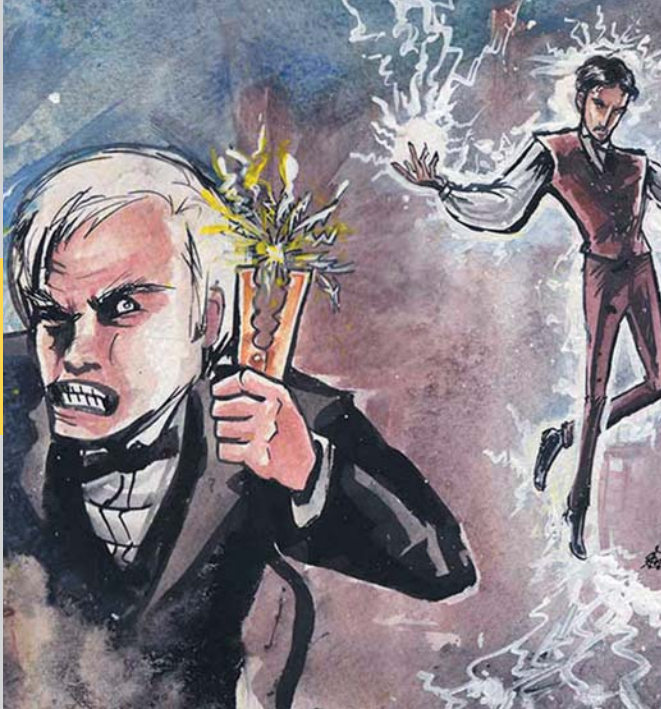
АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,
д. т. н., проф. каф.
систем автоматического управления
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
a.mikerov@gmail.com



Переход в конце XIX века от первоначальной системы освещения с лампами накаливания Эдисона к современной трехфазной системе генерации, передачи и потребления электроэнергии сопровождался ярким публичным противостоянием компаний, ученых и общества.

ВОЙНА ТОКОВ И ПОБЕДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

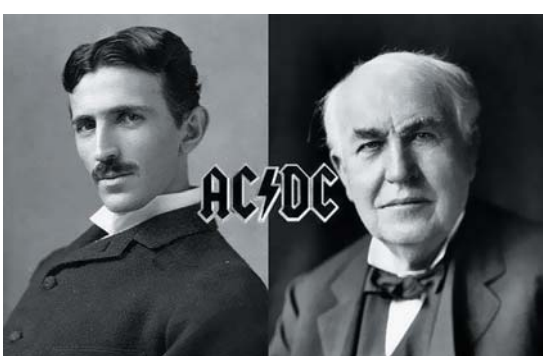


РИС. 1. ▲ Война токов

Под «войной токов» обычно понимают вражду двух крупнейших электротехнических компаний — Эдисона и Вестингауза, внедрявших различные системы электроснабжения. Также это словосочетание отражает идейное соперничество двух великих изобретателей — Томаса Эдисона и Николы Теслы, эти системы предложивших (рис. 1).

Однако картина будет неполной, если не упомянуть и о другой «войне», называемой иногда «битвой славянинов», в которой Михаил Осипович Доливо-Добровольский противопоставил двухфазной системе Тесла свою трехфазную, послужившую основой для современной структуры генерации, передачи и использования электроэнергии.

Война разгорелась в связи с появлением электрического освещения лампами накаливания Эдисона, запатентованными в 1880 г. и ставшими всемирно известными благодаря электротехнической выставке в Париже в 1881 г. [1]. Эта система предполагала, по существу, освещение целого квартала потребителей (П) от одной тепловой электростанции с генератором (Г) постоянного тока, первая из которых была пущена на Перл-стрит в Нью-Йорке в 1882 г. (рис. 2а). Поскольку длина линии электропередачи (ЛН) низкого напряжения 110 В составляла не более 1,5 км, то, очевидно, такие локальные электростанции не могли обеспечить электроснабжение целого города, а тем более удаленных районов страны.

