевым якорем [8; 19]. По результатам испытаний А. Пачинотти сделал вывод о возможности обратимости данной ЭМ [6].

В 1867 г. на Парижской выставке демонстрировался ЭД постоянного тока, сконструированный французским механиком Полем Густавом Фроманом (Paul-Gustave Froment) (1815–1865) [20]. Принцип действия этого двигателя был основан на притяжении железных полос электромагнитами, поочередно подключаемыми к гальванической батарее при помощи коммутатора [21]. Мощность ЭД достигала 0,74 кВт, а вес составлял около 75 кг [22].

В 1885 г. итальянский физик и электротехник Галилео Феррарис (Galileo Ferraris) (1847–1897) [23] открыл явление вращающегося магнитного поля, разработал и создал опытный образец двухфазного асинхронного двигателя (АД) [6; 8].

В 1887 г. сербский изобретатель Никола Тесла (Nikola Tesla) (1856–1943) [24], независимо от Г. Феррариса, открыл явление вращающегося магнитного поля и сконструировал несколько вариантов двухфазных и трёхфазных АД [6; 8]. В двухфазном двигателе обмотки статора были расположены в пространстве друг относительно друга на 90° . При подключении пар полюсных катушек индуктора двухфазного ЭД к переменному напряжению по ним протекали токи, сдвинутые по фазе на 90° . В этом случае появлялось вращающееся магнитное поле индуктора (статора). При взаимодействии вращающихся магнитных полей индуктора (статора) и ротора создавался вращающий момент. В трёхфазном АД обмотки статора были расположены в пространстве друг относительно друга на 60° .

Двигатели Тесла не нашли широкого применения даже после того, как была применена позаимствованная у русского электротехника Михаила Осиповича Доливо-Добровольского (1862–

1919) [5] распределённая обмотка [6]. Лондонский журнал «Electrical Review» писал: «...Система электродвигателей Тесла, по-видимому, будет совершенно вытеснена трёхфазными электродвигателями...» [25].

В 1889 г. М. О. Доливо-Добровольский предложил первый трёхфазный АД с короткозамкнутым ротором в виде беличьей клетки, на конструкцию которого он сделал патентную заявку. Этот двигатель был построен на заводе АЭГ (AEG) в Берлине [26; 27]. Доливо-Добровольский отмечал: «...Уже при первом включении выявилось ошеломляющее... действие. Электродвигатель, якорь которого имел диаметр около 74 мм и длину также около 74 мм и не обладал никакими особенными присоединениями к сети, мгновенно стал вращаться на полное число оборотов, и был совершенно бесшумен. Попытка остановить его торможением за конец вала от руки блестяще провалилась. ...Электродвигатели постоянного тока имели КПД по крайней мере на 10 % меньше...» [6]. Мощность этого двигателя составляла около 100 Вт [27].

Необходимо отметить, что до этого двигателя М. О. Доливо-Добровольского известные ЭД переменного тока при включении в сеть нужно было разгонять внешними силами до определённой скорости.

Создание трёхфазного переменного тока обусловило дальнейшее совместное развитие теории и практики источников ЭЭ, преобразователей, ЭД и систем управления.

В начале 1890 г. с целью уменьшения магнитного рассеяния обмотки статора был построен трёхфазный АД с обмоткой статора типа барабанного якоря мощностью до 2,2 кВт [6]. В том же 1890 г. французскими электриками М. Ютенем и М. Лебланом был изготовлен двухфазный ЭД переменного тока, у которого разность фаз создавалась при помощи конденсаторов – конденсаторный двигатель (Патент № 3968 Швейцарии, 1891 г.) [10].

В 1891 г. состоялась Международная электротехническая выставка во Франкфурте-на-Майне (Германия), для которой был изготовлен трёхфазный АД М. О. Доливо-Добровольского мощностью около 74 кВт. Двигатель имел четыре пары полюсов и был изготовлен на трёхфазные переменные напряжения 100 и 170 В частотой 40 Гц. Скорость вращающегося магнитного поля составляла 600 об/мин (62,8 рад/с) [6].

Несмотря на успешное испытание системы трёхфазного переменного тока, некоторые деловые круги, в первую очередь Европы и Америки, связанные с производством и использованием ЭЭ постоянного тока, пытались в силу своих возможностей препятствовать развитию переменного тока. Например, против внедрения переменного тока боролся в том числе и американский изобретатель Томас Алва Эдисон (Thomas Alva Edison) (1847–1931) [28]. Его фирма изготавливала электрическое оборудование постоянного тока и старалась доказать, что «...переменный ток противен божественной природе человека...» и что его действие смертельно опасно [29]. Однако все старания противников переменного тока оказались напрасными. Переменный ток стал быстро внедряться во всех отраслях промышленности.

В 1897 г. были разработаны и введены обмотки АД с переключением числа пар полюсов [30].

