

УДК 6.31.371:621.31

Уроки истории и перспективы развития передачи электроэнергии

ВОРОТНИЦКИЙ В.Э.¹, ВОРОТНИЦКИЙ В.В.²

¹НТЦ ФСК ЕЭС, Москва, Россия

²Таврида Электрик, Москва, Россия

Статья посвящена важной теме необходимости использования опыта и уроков мировой и отечественной истории электротехники в обеспечении ускоренного технологического развития России. История электротехники началась почти 200 лет назад и прошла трудный путь от первых слаботочных телеграфных линий до современных мощных национальных энергосистем и межгосударственных энергообъединений. Оптимальные решения по передаче электроэнергии на дальние расстояния от электростанций к потребителям рождались в ходе научных и технических споров, конкуренции и международного сотрудничества. Уроки истории показывают, что российские учёные и инженеры с давних времён занимали и занимают в мировой электротехнике одно из ведущих мест, что развитие электроэнергетики – непрерывный эволюционный процесс. Знание ключевых этапов этого развития, изучение опыта выдающихся учёных, изобретателей, технологических предпринимателей – важнейшая составляющая успешной творческой инженерной деятельности сегодня и в обозримом будущем. В статье даётся краткий анализ истории передачи и распределения электроэнергии в XIX в., в том числе продолжающейся по сей день дискуссии сторонников и противников постоянного и переменного тока. Рассмотрены современные тенденции и перспективы развития электрических сетей в мире и России. Показано, что решение новых задач, стоящих перед инженерами-электриками, должно опираться не только на эти тенденции, перспективы и новые разработки, но и на знания и опыт предшественников. Для практического использования этого опыта, внедрения новых технологий предложен поэтапный путь обучения, повышения квалификации и привлечения талантливых и активной молодёжи в электроэнергетику России через изучение её истории, новых методов управления, создание современных учебных курсов и лабораторий.

Ключевые слова: электротехника, электроэнергетика, передача, распределение электроэнергии, постоянный, переменный ток, техника, технологии, история, технологическое развитие

*«Только ведая об истоках,
можно постигнуть смысл дел настоящих
и устремлять ясный взгляд в будущее»*

М.В. Ломоносов

Сегодня мировая электроэнергетика в очередной раз стоит на пороге масштабных изменений. Физический износ оборудования, всё возрастающий спрос на надёжное, качественное, экономичное и доступное электроснабжение, необходимость электрификации значительных территорий, а также требования климатической повестки дня на фоне развития информа-

ционных технологий формируют перед энергетиками новые вызовы, ставят новые задачи, которые предстоит решать в ближайшие десятилетия. В этом смысле принципиально важным является знание мировой и отечественной истории развития электротехники и электроэнергетики, истории открытий и изобретений, международной кооперации и конкуренции, роли и места русской инженерной школы. Знание этой истории особенно важно для подрастающего поколения в России, которому предстоит создавать в XXI в. новую энергетику с учётом прошлых достижений, опыта, современных тенденций и перспектив её развития [1, 2].

Краткий экскурс в историю передачи электроэнергии. История передачи электроэнергии начинается со второй половины XIX в., когда на смену эпохи пара и механического привода всё активнее приходила эра электричества. Это было время удивительных открытий и изобретений электрического освещения, телеграфа, первых электрических машин, линий электропередачи, приборов учёта электроэнергии, «Войны токов»; время, подарившее миру выдающихся учёных-электротехников, о которых написаны сотни книг и исторических исследований [3–9]. Многие из их исторического опыта остаётся актуальным сегодня и обязательно пригодится в будущем.

Первым применением передачи электроэнергии стала слаботочная телеграфная связь. В 1832 г. Павел Шиллинг изобретает первую телеграфную линию, а уже в 1841 г. Борис Якоби в Российской империи, опираясь на труды Шиллинга, с помощью телеграфной линии соединяет Зимний Дворец и Главный штаб в Санкт-Петербурге. В 1844 г. на средства субсидии конгресса США изобретатель телеграфа передаёт на расстояние 65 км (между Вашингтоном и Балтимором) первую депешу: «Чудны дела Твои, Господи!». Технология телеграфной связи развивается семимильными шагами и уже в 1864 г. создаётся первая трансконтинентальная линия между Европой и Америкой [9].