Сразу же появились конкурирующие компании, которые, опираясь на европейский опыт (в частности, компании «Гейнц и Ко»), предложили централизованное (называемое тогда трансформаторным) электроснабжение однофазным переменным током от крупных электростанций любого типа (например, гидравлических) с генератором (Г) переменного тока через высоковольтные линии передачи (ЛВ) с повышающим (Т1) и понижающим (Т2) трансформаторами, а также дополнительными понижающими трансформаторами (Т3) потребителей (П) (рис. 2б) [2]. Одним из таких серьезных конкурентов Эдисона стала компания Вестингауза, вошедшая в электротехнический бизнес в 1884 г., закупив европейские патенты на трансформаторы. Почувствовав угрозу, Эдисон попытался нащупать слабые места конкурентов и увидел их в опасности поражения электрическим током высокого напряжения, без которого дальняя передача электроэнергии в те времена была практически невозможна.

К концу 1880-х гг. крупные города покрылись густой сетью телеграфных, телефонных и осветительных линий на столбах (включая линии дугового освещения в 3000 В), до сих пор портящих вид американских городов (рис. 3).

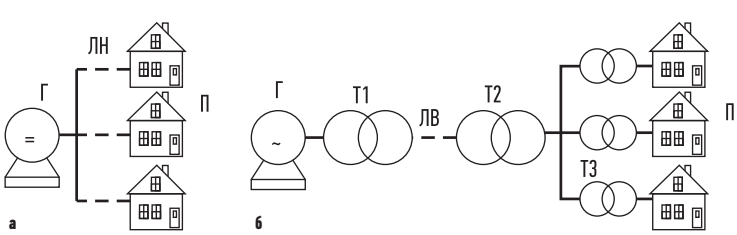


РИС. 2. ▶ Системы постоянного (а) и переменного (б) тока

Газеты действительно были наполнены описаниями порой душераздирающих случаев поражения электрическим током ремонтников генераторов и линий и обычных пешеходов от упавших проводов. Общественную панику вызвала гибель в 1889 г. монтера телеграфной компании, замкнувшего высоковольтные провода и заживо сгоревшего на столбе в деловой части Манхэттена на глазах многочисленной, охваченной ужасом публики и работников муниципалитета [3]. Хотя несчастные случаи были связаны как с переменным, так и с постоянным током, Эдисон сознательно выбрал своей мишенью переменный ток (рис. 1). По современным представлениям, при напряжении до 500 В опаснее переменный ток, а более 500 В — постоянный [4]. Важно отметить, что по системе Эдисона напряжение подавалось большей частью по подземным кабелям.

Непосредственным поводом к началу войны послужили дебаты о высшей мере наказания — электрическом стуле [3]. История введения этого способа казни началась в 1882 г., когда американский дантист Альфред Саутвик (Alfred Southwick), проведя опыты на собаках, предложил заменить повешение более гуманной, по его мнению, казнью электрическим током. Эту тему подхватил электротехник Гарольд Браун (Harold Brown), который при поддержке Эдисона, предоставившего ему свою лабораторию, организовал серию публичных умерщвлений собак, лошадей и даже слона, показав, например, что собаки погибали уже при напряжении в 300 В переменного тока, тогда как при постоянном токе для этого требовалось в три раза большее напряжение. Желая связать ужасы убийства электрическим током с именем своего основного конкурента, Эдисон настоял на использовании в опытах высоковольтных генераторов Вестингауза, которые были приобретены через постороннюю компанию, поскольку сам Вестингауз был категорически против всякой смертной казни. Эдисон предпочитал называть эти процедуры «Westinghoused», т. е. умерщвлением токами Вестингауза.

