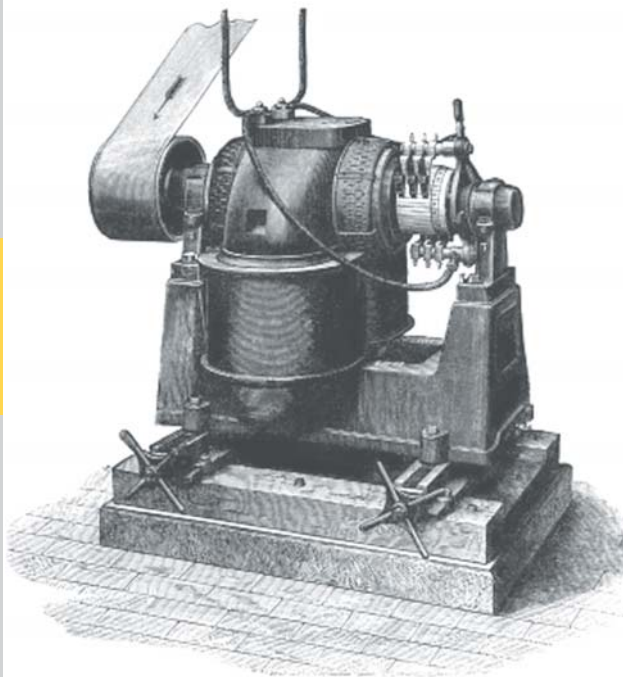




**АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,**

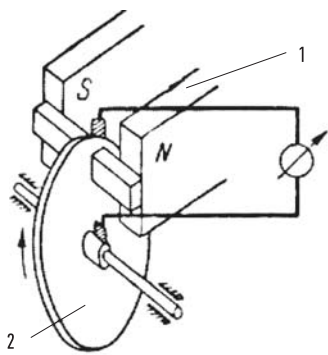
д. т. н., проф. каф.  
систем автоматического управления  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
a.mikerov@gmail.com

В статье освещается начальный этап развития электромеханического способа генерирования электроэнергии, завершившийся в середине XIX века созданием динамомашин, идея самовозбуждения которых (принцип динамо) была использована и в XX веке для объяснения механизма образования магнитного поля Земли.



## ПЕРВЫЕ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРЫ И ПРИНЦИП ДИНАМО

**РИС. 1.** ►  
Диск Фарадея



В предыдущих статьях данного цикла рассматривались первые электрические двигатели, созданные в начале XIX века с питанием от единственного известного источника — гальванической батареи [1–3]. Низкая экономическая эффективность такого электрохимического источника, препятствующая замене паровых двигателей электрическими, заставляла изобретателей искать другие, электромеханические способы генерации электроэнергии. В данной статье отражен процесс создания электрогенераторов постоянного тока, в результате которого было открыто явление самовозбуждения за счет положительной обратной связи, называемое принципом динамо.

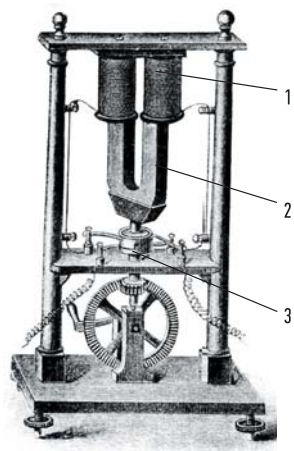
Первый электромеханический генератор был предложен Фарадеем в 1832 г. сразу после открытия им закона электромагнитной индукции (рис. 1) [4, 5]. Диск Фарадея содержит: статор в виде подковообразного магнита (1) и медный диск (ротор) (2), снабженный подвижными контактами на оси и ободу.

При вращении диска в магнитном поле в нем наводится ЭДС постоян-

ного знака, вызывающая индукционные токи, текущие по правилу правой руки радиально, т. е. между осью и ободом (в данном случае снизу вверх). По правилу Ленца индукционные токи создают магнитный поток, препятствующий потоку магнита, т. е. направленный вдоль оси вращения диска. Это единственный известный униполярный генератор постоянного тока, применяемый для выработки больших токов до сих пор. Остальные генераторы постоянного тока являются, по существу, генераторами переменного тока с выпрямителем (коммутатором) на выходе.

