



АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,

д. т. н., проф. каф.
систем автоматического управления
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
a.mikerov@gmail.com

Электродвигатели для сетей переменного тока прошли во второй половине XIX века путь от однофазного синхронного двигателя Уитстона до асинхронных двигателей, созданных Теслой на основе концепции вращающегося магнитного поля, математически сформулированной Феррарисом.



ПОЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В предыдущих статьях [1, 2] описывались первые электрические двигатели с питанием от гальванических батарей. Однако во второй половине XIX века в связи с развитием электрического освещения и дальнейшей передачи электроэнергии появились сети однофазного переменного тока [3]. Это и дало толчок к изобретению

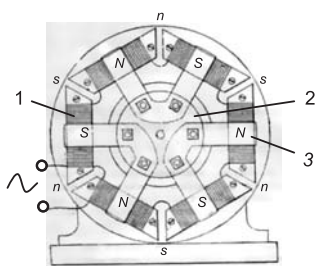


РИС. 1. ►
Двигатель Уитстона

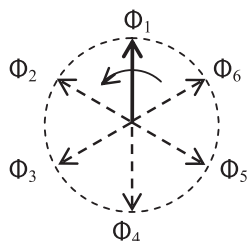


РИС. 2. ►
Векторная диаграмма двигателя

электродвигателей переменного тока.

Первый однофазный двигатель был предложен в 1841 г. английским физиком Чарльзом Уитстоном (Charles Wheatstone), известным также своими изобретениями в области электрогенераторов и измерительной техники. Такой двигатель подключается к источнику переменного тока и содержит (рис. 1) статор с шестью электромагнитами (1) и ротор (2) в виде медного диска с тремя подковообразными магнитами (3) полярностью *N* и *S*.

Все электромагниты включены последовательно так, что при любой полярности питающего напряжения в промежутках между ними формируются магнитные потоки или полюса чередующейся полярности *n* и *s*, показанные на рис. 1 в начальный момент времени t_1 для положительного полупериода питающего напряжения. Предположим, что ротор вращается против часовой стрелки, и рассмотрим силы, действующие на верхний магнит ротора (аналогично работают и остальные магниты). Поскольку разноименные полюса магнитов притягиваются, а одноименные отталкиваются,

вращающий момент ротора будет направлен против часовой стрелки, поддерживая его вращение. Если ротор двигателя успеет за полупериод напряжения повернуться на 60° , то в следующий полупериод все полюса статора поменяют полярность и ротор повернется еще на 60° . Таким образом, ротор будет поворачиваться синхронно с частотой перемагничивания электромагнитов (частотой сети), отчего подобные двигатели по предложению Чарльза Штейнмеца и получили название синхронных. Магнитное поле статора такого двигателя можно изобразить в виде вектора (рис. 2), где $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_6$ — магнитные потоки статора, взаимодействующие с ротором в последовательные моменты времени t_1, t_2, \dots, t_6 , когда питающее напряжение меняет свой знак. Получается, что вектор магнитного потока статора шагает по окружности синхронно с ротором, поэтому такое магнитное поле можно назвать шагающим.

При реальных частотах сети 50–60 Гц такой двигатель, конечно, запуститься не сможет, но если его ротор раскрутить, например, вручную или другим двигателем до синхронной скорости, то он

будет устойчиво работать с частотой вращения, пропорциональной частоте сети. При электрификации Лондона посредством однофазного напряжения в 1889 г. в качестве такого «раскруточного» двигателя применили так называемый универсальный двигатель (рис. 3) с обмотками якоря (1) и возбуждения (2). Его конструкция была разработана в 1884–85 гг. независимо друг от друга Вернером Сименсом и соавторами трансформатора, венгерскими инженерами Микша Дери и Отто Блати [4–6].

Универсальные двигатели до сих пор широко применяются при мощности до нескольких киловатт, особенно в бытовой технике. Они привлекают производителей легкостью изменения скорости с помощью регулирования напряжения, как в обычном двигателе постоянного тока. Однако для мощных приводов такое регулирование было в то время затруднительным. Поэтому для электрической тяги на железных дорогах и в лифтах с питанием от сети переменного тока стали применять так называемый репульсионный двигатель, изобретенный в 1885 г. знаменитым американским электротехником Илайю Томсоном (Elihu Thomson) и усовершенствованный позднее Микша Дери [3, 5, 6].

