



АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,

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

Для автоматического управления лучше всего подходит электродвигатель с регулировочными характеристиками классического двигателя постоянного тока, однако без щеточно-коллекторного узла (источника искрения) и других недостатков механического коммутатора. Как и когда изобретателям удалось создать такое устройство?



ПЕРВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА БЕЗ КОЛЛЕКТОРОВ И ЩЕТОК

Коллекторные двигатели постоянного тока, изобретенные первыми, до сих пор остаются самыми массовыми в общем объеме производства электрических машин. Тем не менее бичом этих машин, особенно круп-

ных, по-прежнему является искрение в щеточно-коллекторном узле (рис. 1), наиболее опасное и нетерпимое в тяжелых условиях эксплуатации, например в авиации [1, 2].

Первым, кто занялся решением этой проблемы, был гениальный американский электротехник сербского происхождения Никола Тесла — под впечатлением от увиденного им искрения в электрогенераторе, продемонстрированном профессором на лекции в университете австрийского города Грац [3]. Уже в Америке, в 1888 г., Тесла запатентовал знаменитый асинхронный двигатель переменного тока без щеточно-коллекторного узла, в настоящее время наиболее популярный в машиностроении. Однако регулировочные характеристики асинхронного двигателя не идут ни в какое сравнение со свойствами коллекторного двигателя постоянного тока, поэтому возникла идея изобрести «безыскровый» электродвигатель, так же легко управляемый, как и коллекторный двигатель постоянного тока [4]. Эта задача была решена только с помощью электроники в 1930-х гг. — когда был создан бесколлекторный двигатель постоянного тока, то есть типичный электромеханотронный

преобразователь [1, 5]. Рисунки 2–4 иллюстрируют основные этапы его разработки [6].

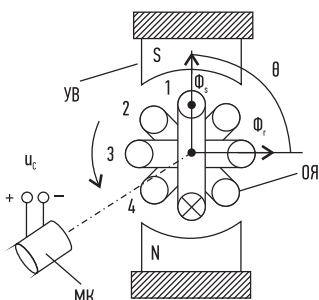
Первый практически полезный электродвигатель постоянного тока был изобретен российским академиком родом из Германии Борисом Семеновичем Якоби в 1834 г. [6, 7]. Этот двигатель содержал (рис. 2) обмотку якоря ОЯ, расположенную на роторе и для упрощения показанную в виде четырех витков (катушек или секций) (1)–(4), устройство возбуждения УВ в виде постоянного магнита (или электромагнита, как было у Якоби) и механический коммутатор МК с коллектором и щетками. Постоянный магнит создает магнитный поток возбуждения статора, направленный вдоль своей оси и показанный в виде вектора Φ_s . Витки ротора подключаются поочередно с помощью коммутатора МК на валу двигателя к батарее с напряжением u_c , создавая магнитный поток ротора Φ_r , перпендикулярный потоку статора Φ_s . Взаимодействие магнитных

В данном случае к батарее подключен виток (1), который создает поток ротора Φ_r , перпендикулярный потоку статора Φ_s . Взаимодействие магнитных

РИС. 1. ▶
Искрение под щетками



РИС. 2. ▶
Двигатель Якоби



потоков образует вращающий момент двигателя согласно известному закону Ампера $M = k \Phi_s \Phi_r \sin\theta$, где k — конструктивный параметр, а θ — магнитный угол между потоками [6]. Магнитные потоки как бы притягиваются друг к другу, поэтому в данном случае ротор будет поворачиваться против часовой стрелки под действием максимального вращающего момента (поскольку $\theta = 90^\circ$). По мере поворота ротора магнитный угол уменьшается, что приводит к снижению вращающего момента, однако после поворота на 45° место витка (1) занимает виток (4), который с помощью коммутатора подключается к батарее, восстанавливая максимальное значение вращающего момента, и т. д. Описанная конструкция двигателя Якоби, до сих пор наиболее часто используемая в коллекторных двигателях постоянного тока, считается классической.

