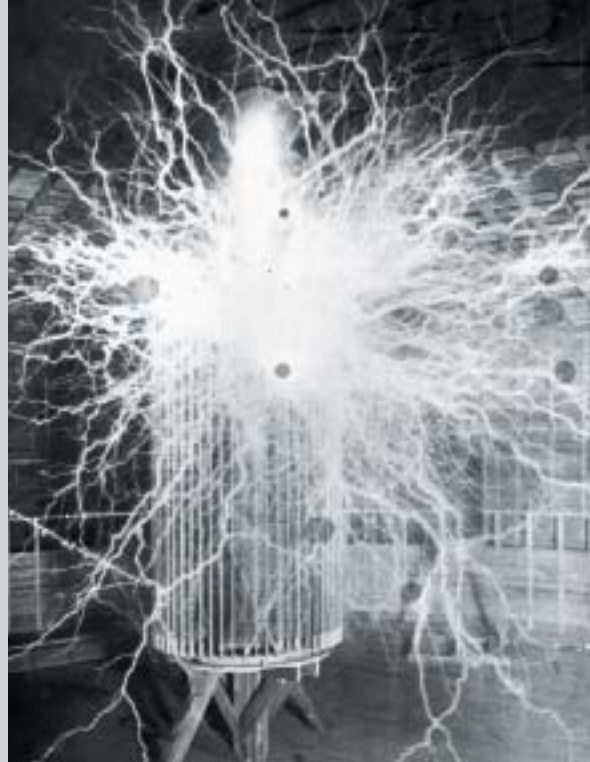




**АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,**

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

Конец XIX в. отмечен появлением многофазных систем передачи и распределения электроэнергии на базе синхронных генераторов и асинхронных двигателей, предложенных великим изобретателем Николой Тесла, который также исследовал беспроводные методы передачи энергии и информации.



## НИКОЛА ТЕСЛА И ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

Почти весь XIX век в практических применениях безраздельно господствовал постоянный ток. Главным препятствием широкой электрификации в то время была невозможность передачи электроэнергии на большие расстояния, а переходу на переменные токи мешало отсутствие эффективных электродвигателей переменного тока. Решение было найдено в новаторских работах гениального электротехника Николы Тесла.

Причин популярности постоянного тока тогда было несколько. Прежде всего, источниками тока служили гальванические батареи, и все производимые генераторы и моторы также были постоянного тока. Инженеры мыслили электрогидравлическими аналогиями, в которые не укладывалась идея потоков, меняющих свое направление, поэтому, например, приверженность Эдисона постоянным токам казалась вполне оправданной. Между тем недостатки устройств постоянного тока становились все более очевидными в связи с плохой работой коллектора электрических машин (искрением и износом), проблемами освещения

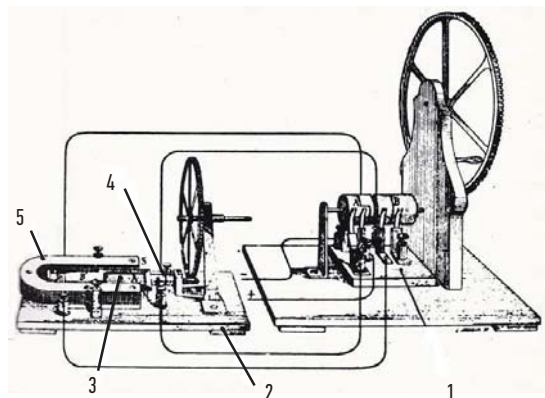
и, главное, невозможностью передачи электроэнергии на большие расстояния.

Электрическое освещение стали использовать после появления дуговых ламп, среди которых наиболее простой была свеча Яблочкова в виде двух вертикально расположенных угольных электродов, разделенных слоем изолирующего материала [1–4]. Вскоре выяснилось, что на постоянном токе разнополярные электроды сторают неодинаково, поэтому Яблочков предложил питать свечи переменным током, для чего совместно с известным французским заводом Грамма разработал специальный генератор переменного тока, конструкция которого оказалась столь удачной, что его производство доходило до 1000 штук в год [2]. Другое важное изобретение Яблочкова — это схема «дробления света» с использованием индукционной катушки (прообраза современного трансформатора) для параллельного питания от одного генератора любого числа свечей, подобно газовому освещению.