Илайю Томсон (1853–1937), родом из Англии, соединял в себе таланты блестящего университетского профессора, крупного инженера, плодовитого изобретателя (696 патентов) и успешного предпринимателя [7]. Он разработал различные системы электрического освещения, высокочастотные генератор и трансформатор, самопишущий ваттметр, один из способов электросварки, а также, например, улучшил рентгеновские трубки. Томсон основал электротехнические компании в Англии, Франции и США. В 1892 г. его компания Thomson-Houston слилась с компанией Эдисона, образовав крупнейшую электротехническую компанию мира — General Electric.

По конструкции репульсионный двигатель, схема которого показана на рис. 4, похож на универсальный двигатель с якорем (1) и возбуждением в виде электромагнита (2). Отличие состоит в том, что щетки двигателя (3) закорочены и могут

вручную поворачиваться [8]. При питании переменным напряжением в закороченной обмотке якоря наводится ЭДС и идет ток, направление которого, в соответствии с законом Ленца, таково, что создает поток противодействует магнитному потоку статора.

Тогда, если в некоторый полупериод питающего напряжения электромагнит (2) имеет полюс N внизу, то якорь (1) — такой же полюс наверху, как показано на рис. 4, что приведет к их взаимному отталкиванию и вращению ротора по часовой стрелке. Это и объясняет название двигателя, которое в дословном переводе означает «отталкивающийся». При этом величина наводимой ЭДС, а значит, и вращающего момента определяются положением щеток. Когда они горизонтальны, ЭДС и момент максимальны (режим пуска). Далее при повороте щеток против часовой стрелки момент будет падать, а скорость нарастать. Таким образом, пуск и скорость репульсионного двигателя легко регулируются разворотом щеток без изменения напряжения питания.

Тем не менее проблемы всех коллекторных двигателей, связанные с искрением, помехами и быстрым износом, были решены лишь после создания асинхронного двигателя. По своему устройству он гораздо проще любого двигателя постоянного тока, поэтому удивительно, что он был изобретен почти на столетия позже, несмотря на то, что, как отмечал Илайю Томсон: «Трудно составить такую комбинацию из магнитов переменного тока и кусков меди, которая не имела бы тенденции к вращению» [5].

Асинхронный двигатель базируется на концепции вращающегося магнитного поля, выдвинутой практически одновременно в середине 1880-х гг. двумя выдающимися учеными — Николаем Теслой [3] и итальянским профессором физики Галилео Феррарисом (Galileo Ferraris) (рис. 5). Последний родился на севере Италии в семье фармацевта и после окончания Туринского университета стал профессором Музея индустрии, где изучал трансформаторы, многофазные цепи, линии передачи переменного тока, а также оптические приборы. Он прожил короткую жизнь,

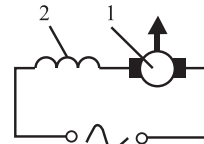


РИС. 3. ◀
Универсальный двигатель

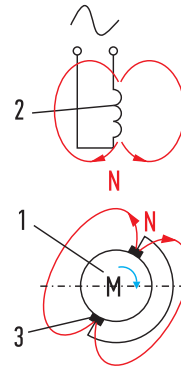


РИС. 4. ◀
Репульсионный двигатель

но успел заслужить в Европе звание «отца трехфазного тока» [5, 9, 10].

Если вернуться к концепции, то во вращающемся магнитном поле вектор магнитного потока статора постоянен по величине, но, в отличие от шагающего поля (рис. 2), непрерывно (равномерно) вращается с синхронной скоростью. Тогда очевидно, что ротор в виде магнита, помещенный внутри такого поля, будет вовлекаться им в синхронное вращение, что и происходит в рассмотренном выше двигателе Уитстона. Однако выяснилось, что аналогично будет вращаться и немагнитный ротор из любого проводящего металла. Еще в 1824 г. известный французский физик академик Доминик Араго (Dominique Arago) продемонстрировал опыт, названный



РИС. 5. ◀
Галилео Феррарис
(1847–1897)

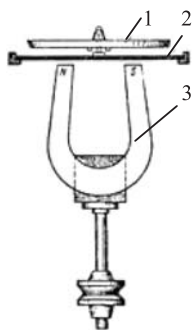
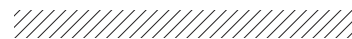