Практически одновременно с Якоби, в 1836 г., великий английский ученый, изобретатель электромагнита и преподаватель артиллерийской академии, овладевший знаниями электротехники путем самообразования, Уильям Стёрджен (William Sturgeon), предложил обращенную конструкцию двигателя постоянного тока, показанную на рис. 3. Обмотка якоря ОЯ расположена на статоре, а устройство возбуждения УВ (постоянный магнит) — на роторе [4, 6, 8].

Механический коммутатор МК переключает ток в витках ротора таким образом, чтобы обеспечить максимальное значение вращающего момента. В показанном на рисунке положении запитан виток (1), создающий поток Φ и обеспечивающий вращение ротора против часовой стрелки. В современном электроприводе обращенная конструкция двигателя применяется реже классической в силу более сложного строения коммутатора.

До создания бесколлекторного двигателя постоянного тока оставался один шаг — заменить механический коммутатор МК датчиком положения ротора ДПР и электронным коммутатором ЭК с напряжениями питания u_c и u_{cc} , как показано на рис. 4 [1, 4, 6]. Очевидным преимуществом такого двигателя по сравнению с двигателем Стёрджена является то, что мощные токи обмотки якоря коммутируются не механическим щеточно-

коллекторным узлом, а электроникой, тогда как датчик положения ротора может быть слаботочным или полностью бесконтактным измерительным узлом, например индуктивным, фотоэлектрическим, датчиком Холла и т. д. [1, 4–6]. В последнем случае и сам двигатель называется бесконтактным двигателем постоянного тока.

Первый бесколлекторный двигатель постоянного тока был создан в 1930 г. швейцарской компанией Brown-Boveri для электровоза с питанием от сети переменного тока [9, 10]. Техническим учредителем этой компании, основанной в 1891 г., был знаменитый английский электротехник Чарльз Юджин Браун (Charles Eugene Brown), родившийся и работавший в Швейцарии [11] (рис. 5). Он не получил высшего образования и после окончания техникума поступил в компанию своего отца Oerlikon, где вскоре стал начальником электротехнического отделения.

Браун был известен как конструктор совершенных двигателей постоянного тока, а затем и трехфазных генераторов, и трансформаторов для первой в мире системы дистанционной передачи электроэнергии переменного тока Лауфен — Франкфурт длиной 170 км с напряжением в 25 кВ, построенной в 1891 г. совместно с российским инженером-электротехником Михаилом Осиповичем Доливо-Добровольским из компании AEG. Финансовым соучредителем компании Brown-Boveri стал сотрудник компании Oerlikon Вальтер Бовери (Walter Boveri), получивший необходимый стартовый капитал в результате удачной женитьбы [12]. Благодаря усилиям Бовери было создано множество дочерних компаний Brown-Boveri в Европе и США, что было необходимо из-за узкого внутреннего рынка маленькой Швейцарии. В 1988 г. в результате слияния со шведской компанией ASEA был образован один из самых могущественных современных электротехнических гигантов — ABB, штаб-квартира которого до сих пор расположена в Швейцарии [12].

Электродвигатель Brown-Boveri (рис. 6), разработанный под руководством инженера Эрвина Керна (Erwin Kern), содержит 12-секционную обмотку якоря ОЯ на статоре, подключенную к анодам А электронного коммутатора ЭК, воплощенную в виде 12-анодной ртутно-дуговой лампы