Параллельно с развитием слаботочного телеграфа всё более актуальной становится задача передачи мощности на большие расстояния от источников до мест потребления электроэнергии для появляющегося машинного электропривода и развивающегося электрического освещения. Важным шагом к её решению становится Венская международная выставка 1873 г. На этой выставке французскому изобретателю Ипполиту Фонтену было поручено продемонстрировать императору Австрии обратимость двух машин постоянного тока Грамма. Одна машина должна была работать как генератор, приводимый в действие газовым двигателем, вторая – вращать центробежный насос для приведения в действие декоративного фонтана. Времени на демонстрацию оказалось мало. Не хватало то одного, то другого для решения поставленной задачи. За несколько часов до прихода императора Фонтен придумал соединить генератор с двигателем через кабель длиной 250 м. При этом мощность от генератора к двигателю оказалась слишком большой, и вода под действием насоса выливалась из ёмкости, отведённой для фонтана. Чтобы уменьшить мощность, Фонтен увеличил длину кабеля до 2 км. В результате фонтан заработал нормально, демонстрация прошла успешно и навела на мысль, что электрическую мощность от генератора к двигателю можно передавать по проводам. Но появились сомнения в эффективности такой передачи. Из-за высоких потерь мощности в кабеле считали, что её КПД не будет превышать 50 %. Это же подтверждал и накопленный опыт телеграфной

связи. Зная об этом и анализируя результаты своего эксперимента, Фонтен делает неутешительный вывод о невозможности электрической передачи на большие расстояния [10, 11].

Практически в то же время во многих странах мира, в первую очередь в России, активно ведутся разработки в области электрического освещения. В 1873 г. русский учёный Александр Лодыгин изобретает электродуговую лампу (свечу) [6]. Его работу продолжает другой российский электротехник, Павел Николаевич Яблочков, который создаёт усовершенствованную свечу, сразу нашедшую практическое применение, и совершает переворот в области электрического освещения. Уже в 1879 г. свечи Яблочкова осветили Литейный мост в Санкт-Петербурге [7]. В 1878 г. в Париже этими свечами («русским светом») была освещена улица длиной около километра, а в следующем году – участок набережной Темзы в Лондоне. Развивая исследования в этой области, Павел Николаевич один из первых экспериментирует с применением переменного тока в системах освещения, создавая на базе индукционных катушек прообраз будущего трансформатора. В конце 1870-х гг. реализованные проекты освещения улиц городов в мире уже достигли десятков, для которых передача и распределение электроэнергии выдвинулись на первое место. В 1880 г. в России при непосредственном участии П.Н. Яблочкова создаётся первый электротехнический журнал «Электричество».

В 1882 г. на промышленной выставке в Москве последователь Яблочкова русский учёный Иван Усагин представил усовершенствованный вариант трансформатора переменного тока [3]. Демонстрируя его возможности, Иван Филиппович подключал к трансформатору не только лампы накаливания, но и двигательную нагрузку, доказывая тем самым универсальность применения переменного тока.

В 1880-е гг. уже был освоен промышленный выпуск электрических машин постоянного тока. Первый в мире двигатель, работающий на постоянном токе, в 1834 г. изобретает Борис Семёнович Якоби. Для демонстрации возможностей своего изобретения Якоби устанавливает свой двигатель на катер и устраивает демонстрационные катания по реке Неве (рис. 1) [1, 4]. В 1884 г. на базе двигателя постоянного тока и аккумулятора на свет появился первый электровелосипед, принцип действия которого сохранился и поныне.

Проблема передачи электрической энергии на большие расстояния становилась всё более острой. Для увеличения протяжённости сетей освещения, количества светильников и освещаемых площадей было два пути: увеличивать сечение проводов или повышать напряжение линий для уменьшения тока по линиям при той же передаваемой мощности, чтобы снизить Джоулевы потери в этих линиях. Первый путь хоть и был дорогим, но его поддерживали немецкий изобретатель Вернер фон Сименс и российский инженер



Рис. 1. Электрокатер Якоби

Fig. 1. Jacobi electric boiler

Фёдор Аполлонович Пироцкий. Продолжая исследования Фонтена, Пироцкий в 1874 г. впервые для целей передачи электрической энергии использует железнодорожные рельсы [3, 5, 10, 11], сечение которых было значительно большим по сравнению с сечением проводов телеграфных линий. Первый практический эксперимент был проведён на выведенной из эксплуатации ветке Сестрорецкой железной дороги в 1875 г. Эксперимент оказался удачным, и его результаты нашли практическое применение для последующего развития городского электротранспорта. В 1879 г. Сименс на выставке в Берлине представил первую электрифицированную железнодорожную ветку протяженностью 300 м, а спустя три года в Берлине была построена первая трамвайная линия.