Однако эксплуатация выявила серьезные недостатки дугового освеще-

ния, особенно в быту: необходимость замены свечей через каждые два часа, шум, мерцание, большая дороговизна по сравнению даже с газом. Поэтому уже с начала 1890-х гг. электрические свечи были почти повсеместно вытеснены лампами накаливания Эдисона и применялись только в прожекторах или для больших пространств. Тем не менее, именно Яблочкову мы обязаны введением переменных токов в практическую электротехнику, что, в конечном счете, привело к решению острой проблемы дальнейшей передачи электроэнергии, называемой тогда проблемой «распределения света».

Освещение по системе Эдисона имело низкое напряжение, 110 В, поэтому в каждом районе требовалось строить свою электростанцию. Например, в Петербурге из-за дороговизны земли такие электростанции ставились на баржах, стоящих в реках Мойке и Фонтанке [2]. Было ясно, что крупные генерирующие станции выгоднее строить вблизи рек и угольных бассейнов, вдали от городов. Но тогда для дальнейшей передачи нужно или увеличивать сечение подводящих проводов, или



**РИС. 1. ▲**  
Дистанционная  
передача Дебре



**РИС. 2. ►**  
Джордж Вестингауз  
(1846–1914)

повышать напряжение. Для проверки первого подхода на практике русский изобретатель Федор Апполонович Пироцкий предлагал использовать железнодорожные рельсы. Второй путь (повышение напряжения) был испробован французским инженером, впоследствии академиком Мар-



**РИС. 3. ►**  
Никола Тесла  
(1856–1943)

селем Дебре (Marcel Deprez), построившим несколько линий передачи постоянного тока с напряжением до 6 кВ. Первая из них, с напряжением 2 кВ, имела длину 57 км и питала двигатель постоянного тока с насосом для искусственного водопада на Мюнхенской электротехнической выставке 1882 г. [2, 4]. Однако для систем освещения такое высокое напряжение было непригодно.

Более простое решение — переход на однофазный переменный ток с повышающими и понижающими трансформаторами — было предложено известной компанией «Ганц и Ко» из Будапешта для освещения оперных театров в Будапеште, Вене и Одессе [2]. Талантливые инженеры этой компании, Микша Дери (Miksa Déri), Отто Блати (Ottó Bláthy) и Карой Циперновски (Károly Zipernowsky), создали в 1884 г. наиболее совершенные конструкции трансформатора (и они же придумали сам этот термин). Отто Блати также изобрел первый электрический счетчик электроэнергии и прославился как выдающийся шахматист.

Однако развитие промышленности требовало мощных приводов, которые не могли быть созданы на базе электродвигателей переменного тока с питанием от однофазной осветительной сети. Эта проблема формулировалась как «электрическая передача механической энергии» или «передача силы» [4]. Одно из ее первых решений было предложено Дебре в 1879 г. в виде дистанционной передачи в опытный вагон движения поршней паровой машины (рис. 1) [5].

У нее был датчик в виде щеточно-го коммутатора (1) и приемник (2), содержащий ротор (3) с двумя взаимно перпендикулярными катушками, который в свою очередь был подключен к коммутатору (4) и находился в поле магнита (5). Устройство работало со скоростью до 3000 об/мин и с моментом до 5 Нм. Эта идея позднее получила свое развитие в виде сельсинных передач и шаговых двигателей, однако подходила для использования только в приборных системах.

Решение этой проблемы в целом пришло из-за океана, где появился деятельный человек, интуитивно осознавший грядущий переход на переменный ток. Это был Джордж

Вестингауз (George Westinghouse) (рис. 2) — видный американский промышленник в сфере оборудования железных дорог, основатель компании Westinghouse, решивший заняться еще и электротехническим бизнесом [2, 4].