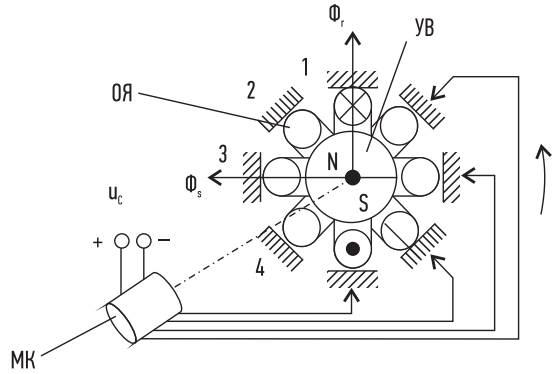


РИС. 3. ▲ Двигатель Стёрджена

с ртутным катодом К и электродом поджига П, как показано на рисунке (для упрощения — лишь для трех анодов) [4, 9, 10]. При положительном напряжении на каждом аноде А и отрицательном напряжении на катоде К электрическая дуга (т. е. электрический ток) между анодом и ртутным катодом возникает при положительном импульсе на соответствующем поджигающем электроде П, создаваемом датчиком положения ротора ДПР,

РИС. 4. ▼ Бесколлекторный двигатель постоянного тока

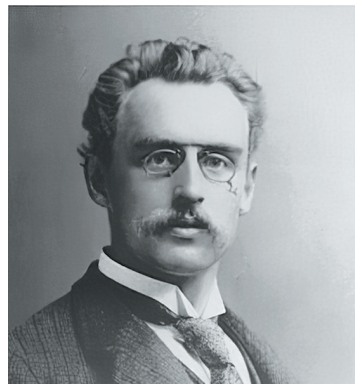
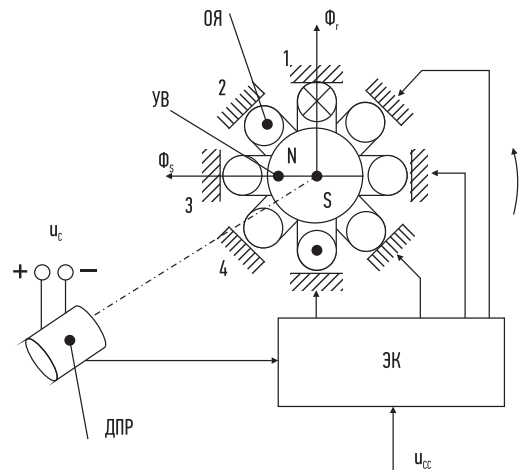


РИС. 5. ◀ Чарльз Браун (1863–1924)

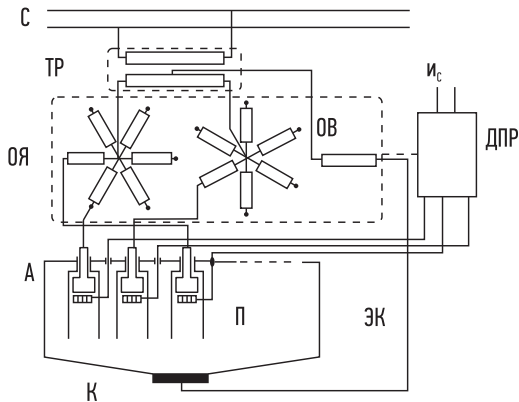
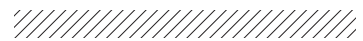


РИС. 6. ▲
Бесколлекторный
двигатель Brown-Boveri

который выступает в виде механического коммутатора (распределителя) на валу электродвигателя.

При отрицательном напряжении на аноде дуга гаснет. Таким образом, аналогично схеме, приведенной на рис. 4, обеспечивается подача тока в соответствующую секцию обмот-

ки якоря для создания вращающего момента двигателя одного знака. Питание двигателя осуществляется от подвесной сети переменного тока С через не показанный на рисунке бугельный токоприемник (или пантограф) и трансформатор ТР [13]. Обмотка возбуждения ОВ, расположенная на роторе, включена через скользящие контакты (также не показанные) последовательно с ртутно-дуговой лампой, действующей как выпрямитель, что обеспечивает пульсирующий ток возбуждения только одного знака. Вплоть до 1935 г. такими моторами были оборудованы несколько электричек германских железных дорог для подвесной сети 15–60 Гц, и каждый поезд был снабжен четырьмя тяговыми электродвигателями по 600 кВт [10].