Первый генератор переменного тока был построен во Франции мастером Ипполитом Пикси (Hippolyte Pixii) в том же 1832 г. [4–7]. За свою короткую жизнь в 27 лет Пикси создал много научных приборов, включая dilatометрический термометр и вакуумный насос. Генератор Пикси показан на рис. 2, где обозначены: 1 — статор с двумя катушками, включенными последовательно, 2 — ротор с постоянным магнитом, 3 — щеточный коммутатор (выпрямитель). Силовые линии вращающегося магнита пересекают обмотку

**РИС. 2.** ►  
Генератор Пикси



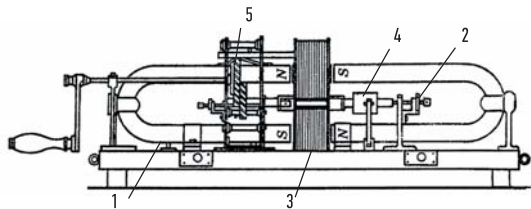


РИС. 3. ▲  
Генератор Якоби

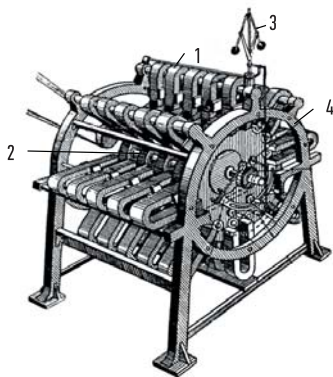


РИС. 4. ►  
Генератор «Альянс»

катушек, наводя в них ЭДС, близкую к гармонической. Идея катушек и вращающегося магнита принадлежит изобретателю, приславшему письмо Фарадею, подписанное латинскими инициалами Р. М. Вероятное имя изобретателя — Фредерик Мак Клинтон (Frederick Mc-Clintock) — долгое время оставалось неизвестным [7]. Фарадей незамедлительно опубликовал это письмо в научном журнале. Однако это устройство генерировало переменный ток, тогда как в начале XIX века применялся только постоянный ток. Поэтому Пикси по совету Ампера снабдил его щеточным коммутатором. Генератор Пикси использовался Э. Х. Ленцем для доказательства открытого им в 1833 г. принципа обратимости электрической машины. Однако еще долго двигатели и генераторы развивались по отдельности.

При создании высоковольтного дистанционного взрывателя морских мин в 1842 г. [2] Якоби предложил поместить магниты на статоре,

а обмотку на роторе, что повысило компактность генератора. Генератор Якоби представлен на рис. 3 [4–6], где обозначены: 1 — статор с двумя постоянными магнитами, 2 — вал, 3 — якорь (ротор с обмоткой), 4 — коммутатор, 5 — мультипликатор, т. е. повышающий редуктор для увеличения скорости вращения ротора.

Аналогичную конструктивную схему имел генератор, предложенный английским инженером Фредериком Холмсом (Frederick Holmes) для питания запатентованной им дуговой лампы. Для серийного производства подобных генераторов в 1856 г. была создана компания «Альянс» [5, 6]. Вид генератора представлен на рис. 4, где: 1 — статор с постоянными магнитами; 2 — ротор с обмоткой (якорь); 3 — центробежный регулятор, 4 — механизм сдвига щеток.

В нем использовался центробежный регулятор Уатта для автоматического поддержания выходного напряжения путем сдвига щеток с нейтрали при изменении нагрузочного тока, что обеспечивало компенсацию реакции якоря. Генератор имел 50 постоянных магнитов, развивал мощность 10 л. с. при весе до 4 тонн. Всего было выпущено более 100 генераторов «Альянс», применявшихся, помимо дуговых прожекторов маяков, и в гальванопластике.