Для того чтобы выйти на рынок со своей продукцией, ему нужны были новые патенты, поскольку основные патенты в этой области принадлежали Эдисону, Вернеру Сименсу (Verner Siemens) и другим конкурентам. Перевести освещение на переменный ток было сравнительно просто, и Вестингауз легко вышел на этот рынок, закупив европейские генераторы и трансформаторы и запатентовав ряд своих ламп накаливания. В 1893 г. он получил большой подряд на электрификацию Всемирной выставки в Чикаго, установив там 180 тыс. ламп накаливания и тысячи дуговых ламп [4]. Однако электрические машины были совсем другим делом, поэтому для их разработки он подыскал через патентное ведомство никому не известного изобретателя Николу Теслу, имевшего десятки патентов на системы переменного тока. На встрече в Нью-Йорке в 1888 г. Вестингауз предложил Тесле уступить ему все уже полученные и будущие патенты в обмен на один миллион долларов, пост технического руководителя завода в Питтсбурге и один доллар за каждую л. с. двигателей и генераторов по системе Теслы, установленных на территории США в течение ближайших 15 лет. Третье условие соглашения сыграло в дальнейшем важную роль. Тесла все эти условия принял, и так началось его плодотворное сотрудничество с Вестингаузом [4].

Будущий великий электротехник Никола Тесла (рис. 3) родился в семье сербского священника, жившей в Хорватии. Учился в Градском политехникуме и Пражском университете, но, не закончив их, поступил на работу в отделение компании Эдисона в Париже, откуда перебрался в США с рекомендательным письмом от директора отделения самому Эдисону.

Письмо гласило: «Я знаю двух великих людей: один из них вы, а второй — молодой человек, которого я вам рекомендую». Разумеется, Тесла был принят незамедлительно, и ему поручили самую ответственную

работу с электротехническим оборудованием, включая ликвидацию аварий.

Впрочем, работа в этой компании продолжалась недолго. Поводом к расставанию якобы послужил отказ Эдисона выплатить обещанную премию в 50 тысяч долларов за совершенствование генераторов постоянного тока. Когда Тесла напомнил об этом шефу, тот сказал: «Молодой человек, вы не понимаете американского юмора» [4]. Однако скорее всего причиной ухода Теслы было упорное нежелание Эдисона разрешать молодому сербу заниматься бесколлекторным электродвигателем переменного тока, с мечтой о котором Тесла прибыл из Европы. Поэтому, разумеется, Тесла с радостью принял предложение Вестингауза, которое представляло ему прекрасные возможности для работы над своей идеей.

Еще в мае 1888 г. Тесла получил семь патентов США на системы переменного тока и бесщеточные двигатели [4]. Главным в них было новаторское предложение строить всю цепочку генерации, передачи, распределения и использования электроэнергии как многофазную систему переменного тока, включающую генератор, линию передачи и двигатель переменного тока, названный Теслой «индукционным». Пример такой системы показан на рис. 4.

Здесь: 1 — синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов и с двумя взаимно перпендикулярными фазами обмотки ротора (2), соединенными через контактные кольца (3) и линию передачи (4) с двухфазным индукционным двигателем (5) с обмоткой статора (6) и ротором (7) в виде стального цилиндра со срезанными сегментами [4]. Действие такого двигателя, называемого теперь асинхронным, объяснялось формированием «перемещающегося», а по современной терминологии вращающегося магнитного поля. Для линии дальней передачи предлагалось включение двухфазных повышающего и понижающего трансформаторов. В мае того же года Тесла выступил с большим докладом о многофазных системах на семинаре Американского института инженеров-электриков AIEE (предшественника IEEE). Продолжая исследования, он вскоре реализовал и другие идеи: двухфазный и трехфазный асинхронный двигатель с обмоткой в звезду, трехфаз-