Второй подобный бесколлекторный двигатель постоянного тока был разработан в начале 1930-х гг. конкурирующей с Brown-Boveri транснациональной американской корпорацией General Electric под руководством знаменитого американского электротехника шведского происхождения Эрнста Александерсона (Ernst Alexanderson) [5, 9, 10, 14, 15]. Он также известен созданием первого электромашинного высокочастотного радиогенератора, магнитного усилителя, электромашинного усилителя (амплидина) и множества других популярных радио-, теле- и электротехнических устройств и систем. Отличался исключительным творческим долголетием, получил 344 патента, причем последний из них — в возрасте 89 лет. Его портрет, приведенный на рис. 7, сделан в 90 лет.



РИС. 7. ►
Эрнст Александерсон
(1878–1975)

Бесколлекторный двигатель Александерсона, названный тиратронным мотором, показан на рис. 8 [9, 10, 15]. Как и двигатель Керна (рис. 6), он включает многосекционную обмотку якоря ОЯ на статоре и обмотку возбуждения ОВ на роторе, подключенную через скользящие контакты СК. Однако в качестве электронного коммутатора вместо ртутно-дуговой выпрямителя здесь использованы 18 газоразрядных тиратронов Т (аналогов теперешних полупроводниковых тиристоров), гораздо лучше управляемых и изобретенных в 1928 г. другим знаменитым сотрудником General Electric, лауреатом Нобелевской премии Ирвингом Ленгмюром (Irving Langmuir) [9, 16]. Тиратроны подключены к трехфазной сети

60 Гц С в параллель по трое для увеличения максимального тока.

Эти тиратроны коммутируют по требуемому алгоритму секции обмотки статора с помощью управляющих импульсов на их сетках, поступающих от электромеханического датчика положения ротора ДПР на валу двигателя, как показано на рис. 9, где ТМ — тиратронный мотор, подключенный к объекту управления ОУ через муфту М и механический ограничитель скорости ОС.

Первый двигатель мощностью 400 л. с. на напряжение 2,3 кВ был введен в эксплуатацию в 1936 г. в приводе вентилятора котла электростанции с регулированием скорости 350–625 об/мин [15]. Большое количество газоразрядных приборов, конечно, повысило стоимость привода, однако оказалось, что все тиратроны работают в режиме горячего резерва, поэтому одновременный отказ даже четырех приборов не нарушает работоспособность установки.

В середине 1930-х гг. глубокие исследования бесколлекторных двигателей постоянного тока с газоразрядными приборами проводились и в Советском Союзе несколькими известными учеными-электротехниками — Д. А. Завалишиным, О. Г. Вегнером, Ф. И. Бутаевым и др. [5].

Широкое применение бесконтактных двигателей постоянного тока, называемых также вентильными, бесколлекторными, бесщеточными, двигателями с электронной коммутацией, во всем мире началось лишь с 1960-х гг., после создания электронных коммутаторов на транзисторах, тиристорах, а затем и на интегральных схемах [1, 4, 5]. Сейчас такие двигатели применяются во всех приложениях, требующих высокой надежности, безопасности, длительного срока службы, а также высокой точности (в сервосистемах), в том числе в дисководах и вентиляторах компьютеров, аккумуляторном электроинструменте, радиоуправляемых моделях, роботах, авиационных и ракетных системах управления и т. д. В современном автомобиле же более сорока электродвигателей, поэтому победа по общему объему выпуска бесконтактных двигателей постоянного тока над коллекторными станет реальностью только после полного перехода автомобильной промышленности на такие двигатели.