РИС. 6. ▶
Опыт Араго

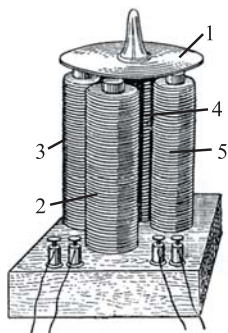


РИС. 7. ▶
Опыт Бейли

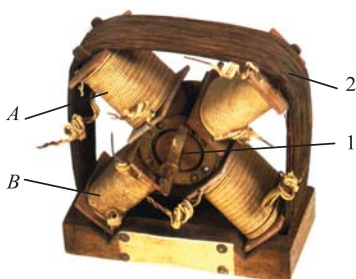


РИС. 8. ▶
Двухфазный двигатель
Феррариса

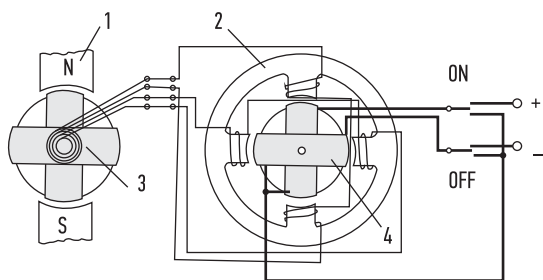


РИС. 9. ▲
Двигатель Теслы



РИС. 10. ▶
Макет двигателя Теслы

им «магнетизмом вращения» [5] и показанный на рис. 6.

Диск (1) из меди или стали на стеклянной пластине (2) вращался в том же направлении, что и вращающийся магнит (3). Объяснение этому загадочному явлению нашел Майкл Фарадей в 1831 г. после открытия закона электромагнитной индукции (закона Фарадея). Согласно ему, вращающееся магнитное поле магнита индуцирует в диске вихревые токи, создающие собственное магнитное поле, взаимодействующее с вращающимся.

Этот принцип и лежит в основе современных асинхронных двигателей (в английской литературе — индукционных), имеющих металлический ротор и отличающихся только тем, что в них вращающееся магнитное поле образуется неподвижной обмоткой статора. Первый шаг к созданию такого двигателя был сделан английским физиком Уолтером Бейли (Walter Bailey) в 1879 г., заменившим в опыте Араго вращающийся магнит на четыре электромагнита (2–5), токи в которых переключались последовательно вручную (рис. 7) [5, 10]. Но такое устройство создавало шагающее через 90° магнитное поле. А как получить непрерывно (равномерно) вращающееся магнитное поле?

На этот вопрос ответил вышеупомянутый Феррарис в 1888 г. в докладе Туринской академии наук, математически сформулировав два условия [5, 10]:

1. Обмотка двигателя должна содержать две независимые части (называемые теперь фазами), магнитные потоки которых геометрически взаимно перпендикулярны.
2. Фазы должны быть запитаны двумя гармоническими напряжениями, сдвинутыми на четверть периода (синус и косинус).

Позднее Михаил Осипович Доливо-Добровольский предложил называть такую систему токов *Drehstrom*, что в дословном переводе с немецкого означает «вращательный ток» [6].

Свою теорию Феррарис блестяще подтвердил макетом двигателя мощностью 3 Вт (рис. 8), имеющего ротор (1) в виде полого медного стаканчика и статор (2) с фазами A и B. Фазы разделены на две секции с разным числом витков, намотанных проводом разного диаметра так, чтобы создавать индуктивный сдвиг фаз токов в 90° при питании от однофазной сети.

В 1890 г. французские инженеры Морис Хитин (Maurice Hutin) и Морис Леблан (Maurice Leblanc) предложили использовать для сдвига фаз токов конденсатор [6]. В таком виде двухфазный двигатель дожил до наших дней под названием конденсаторного двигателя. При этом габариты конденсатора соизмеримы с размерами самого двигателя, поэтому данное техническое решение пригодно только для маломощных двигателей.

Сам Феррарис также заявлял, что «...аппарат, основанный на исследованном нами принципе, не может иметь никакого промышленного значения как двигатель» [10]. Поэтому он его не запатентовал (как, впрочем, и остальные свои открытия) и отклонил, в отличие от Теслы, предложение Вестингауза о сотрудничестве. Тем не менее его работы дали впоследствии повод оспаривать патенты Теслы в некоторых из 25 судебных процессов компании Вестингауза [5, 9]. Пессимистический вывод о перспективах своего двигателя Феррарис сделал, оценив величину его КПД в точке максимума мощности на валу — ниже 50%. Однако в данной точке это справедливо и для двигателей постоянного тока. Поэтому в дальнейшем рабочие точки стали выбирать ближе к скорости холостого хода, где в идеале КПД любого электродвигателя стремится к 100%.