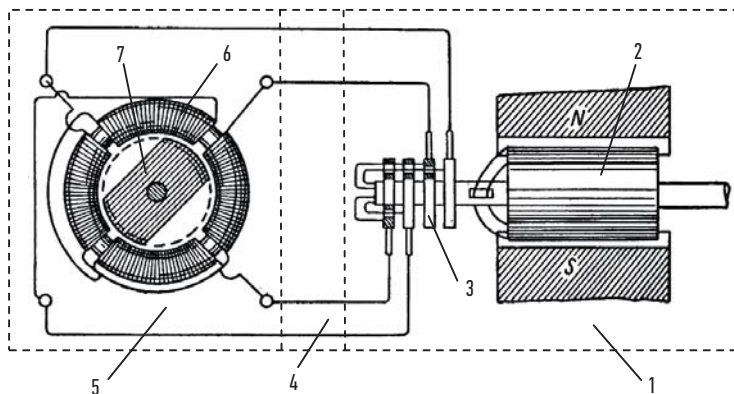


РИС. 4. ◀  
Двухфазная  
система Теслы

ный генератор с нейтралью и без, трех- и четырехпроводные линии электропередачи и т. д. Всего по многофазным системам у Теслы был 41 патент [2].

Несомненно, Тесле принадлежит патентный, а Вестингаузу промышленный приоритет на многофазные системы переменного тока, поскольку им сразу же было развернуто массовое производство двигателей, генераторов и другой аппаратуры таких систем. Вершиной этой бурной деятельности было строительство в 1895 г. самой крупной по тем временам Анигарской электростанции на американском берегу Ниагарского водопада, высота которого составляла 48 метров. На плотине было установлено 10 двухфазных генераторов по 3,7 мВт каждый, а также проложена линия электропередачи 11 кВ длиной 40 км в Буффало, где был создан промышленный район с многочисленными потребителями электроэнергии переменного тока [2, 4].

Однако Теслу тяготила производственная деятельность, и он ушел от Вестингауза, желая и дальше развивать идею дальней передачи электроэнергии, но уже без проводов. Этим он и стал с увлечением заниматься в собственной лаборатории. Его первой мыслью было создать с помощью высоковольтного и высокочастотного излучателя мощное электрическое поле, действующее на значительные расстояния, из которого потребитель мог бы черпать электроэнергию. Тесла изобретает первый электромеханический СВЧ-генератор, использованный позднее в первых радиостанциях и для индукционного нагрева, передающую и приемную антенны, а также резонансный контур приемника для выделения определенной частоты.

Всех поразило опыт Теслы, когда при включении генератора безо всяких проводов в его руках загоралась электрическая лампа, как показано на рис. 5.

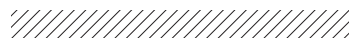
Тесла был в одном шаге от изобретения радио, но не пошел по этому пути, поскольку его занимала мысль о передаче электроэнергии, а не информации. Однако именно ему принадлежит приоритет в создании телемеханики, реализованной в 1898 г. в виде дистанционно управляемого водяного катера.

Тем временем, многочисленные опыты показывали, что электролампам удается зажигать только на расстоянии не более нескольких сотен метров. Тесла попытался реализовать другой способ передачи электроэнергии: не через атмосферу, а прямо сквозь землю путем возбуждения в земном шаре, как огромном конденсаторе, поверхностных стоячих волн, в пучности которых можно было отбирать энергию в любой точке поверхности Земли. Для этого он построил в местечке Уорден-



РИС. 5. ◀  
Опыт Теслы





**РИС. 6.** ▲  
Башня Уорденклиф

клиф под Нью-Йорком огромную антенну с мощным надземным и подземным возбуждением, подключенными к отдельной электростанции, как показано на рис. 6. Опыты с этой башней по беспроводной передаче электроэнергии в период с 1899 по 1905 г., судя по всему, не дали желаемого эффекта, поскольку Тесла их неожиданно забросил, не опубликовав результатов. И ученые до сих пор спорят, чего же все-таки достиг Тесла в этом эксперименте, поскольку он работал без помощников и не оставил никаких записей [4, 6].