В результате в 1888 г. штатом Нью-Йорк был принят закон об электрическом стуле с рекомендуемым напряжением 750–1500 В переменного тока. Стул, конструкция которого была создана тюремным ведомством совместно с лабораторией Эдисона, впервые был применен в 1890 г. для публичной казни некоего Вильяма Кеммлера (William Kemmler), убившего свою жену топором (рис. 4). Она произвела весьма тягостное впечатление, поскольку мучительная смерть наступила только со второй попытки. Вестингауз прокомментировал происшедшее словами: «Лучше бы они сделали это топором» [3].

На волне последовавшего общественного возмущения сторонники Эдисона предлагали законодательно разрешить только подземные сети с напряжением не более 300 В, что лишало бы системы переменного тока всякого экономического смысла. Однако первая же попытка введения подобных мер зимой 1889 г. погрузила все улицы Нью-Йорка в полную темноту, после чего было решено ограничиться только ужесточением требований электробезопасности.

Война токов не обошла и Россию, где электрическое освещение изначально строилось на постоянном токе [2]. Когда же в 1889 г. компания «Гейнц и Ко», опираясь на свой успешный опыт освещения одесской оперы, предложила создать систему переменного тока и для Москвы, в печати началась шумная кампания противников такой трансформаторной системы, доказывавших ее еретичность, опасность и безусловную гибельность для России [5].

Вернемся в США. Несмотря на мнимое преимущество, сторонники Эдисона ничего не могли противопоставить основному достоинству систем переменного тока — передаче энергии на любые расстояния. В 1893 г. компания Вестингауза выиграла заказ на электрификацию Чикагской выставки, а в 1895 г. завершила строительство самой большой по тем временам Ниагарской электростанции [2, 3, 6]. Однако постепенно у двухфазной системы Теслы стали выявляться недостатки, такие как повышенный расход меди для дальних передач, невысокие характе-

РИС. 3. ▲
Уличная проводка

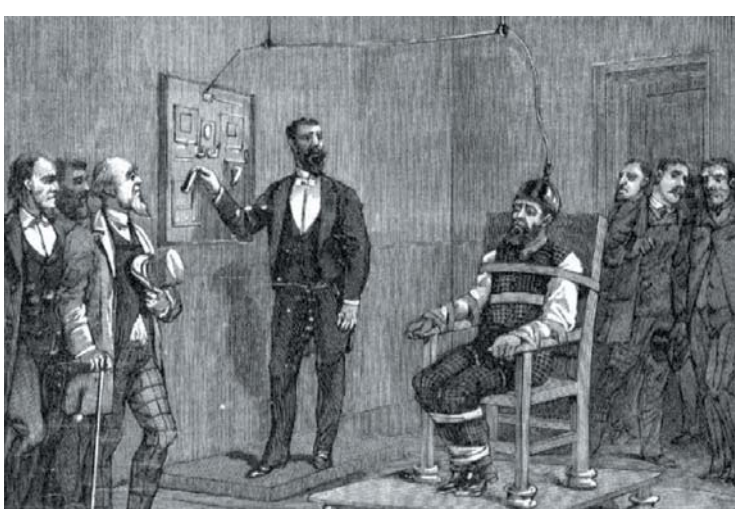


РИС. 4. ◄
Казнь Кеммлера

РИС. 5. М. О. Доливо-Добровольский (1862–1919)

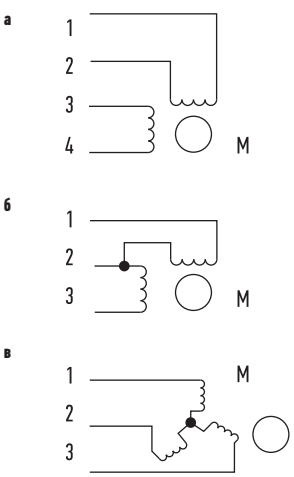


РИС. 6. Подключение двигателя к линии

ристики конструкций асинхронных двигателей и невозможность регулирования их скорости. Для формирования современного вида системы генерации, передачи и использования электроэнергии решающее значение приобрели работы выдающегося инженера-электрика М. О. Доливо-Добровольского [5–7].