С экспериментов Пироцкого и Сименса начинается новый этап развития передачи электроэнергии на дальние расстояния, но уже не по рельсам, а по проводам. Этому направлению в конце 1870-х гг. было посвящено множество публикаций в разных странах. Весомый вклад в развитие теории передачи на данном этапе внесли французский учёный Марсель Депре [3, 10, 11] и русский физик Дмитрий Лачинов в 1880 г. [12]. Оба практически одновременно приходят к выводу, что для повышения эффективности передачи на постоянном токе необходимо повышать уровень напряжения. Для подтверждения этой гипотезы в 1882 г. Марсель Депре в Германии строит первую линию электропередачи длиной 57 км. Передача всё ещё осуществляется по телеграфным проводам из стали, но на напряжении 1,5–2 кВ. Одновременно с этим в разных странах мира проводятся аналогичные эксперименты по передаче на постоянном токе и повышенном напряжении, однако все они не показывали достаточную эффективность. Причиной тому было отсутствие надёжных изоляционных материалов для снятия высокого напряжения с коллекторов динамо-машин постоянного тока большой мощности. В то время построить такие динамо-машины постоянного тока было практически невозможно. Нужны были новые идеи. Ключевой из них стала идея перехода с постоянного тока на переменный. Но для

этого инициаторам и сторонникам переменного тока предстояло преодолеть целый ряд трудностей и победить в достаточно продолжительной и ожесточённой дискуссии, которая впоследствии стала известна всему миру как «Война токов» [13–15].

Битва титанов электротехники за выбор оптимального пути. В истории мировой электроэнергетики в целом и передачи электрической энергии в частности именно этот этап является наиболее интересным, драматичным и, в определённой мере, поучительным с точки зрения опыта превращения лабораторных исследований в промышленно используемые технологии. К концу XIX в. инженерное сообщество электротехников разделилось на два лагеря: сторонников постоянного и переменного тока. Этим двум лагерям предстояла нешуточная борьба в доказательстве состоятельности и преимуществ отстаиваемых технических решений.

Одним из ярких защитников постоянного тока был талантливый и предприимчивый американский изобретатель и предприниматель Томас Эдисон. Он достаточно быстро понял, что электротехника и электроэнергетика – это весьма перспективные направления развития промышленности и общества, а следовательно, и развития бизнеса на долгие годы вперёд. К тому времени, как отмечалось выше, повсеместно возрастает спрос на электрическое освещение, и в 1882 г. Томас Эдисон регистрирует компанию «Эдисон Электрик Лайт Компани» (впоследствии известную как *General Electric*). Компания быстро развивается, старается захватить рынок электроосвещения, растёт численность её персонала.

Одновременно главным сторонником и инвестором разработок в области переменного тока становится выдающийся американский изобретатель, электротехник и предприниматель Джордж Вестингауз – основатель компании «Вестингауз Электрик» (в перспективе долгое время основной разработчик и поставщик электротехнической продукции в мире). В то время компания Вестингауза делает ставку на применение генераторов переменного тока (рис. 2). Активным союзником Вестингауза и защитником переменного тока стал великий сербский инженер и изобретатель Никола Тесла

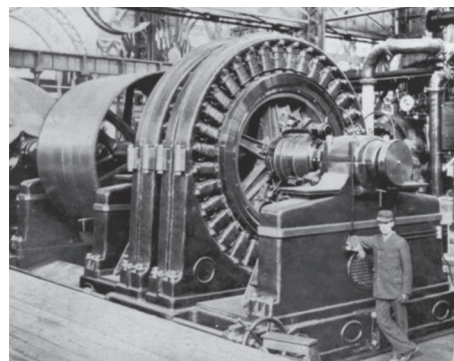


Рис. 2. Генератор «Вестингауз Электрик»

Fig. 2. Westinghouse Electric generator

[13, 14]. Интересно, что первоначально он работал в компании Эдисона, который не верил в перспективы переменного тока. Поэтому Джорджу Вестингаузу не составило большого труда переманить к себе Николу Тесла, который возглавил в компании Вестингауза направление производства асинхронных двигателей на переменном токе.

Именно в эти годы начинается ожесточённый технический спор («Война токов») между Джорджем Вестингаузом, Николой Тесла с одной стороны и Томасом Эдисоном – с другой (рис. 3). Компания Эдисона разворачивает, как бы сейчас сказали, активную PR-кампанию против переменного тока. Публикуется специальное издание «Предостережение», в котором на переменный ток обрушивается поток критики, ключевым аргументом которой является его опасность для человека. Наглядно показывается, насколько губительным для человека может быть переменный ток [15]. Томас Эдисон прибегает при этом к совсем радикальным мерам, применив переменный ток для казни на электрическом стуле.