Задача беспроводной передачи электроэнергии не решена до сих пор. Последние достижения используют узконаправленные микроволновое или лазерное излучения для удаленного электропитания космических аппаратов от спутника с солнечными батареями или от управляемых дронов [7]. Экспериментально доказана возможность передачи порядка десятка киловатт на расстояние километров. Другое направление разработок — это лазерное оружие, предвестником которого был знаменитый «Гиперболоид инженера Гарина».

Тем не менее заслуги Теслы были всемирно признаны. В честь него единица индукции магнитного поля в системе СИ названа «тесла», он был избран членом и почетным доктором

- Потребность в передаче электроэнергии на большие расстояния возникла в конце XIX в., прежде всего в связи с широким внедрением систем освещения.
- Такая передача на постоянном токе была технически целесообразной только при высоком напряжении и практически неприемлемой для низковольтного освещения.
- Линии передачи переменного тока с трансформаторами удовлетворяли задачам освещения, однако для промышленности требовались мощные электродвигатели, все известные конструкции которых были постоянного тока.
- Решение этой комплексной проблемы было предложено изобретателем Теслой и предпринимателем Вестингаузом, создавшими многофазные системы переменного тока с синхронными генераторами, линиями передачи и асинхронными двигателями.
- Исследования же Теслы по беспроводной передаче электроэнергии до сих пор не получили практического завершения.

наук многих академий и университетов. Одна из самых престижных наград IEEE — медаль Теслы — ежегодно присуждается за выдающиеся заслуги в области производства и использования электроэнергии. Тесле принадлежит около 800 патентов, причем, в отличие от патентов Эдисона, они считаются более новаторскими. Существует несколько памятников Тесле и посвященных ему музеев, среди которых самый впечатляющий находится в Белграде, выпущены банкноты с его портретом (рис. 7).

Однако личная жизнь Теслы сложилась неудачно [4, 6]. В конце XIX в. в США разразился экономический кризис, поставивший компанию Вестингауза на грань разорения. Узнав об этом, Тесла явился в штаб-квартиру своего бывшего патрона и публично разорвал их первичное соглашение, потеряв около 10 млн

долларов, причитавшихся ему в соответствии с третьим пунктом этого договора. Буквально через две недели после этого великодушного жеста долга сторела его великолепная лаборатория, и он остался без средств. В отличие от Эдисона, он не был бизнесменом и вложил все, что у него имелось, в эту лабораторию. После этого Тесла был вынужден проводить свои дальнейшие исследования на различные гранты и пожертвования, в частности, башня Уорденклифф была построена на деньги американского финансиста Моргана.

Биограф Теслы Велимир Абрамович писал: «Пытаясь представить себе Теслу, я не вижу его улыбающимся, а наоборот, грустным...» [6]. Тесла не пил вина, никогда не знал женщин, не имел семьи и умер в одиночестве и бедности в отеле «Нью-Йоркер» [4]. ●

## ЛИТЕРАТУРА

1. Микеров А. Г. Торжество постоянного тока и роль Томаса Эдисона. Control Engineering Россия. 2016. № 4 (64).
2. История электротехники / Под ред. И. А. Глебова. М.: Изд-во МЭИ. 1999.
3. Шателен М. А. Русские электротехники XIX века. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1955.
4. Цверева Г. К. Никола Тесла (1856–1943). Л.: Наука. 1974.
5. Электродвигатель в его историческом развитии / Сост. Д. В. Ефремов, М. И. Радовский. Под ред. В. Ф. Митневича. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1936.
6. Абрамович В. Метафизика и космология ученого Николы Теслы. [http://nowimir.ru/DATA/030025\\_3\\_3.htm](http://nowimir.ru/DATA/030025_3_3.htm)
7. Wireless power. [https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_power)



**РИС. 7.** ►  
Банкнота Сербии