В эксплуатации у машин с постоянными магнитами обнаружился неприятный недостаток снижения выходного напряжения из-за постепенного размагничивания магнитов от вибрации и старения. Другим недостатком возбуждения от постоянных магнитов была невозможность регулирования их магнитного потока для стабилизации генерируемого напряжения. Для борьбы с этими недостатками предлагалось применить электромагнитное возбуждение, обеспечивающее к тому же, как отмечалось в статье [3], большую компактность. Так, преуспевающий английский изобретатель Генри Уайльд (Henry Wilde) получил в 1864 г. патент на генератор с отдельным мало-мощным возбудителем на постоянном магните, установленном на общем валу с генератором [4–6]. Уайльд не имел университетского образования, начал свою карьеру учеником механика, но ему удалось наладить производство своих

генераторов для гальванопластики. Тем не менее становилось ясно, что наличие постоянных магнитов в генераторах — серьезный тормоз развития телеграфии и электрического освещения.

Кардинальное решение проблемы появилось после открытия возможности самовозбуждения генераторов, названного Сименсом динамоэлектрическим принципом, или принципом динамо [4–7]. Идея самовозбуждения состоит в том, что — как показано на рис. 5 — начальный поток возбуждения при пуске машины создается остаточной намагниченностью магнитопровода. Здесь напряжение генератора снимается с обмотки якоря Я, а возбуждение машины выполняется либо обмоткой ОВ1, включенной последовательно с нагрузкой  $R_H$ , либо обмоткой ОВ2, включенной параллельно якорю через регулировочный резистор  $R$  (так называемое шунтовое возбуждение). Далее поток возбуждения увеличивается за счет положительной обратной связи от генерируемого тока.

Одним из первых на возможность самовозбуждения генератора указал в патенте 1854 г. датский инженер и организатор железнодорожного сообщения Сорен Хиорт (Søren Hjøorth). Однако, опасаясь слабости остаточной намагниченности, он дополнил генератор постоянными магнитами. Этот генератор Хиорта так и не был реализован. Независимо от Хиорта идею самовозбуждения высказал в 1856 г. профессор Будапештского университета Аньеш Йедлик (Ányos Jedlik). Он также предложил один из первых электродвигателей, описанный в статье [1]. Однако Йедлик своих изобретений не патентовал и сведения о них публиковал весьма скупо, поэтому его новаторские предложения остались незамеченными.

Практически идея самовозбуждения была реализована лишь через десять лет в одно и то же время несколькими изобретателями. В заявке на патент в декабре 1866 г. инженер английской телеграфной компании, ученик Фарадея Самуэль Варлей (Samuel Alfred Varley) предложил схему генератора, аналогичного генератору Якоби, в котором, однако, обмотка возбуждения заменяла

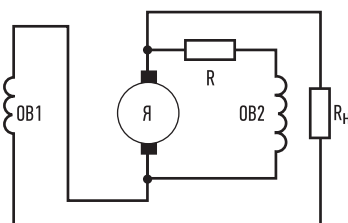


РИС. 5. ►  
Схема генератора с самовозбуждением

постоянные магниты. Схема генератора показана на рис. 6, где: 1 — электромагниты возбуждения, 2 — якорь, 3 — коммутатор, 4 — добавочный регулировочный резистор. Перед пуском сердечники возбуждения намагничивались постоянным током.

Через месяц, в январе 1867 г., в Берлинской академии наук был представлен доклад известного немецкого изобретателя и промышленника Вернера Сименса (Werner Siemens) с подробным описанием генератора с самовозбуждением, названного им динамо-машиной. Перед пуском генератор включался как двигатель для намагничивания возбуждения. Впоследствии Сименс наладил широкий промышленный выпуск таких генераторов в Германии.

В феврале того же 1867 г. известный английский физик Чарльз Уитстон (Charles Wheatstone) запатентовал и продемонстрировал генератор с шунтовым возбуждением (рис. 5). Владелец мастерской музыкальных инструментов, перенявший дело от своего отца, впоследствии профессор Королевского колледжа King's College в Лондоне, Уитстон известен также своими изобретениями метода измерения сопротивления (мост Уитстона), однофазного синхронного электродвигателя, музыкального инструмента концертино, стереоскопа, хроноскопа (электрического секундомера) и усовершенствованного вида телеграфа Шиллинга.