Совершенно по другому пути пошел Тесла, предложив в 1887 г. многофазные системы, где сдвинутые напряжения питания фаз вырабатывались питающим генератором, как показано, например, на рис. 9, где: 1 — генератор, 2 — двухфазный двигатель, 3 — контактные кольца генератора, 4 — обмотка ротора (кольца двигателя не показаны) [5, 10].

При положении переключателя ON ротор запитывается постоянным напряжением, и это двухфазный синхронный двигатель с электромагнитным возбуждением. В положении OFF обмотка ротора закорачивается, и получается асинхронный двигатель, названный Теслой индукционным. Эксперт патентного ведомства поначалу не поверил в работоспособность такого странного двигателя, пока Тесла не продемонстрировал ему действующий макет (рис. 10).

Двигатели Теслы и Феррариса легко запускались от питающей сети, однако с увеличением нагрузки их скорость падала, что подтверждается принципиальным отличием асинхронного

двигателя от синхронного. Действительно, асинхронный двигатель развивает вращающий момент лишь при наличии тока, а следовательно, и ЭДС, индуцируемой в роторе. А, по закону Фарадея, это возможно лишь тогда, когда ротор пересекает силовые линии поля статора, т. е. когда скорости их вращения не одинаковы (не синхронны).

Как описано в статье [3], Тесла вместе с Вестингаузом начали активно внедрять асинхронные двигатели в жизнь, однако они были доведены до совершенства и приняли современный вид лишь благодаря трудам нашего соотечественника Михаила Осиповича Доливо-Добровольского, которые будут рассмотрены в следующих статьях.

Что касается многофазных синхронных двигателей, то они нашли широкое применение там, где требуется стабильная скорость вращения, например в компрессорах, приводах генераторов и т. д. Синхронные двигатели с постоянными магнитами входят в состав современных вентильных двигателей, создающих все большую конкуренцию пока еще наиболее распространенным электродвигателям постоянного тока.

- Потребность в двигателях переменного тока возникла при внедрении однофазных осветительных сетей. Первым стал синхронный двигатель Уитстона с постоянными магнитами (1841 г.).
- Однако такие двигатели не имели пускового момента, поэтому на практике применялись универсальные двигатели Сименса и репульсионные двигатели Томсона (1884-5 гг.).
- Достаточно мощные двигатели для промышленности были созданы только в середине 1880-х гг., после того как концепция вращающегося магнитного поля была математически сформулирована Феррарисом и реализована в многофазных синхронных и асинхронных двигателях Теслы, запущенных в производство на заводах Вестингауза.

Таким образом, с конца XIX века промышленность стала оснащаться мощными двигателями переменного тока, а в быту, на базе главным образом универсальных электродвигателей, появились: вентиляторы — в 1887 г.; швейные машины «Зингер» — в 1884 г.; бормашины — в 1895 г. и, наконец, пылесосы — в 1901 г. [11]. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Микеров А. Г. Первый практически полезный электродвигатель Якоби и его развитие. *Control Engineering Россия*. 2015. №5 (59).
2. Микеров А. Г. Создание прототипов электродвигателей автоматики. *Control Engineering Россия*. 2016. №1 (61).
3. Микеров А. Г. Никола Тесла и передача электроэнергии переменными токами. *Control Engineering Россия*. 2016. №5 (65).
4. Микеров А. Г. Вернер Сименс — основатель европейской электроиндустрии (К 200-летию со дня рождения). *Control Engineering Россия*. 2016. №6 (66).
5. История электротехники / Под ред. И. А. Глебова. М.: Изд-во МЭИ. 1999.
6. Бельинд Л. Д. и др. История энергетической техники. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1960.
7. www.britannica.com/biography/Elihu-Thomson
8. www.en.wikipedia.org/wiki/Repulsion_motor
9. www.edisontechcenter.org/GalileoFerraris.html
10. Церевава Г. К. Никола Тесла (1856—1943). Л.: Наука. 1974.
11. Штёлтинг Г., Байсее А. Электрические микромашины. М.: Энергоатомиздат. 1991.