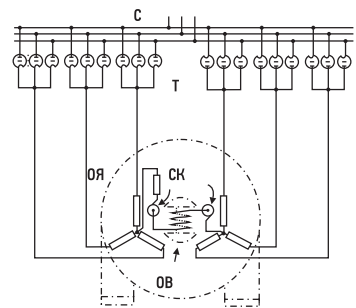


РИС. 8. ►
Бесколлекторный
двигатель Александерсона

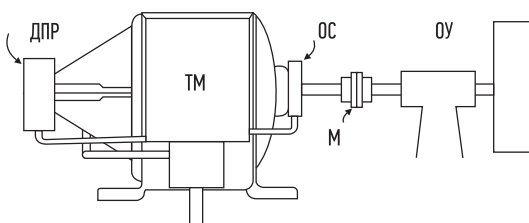


РИС. 9. ▼
Электропривод
вентилятора

Общей особенностью всех рассмотренных выше двигателей является то, что магнитное поле обмотки якоря, создаваемое электронным коммутатором, перемещается в пространстве скачками (шагами), что вызывает пульсацию вращающего момента. Для прецизионных систем управления такая пульсация неприемлема, особенно в прямом приводе, где двигатель соединен с объектом управления без промежуточной механической передачи, т. е. напрямую. Это привело к развитию другой ветви бесконтактных двигателей, в которых магнитное поле якоря является вращающимся, а не шагающим. О них расскажем в последующих статьях. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Brushless DC Electric Motor. https://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor
2. Почему искрит коллектор электродвигателя. <https://ise-people.ru/raznoe/pochemu-iskrit-kollektor-elektrodvigatelya-prichina-silno-iskryat-na-yakore-dreli-bolgarke.html>
3. Цверева Г. К. Никола Тесла, 1856–1943. Л.: Наука. 1974.
4. Микеров А. Г., Бельный Ю. М. Бесконтактный моментный привод для многофункциональных систем автоматического управления. М.: Энергоатомиздат. 1991.
5. Косыкин Ю. П. Введение в электромехатронику. СПб: Энергоатомиздат. 1991.

- Попытка Теслы в конце XIX в. избавиться от искрения в обычном двигателе постоянного тока привела к изобретению двигателей переменного тока, которые, однако, оказались плохо регулируемыми.
- Создание неискрящих двигателей постоянного тока стало возможным лишь в начале XX в. — с появлением газоразрядных приборов, способных коммутировать токи в двигателе обращенной конструкции Стёрджена.
- Первые мощные бесколлекторные двигатели постоянного тока были разработаны в начале 1930-х гг. в компаниях Brown-Boveri (на основе многоанодной ртутно-дуговой лампы) и General Electric (с использованием тиратронов).
- Тем не менее только возникновение разнообразных полупроводниковых приборов в 1960-х гг. открыло путь к широкому внедрению таких двигателей в современные системы автоматического управления.

6. Mikerov A. G. Basic electrical engineering: Textbook. SPb.: SPbGETU "LET" Publishing House. 2013.
7. Микеров А. Г. Первый практически полезный электродвигатель Якоби и его развитие // Control Engineering Россия. 2015. №5 (59).
8. Микеров А. Г. Создание прототипов электродвигателей автоматики // Control Engineering Россия. 2016. №1 (61).
9. Wyk van J. D. Power - and machine -electronics 1914–1966: a selected bibliography and review on the electronic control of electrical machines. Johannesburg: South African Institute of Electrical Engineers. 1966.
10. Jahns T. M., Owen E. L. Speed Drives at the Millennium: How Did We Get Here? // IEEE transactions on power electronics. 2001. V. 16. № 1.
11. Charles Eugene Lancelot Brown. https://www.gracesguide.co.uk/Charles_Eugene_Lancelot_Brown
12. Brown, Boveri & Cie. https://en.wikipedia.org/wiki/Brown_Boveri_%26_Cie
13. Микеров А. Г. На заре мехатроники: первые регулируемые электроприводы // Control Engineering Россия. 2023. №1 (100).
14. Микеров А. Г. Магнитные усилители — между лампами и транзисторами // Control Engineering Россия. 2020. №4 (88).
15. Beiler A. H. The Thyatron Motor at the Logan Plant // AIEE Transactions. 1938. V. 57. №1.
16. Микеров А. Г. Первые электромехатронные преобразователи // Control Engineering Россия. 2023. №2 (101).