В печати возникла дискуссия о приоритете данного технического решения, на который претендовали также Уайльд и Хиорт. Следует отметить, что существует три вида приоритета: научный, патентный и промышленный. Научный приоритет принадлежит ученому, впервые опубликовавшему или публично продемонстрировавшему какое-либо устройство, эффект или теорию. Промышленным приоритетом владеет лицо или компания, впервые наладившие производство изделия и его широкое внедрение. Например, при открытии радио научный приоритет принадлежит Попову, а патентный и промышленный — Маркони.

Относительно генератора с самовозбуждением следует признать патентный приоритет за Варлеем, научный — за Йедликом и Сименсом, а промышленный — за Сименсом. Уитстону же принадлежит приоритет в частном, хотя и весьма важном,

техническом решении — шунтовом возбуждении.

Дальнейшее улучшение характеристик динамо-машины было связано с изменением конструкции ее якоря путем применения в 1867 г. бельгийским электротехником Зиновием Граммом (Zenobe Gramme) кольцевого якоря, а затем внедрением барабанной намотки, предложенной в 1872 г. Гефнером Альтенекем (Hefner Alteneck), ведущим конструктором компании Сименс-Гальске [5–7]. После этого электродвигатели и генераторы практически приняли современный вид. Однако к концу XIX века в связи с широким внедрением систем переменного тока основная доля электроэнергетики на гидро- и тепловых электростанциях вырабатывалась уже генераторами переменного тока.

Что касается самого принципа динамо, то о нем снова вспомнили уже в XX веке для объяснения причин земного магнетизма, которое Эйнштейн в 1905 г. назвал одной из пяти главных загадок физики того времени [8, 9]. До сих пор окончательного ответа, подтвержденного компьютерным моделированием или физическими экспериментами, не получено, но наиболее популярной является теория, называемая гидромагнитным динамо (геодинамо). Еще со времен Уильяма Гильберта (конец XVI века) установлено, что Земля — это гигантский магнит, силовые линии которого направлены от южного полюса к северному. Согласно уравнениям Максвелла, магнитные потоки могут создаваться только токами, поэтому естественно было предположить, что Земля — это электромагнит, токи которого текут в плоскостях, параллельных экватору, а сердечником служит твердое ферромагнитное ядро Земли, показанное на рис. 7, с предполагаемым вертикальным расположением оси вращения Земли. Это железоникелевое ядро (1) диаметром около 1200 км окружено жидкой оболочкой (2) из тех же металлов толщиной 2300 км, за которым следуют горные породы мантии и коры Земли.

Если предположить, что вследствие вращения Земли (3) в жидкой оболочке ядра образуются концентрические течения в плоскостях, параллельных экватору (на рисунке не показаны), то в них могут индуцироваться токи за счет пересечения силовых линий (4) магнитным потоком от твердого ядра — как

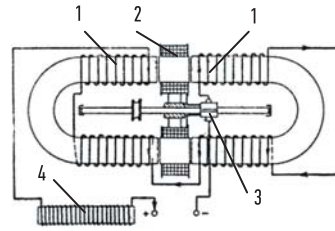


РИС. 6. ◀  
Генератор Варлея

в генераторе Фарадея. Однако твердое ядро принципиально не может быть намагниченным, поскольку его температура, вызванная термоядерными реакциями, выше 5000 °С (как на поверхности Солнца), а все ферромагнитные материалы теряют свои магнитные свойства выше точки Кюри (около 750 °С). Кроме того, ученые не могли предложить разумного объяснения причин образования таких концентрических течений. Поэтому в настоящее время принята более сложная модель, называемая конвективным геодинамо.