Таким образом, в статье на основании сбора и анализа исторических и технических сведений, предпринята попытка исследовать вопросы, связанные с возникновением и развитием ЭД до конца XIX в. С определённой степенью достоверности выделены основные предпосылки, оказавшие влияние на создание и развитие ЭД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веселовский, О. Н. Энергетическая техника и её развитие / О. Н. Веселовский, Я. А. Шнейберг. – М.: Высш. шк., 1976. – 304 с.
2. Кириллин, В. А. Страницы истории науки и техники / В. А. Кириллин. – М.: Наука, 1986. – 512 с.
3. История энергетической техники СССР / ред. комиссия Л. Д. Белькинд и др. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957. – Т. 1 – 3.
4. Радовский, М. И. Борис Семенович Якоби / М. И. Радовский. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 136 с.
5. Шателен, М. А. Русские электротехники XIX века / М. А. Шателен. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 449 с.

6. Гусев, С. А. Очерки по истории развития электрических машин / С. А. Гусев. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 216 с.
7. Яроцкий, А. В. Борис Семенович Якоби. 1801–1874 / А. В. Яроцкий. – М.: Наука, 1988. – 240 с.
8. Бурков, А. Ф. История электротехники до конца XIX века. Электрические машины / А. Ф. Бурков. – Владивосток: Мор. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского, 2006. – 154 с.
9. Силиман, Б. О машине Дэвенпорта, 1838 / Б. Силиман // Электродвигатель в его историческом развитии: документы и материалы / Д. В. Ефремов, М. И. Радовский; под ред. В. Ф. Миткевича. – М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1936. – С. 261-262.
10. Кабинет физики СПбАПО – Биография физиков [Электронный ресурс]. – URL: <http://edu.delfa.net/Interest/biography/G/guericke>.
11. Ржонсницкий Борис Николаевич [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ржонсницкий,_Борис_Николаевич.
12. Ржонсницкий, Б. Н. Электромагнетическая машина В. Кайданова / Б. Н. Ржонсницкий // Электричество. – 1949. – № 1. – С. 73-75.
13. Попов, В. К. Основы электропривода / В. К. Попов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1945. – 672 с.
14. Ржонсницкий, Б. Н. Дмитрий Александрович Лачинов / Б. Н. Ржонсницкий. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 107 с.
15. Уитстон Чарльз [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Уитстон,_Чарльз.
16. Штейнмец Чарльз Протеус [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Штейнмец,_Чарльз_Протеус.
17. Якоби, Б. С. Памятная записка о применении электромагнитной силы для приведения в движение машин, 1835 / Б. С. Якоби // Электродвигатель в его историческом развитии: документы и материалы / Д. В. Ефремов, М. И. Радовский; под ред. В. Ф. Миткевича. – М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1936. – С. 148-209.
18. Пачинотти Антонио [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Пачи-нотти,_Антонио.
19. Краткая летопись радио. XVIII век [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.viol.uz/chronicle/part2>.
20. Paul-Gustave Froment [Электронный ресурс]. – URL: https://fr.wikipedia.org/wiki/Paul-Gustave_Froment.
21. Бооль, В. Г. Полный курс физики. По сочинениям Жамена и Вюльнера. Т. 3 / В. Г. Бооль. – СПб.: Изд-во М. О. Вольфа, 1867. – 628 с.
22. Лачинов, Д. А. Электромеханическая работа / Д. А. Лачинов // Электричество. – 1880. – № 1-7.
23. Храмов, Ю. А. Физики: биографический справочник / Ю. А. Храмов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Наука, 1983. – 400 с.
24. Загадки изобретений Николы Теслы [Электронный ресурс]. – URL: http://www.inventa-ua.com/Public/RU/tesla_RU.
25. Томпсон, С. Электротехническая библиотека. Т. 4. Многофазные электрические токи и двигатели переменного тока / С. Томпсон; под ред. М. А. Шателена. – СПб.: Электричество, 1898. – 251 с.
26. Веселовский, О. Н. Михаил Осипович Доливо-Добровольский [1862–1919] / О. Н. Веселовский. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 272 с.
27. Бурков, А. Ф. История отечественных судовых электроприводов / А. Ф. Бурков. – Владивосток: Дальневост. гос. техн. рыбохоз. ун-т, 2008. – 380 с.
28. Томас Алва Эдисон (Thomas Alva Edison) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.peoples.ru/technics/designer/Edison> <https://www.peoples.ru/technics/designer/edison>.
29. Тихонов, В. В. История развития корабельного электропривода / В. В. Тихонов. – Л.: Высшее военно-морское инженерное ордена Ленина училище им. Ф. Э. Дзержинского, 1953. – 87 с.
30. Бурков, А. Ф. Судовые электроприводы / А. Ф. Бурков. – СПб.: Лань, 2019. – 372 с.