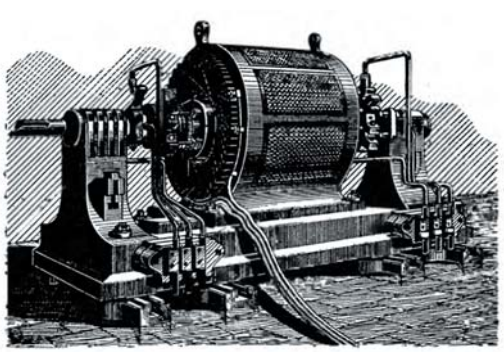


РИС. 7. Асинхронный двигатель Доливо-Добровольского

Михаил Осипович Доливо-Добровольский (рис. 5), происходивший из русско-польского дворянского рода, родился в Гатчине. Учился сначала в Рижском политехническом институте, а затем в Дармштадском высшем техническом училище (Германия). С 1887 г. и до конца жизни работал в компании AEG в Берлине, дойдя до поста технического директора. Доливо-Добровольский всегда сохранял связи с Россией, принимал активное участие в организации электромеханического отделения Петербургского политехнического института, основанного в 1902 г., и сотрудничал с ЭТИ (ЛЭТИ), по инициативе которого впоследствии ему было присвоено звание почетного инженера-электрика.

Желая найти нишу для компании AEG, Доливо-Добровольский тщательно изучил работы Теслы, начав с многофазных систем электропередачи. На рис. 6 приведены три самые распространенные линии электропередачи, питающие асинхронные электродвигатели (М): двухфазная четырехпроводная (а), двухфазная трехпроводная (б) и трехфазная трехпроводная (в). Все эти системы были запатентованы Теслой, однако на практике он использовал только двухфазные. Для линий передачи, достигающих порой длины во много тысяч километров, важнейшими показателями являются число и масса соединительных проводов. Поэтому имеет смысл сравнивать только трехпроводные линии (б) и (в).

При трехфазной линии (в) токи во всех проводах и фазах сдвинуты на 120°, но имеют одинаковую амплитуду. При двухфазной линии (б) с общим проводом (2) токи в проводах (1) и (3) равны:

$$i_1 = i_m \sin\omega t;\ i_3 = i_m \sin(\omega t + 90°),$$

где i_m — амплитуда тока и ω — его частота. Тогда в общем проводе (2) ток равен их сумме:

$$i_2 = i_1 + i_3 = \sqrt{2}\sin(\omega t + 45°).$$

Таким образом, провод (2) должен иметь сечение на 41% больше, нежели провода (1) и (3). И вот это обстоятельство, на которое первым обратил внимание Доливо-Добровольский в 1891 г., приводило к существенной экономии меди проводов и было решающим преимуществом трехфазных линий передачи и систем переменного тока [5].

Доливо-Добровольский не ограничился передачей электроэнергии, он создал и запатентовал такие важнейшие и общепринятые сейчас устройства многофазных систем, как:

- асинхронный двигатель с ротором типа «беличья клетка» (1889 г.);
- распределенные обмотки якоря машин переменного тока (у Теслы обмотки были сосредоточенными, катушечными);
- первый асинхронный двигатель регулируемой скорости с обмоткой ротора, подключенной через контактные кольца к пускорегулирующему реостату;
- трехфазный трансформатор (1889 г.); до него в трехфазной линии использовали три однофазных трансформатора.

Широкому внедрению трехфазных систем весьма способствовал блестящий успех Доливо-Добровольского на электротехнической выставке во Франкфурте 1891 г., для которой он построил трехфазную линию передачи на 16 кВ из города Лауфен (в 175 км от Франкфурта), от генератора с водяной турбиной на 300 л. с. [5–8]. Это позволило зажечь на выставке 1100 ламп накаливания и запустить самый мощный по тем временам трехфазный асинхронный двигатель в 100 л. с. (рис. 7) с водяным насосом, питающим эффектный девятиметровый водопад, который демонстрировал возможность передачи механической энергии на расстояние.