Температура поверхности жидкого ядра на границе с мантией (5) примерно на 600 °С ниже температуры твердого ядра, что вызывает радиальные конвективные потоки жидкости (6), которые под действием кориолисовых сил, вызванных вращением Земли, закручиваются в вихри (7), ось вращения которых совпадает с осью вращения Земли. Далее в этих жидких вихрях, аналогично диску Фарадея, индуцируются токи, создающие магнитные потоки (4) вдоль оси вращения Земли.

Более сложным является вопрос о первоначальном образовании магнитного поля Земли. В 1919 г. ирландский физик и математик Джозеф Лармор (Joseph Larmor), выпускник Кембриджского университета, один из создателей теории электрона и основателей релятивистской теории,

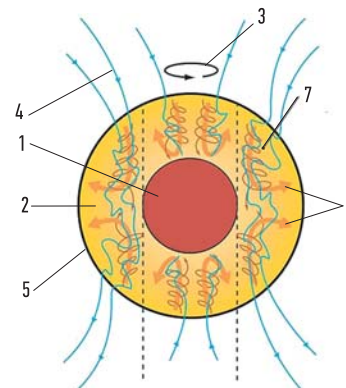
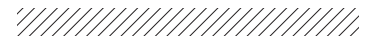


РИС. 7. ◀  
Модель геодинамо



Электромеханическое генерирование постоянного тока, до конца XIX века являвшееся основным направлением выработки электроэнергии, развивалось следующим образом:

- Низкая эффективность гальванических источников питания вынудила ученых искать электромеханические источники — генераторы. Первым таким источником был маломощный униполярный генератор Фарадея (1821 г.).
- Более мощные источники стали строить в виде первичного генератора переменного тока и выпрямителя (коммутатора) на выходе. Для возбуждения генератора сначала использовали постоянные магниты (Пикси, Якоби, Холмса и др.), а затем регулируемые, более стабильные и компактные электромагниты (Уайльда, Хиорта и др.).
- Однако настоящий прорыв, обеспечивший широкое применение генераторов с середины 1850-х годов, произошел после открытия принципа динамо (самовозбуждения), благодаря идеям и работам Йедлика, Сименса, Варлея, Уитстона и др.
- В начале XX века принцип динамо был использован для объяснения причин и механизма одной из величайших загадок Вселенной — земного магнетизма.

С конца XIX века и поныне электроэнергия вырабатывается уже преимущественно генераторами переменного тока.

предложил для его решения идею самовозбуждения, аналогичного процессу в динамо-машине. Необходимая первоначальная намагниченность мантии Земли могла быть вызвана магнитным полем Солнца, направленным вдоль оси вращения. Затем за счет механизма положительной обратной связи в вихрях жидкости постепенно нарастали токи, намагничивающие мантию, пока локальный нагрев жидкого ядра за счет омических потерь не начал разрушать кон-

вективные потоки и магнитное поле Земли не приняло устойчивый современный уровень [8, 9]. ●

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Микеров А. Г. Первые демонстрации электромагнитного вращения. *Control Engineering Россия*. 2015. № 4 (58).
2. Микеров А. Г. Первый практически полезный электродвигатель Якоби. *Control Engineering Россия*. 2015. № 5 (59).
3. Микеров А. Г. Создание прототипов электродвигателей автоматки. *Control Engineering Россия*. 2016. № 1 (61).
4. Динамомашинa в ее историческом развитии / Сост. Д.В.

Ефремов, М.И. Радловский, под ред. В.Ф. Миткевича. Л.: Изд-во АН СССР, 1934.

5. Белькинд Л. Д. и др. История энергетической техники. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1960.
6. История электротехники / Под ред. И. А. Глебова. М.: Изд-во МЭИ. 1999.
7. History — The invention of the electric motor 1800-1854. [www.eti.kit.edu/english/1376.php](http://www.eti.kit.edu/english/1376.php)
8. Левин А. Земля как магнит: Геомагнитное поле. *Популярная механика*. 2010. № 9 (95).
9. Glatzmaier G. A., Olson P. Probing the Geodynamo. <http://www.scientificamerican.com/article/probing-the-geodynamo-2005-07/?page=1>