Так закончилась битва «двух славянинов» (Теслы и Доливо-Добровольского), положившая конец и всей войне токов. К тому же, инициатор этой войны, Эдисон, после создания в 1892 г. компании General Electric (путем слияния его компании с компанией Thomson-Houston) потерял интерес к освещению, переключившись на обогащение руд. А сама эта компания после прихода в нее выдающегося электротехника Чарльза Штейнмеца резко поменяла курс, став активной сторонницей трехфазных систем и уже при строительстве Ниагарской электростанции получив подряд на трехфазную линию электропередачи в г. Буффало напряжением 11 кВ [3, 8, 9].

Однако датой окончательной победы переменного тока считается 2007 г., когда Нью-Йорк полностью перешел с постоянного тока на переменный [3, 9]. Тем не менее многие специалисты считают, что нас ждет

ренессанс систем постоянного тока [9]. Это связано, конечно же, с развитием электроники, которое привело к созданию мощных полупроводниковых устройств преобразования как рода тока (AC/DC), так и уровня напряжения, в результате чего на расстоянии более 1000 км линии электропередачи сверхвысокого напряжения (сотни киловольт) постоянного тока становятся экономически более выгодными. Кроме того, в системы постоянного тока легче интегрируются все возобновляемые источники электроэнергии (ветровые, солнечные и др.), а кабельные линии электропередачи также строятся преимущественно на постоянном токе. С другой стороны, все технические системы в промышленности, на транспорте и в быту становятся все более интеллектуальными на базе компьютерной техники и регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока. Все они требуют источников питания постоянного тока. Таким образом, скорее всего война токов еще не закончена.

- Война токов — это борьба двух принципов электроснабжения: локального (Эдисона) с питанием от местной низковольтной электростанции постоянного тока и централизованного (Вестингауза) в виде сети переменного тока с высоковольтными линиями электропередачи.
- Главным аргументом сторонников Эдисона была сравнительно бо́льшая опасность высоковольтного оборудования переменного тока, подтвержденная опытами Брауна на живых существах, а также первой публичной казнью на электрическом стуле.
- Но решающее преимущество системы Вестингауза — возможность электропитания множества удаленных потребителей — привело на первом этапе войны к ее победе в виде двухфазной системы, разработанной Теслой.
- Завершающий этап войны, «битва славянинов», ознаменовал переход к современной структуре мирового электроснабжения на базе трехфазной системы Доливо–Добровольского.
- Однако развитие электроники и ее широкое применение делает вероятным ренессанс в недалеком будущем систем передачи и распределения электроэнергии постоянного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Микеров А. Г. Торжество постоянного тока и роль Томаса Эдисона // Control Engineering Россия. 2016. № 4 (64).
2. Микеров А. Г. Никола Тесла и передача электроэнергии переменным током // Control Engineering Россия. 2016. №5 (65).
3. Война токов. https://en.wikipedia.org/wiki/War_of_Currents
4. Пиголкин Ю.И. и др. Судебная медицина. М.:ГЭОТАР-МЕД. 2002.
5. Электротехника переходит на переменный ток. www.famhist.ru/famhist/klasson/000c6e49.htm#000e59a4.htm
6. Белькинд Л. Д. и др. История энергетической техники. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1960.
7. Бутюгина А. А., Микеров А. Г. Выдающийся инженер-электрик Михаил Осипович Доливо-Добровольский (к 150-летию со дня рождения) // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. №7.
8. Герман-Галкин С. Г. Карл Август Штейнмец — ученый, инженер, конструктор, изобретатель, педагог// Control Engineering Россия. 2015. №6 (60).
9. Зотин О. В преддверии возрождения постоянного тока // Силовая электроника. 2013. № 3, 4, 6.