Тем не менее, несмотря на нагнетаемые Эдисоном страхи и ужасы, в конце 1880-х гг. начинаются активные работы по многофазным переменным токам многими учёными и инженерами, в том числе Галилео Феррарисом, Чарльзом Шенком Бредли, Йонсом Венстромом, Фридрихом Августом Хазельвандером, Николой Тесла [16]. Наибольшую известность и практическое применение получили изобретения Теслы. К тому времени он получил более 40 патентов по многофазным токам и в 1888 г. продал их фирме «Вестингауз». В этих патентах были заявлены почти все варианты переменного тока: однофазный, двухфазный, трёхфазный, четырёхфазный и т.д. На практике Тесла отдавал предпочтение двухфазной схеме, по которой стали изготавливать электрические двигатели для продажи. Но, к сожалению, эти двигатели имели серьёзный недостаток из-за повышенной пульсации магнитного поля в них и сопутствующего снижения КПД. Поэтому начались разработки в области создания трёхфазной системы переменного тока с более равномерным вращающимся полем. Одновременно над её созданием работают Никола Тесла («Вестингауз Электрик») и инженер русского происхождения Михаил Доливо-Добровольский (работавший в немецкой компании «AEG»). Победителем в соревновании с Эдисоном становится Доливо-Добровольский (рис. 4), который сегодня по праву считается отцом-основателем трёхфазной передачи переменного тока [3, 8, 16, 17].

Михаил Осипович подробно ознакомился с трудами и патентами Николы Теслы, итальянского физика Галилео Феррариса по вращающемуся магнитному полю и в 1891 г. на встрече электротехников в Берлине признал: «Я обязан добавить, что приоритет многофазных машин принадлежит Тесле ... Я имею в виду американский патент № 390414, выданный ему

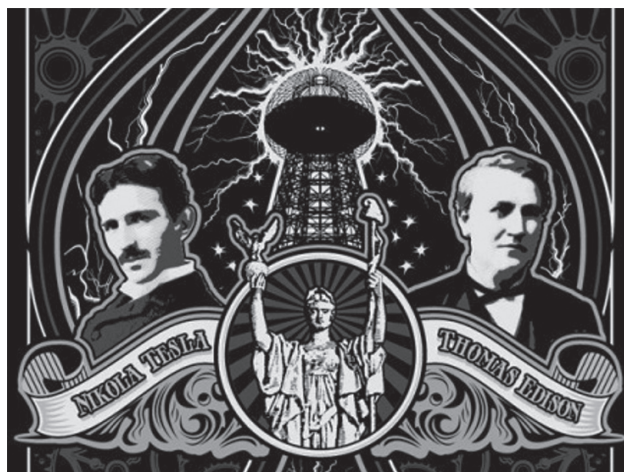


Рис. 3. Плакат «Война токов» [14]

Fig. 3. The "War of Currents" poster [14]

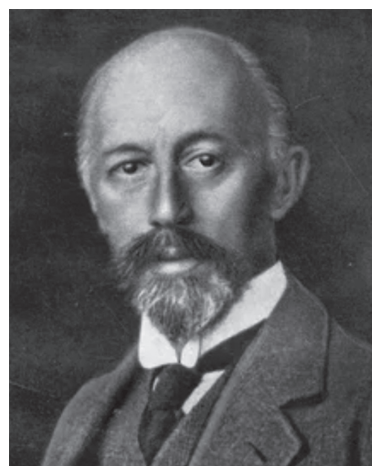


Рис. 4. Михаил Осипович Доливо-Добровольский

Fig. 4. Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolsky

2 октября 1888 года» [16]. На основе обстоятельного анализа работ коллег Доливо-Добровольский делает научно-обоснованный вывод, что именно трёхфазный переменный ток является более перспективным и лишённым недостатков своего предшественника, а также патентует ключевые характеристики трёхфазных систем [8, 16, 17]. В 1889 г. он изобрёл асинхронный трёхфазный двигатель с короткозамкнутым ротором и в том же году – компактный трёхфазный трансформатор. В следующем 1890 г. он создаёт трёхфазную схему с нулевым проводом для осветительной сети. Таким образом, в конце 1880-х гг. Михаилом Осиповичем были разработаны основные принципы и созданы конструкции трёхфазного электроснабжения, которые подтвердили экономичность, удобство и универсальность передачи электроэнергии от генераторов к электроприёмникам на трёхфазном переменном токе. Эти принципы в главном сохранились и поныне.

Триумфом переменного тока, ознаменовавшим условное окончание «Войны токов», стала Междуна-

родная электротехническая выставка во Франкфурте-на-Майне, прошедшая в 1891 г. Компания AEG получила контракт на передачу мощности от генератора, установленного на водопаде на реке Неккар около города Лауфен, на расстояние 170 км на выставку до Франкфурта (рис. 5). Это был вызов и шанс доказать всему миру возможности трёхфазной передачи электроэнергии. Руководить проектом было поручено М.О. Доливо-Добровольскому [8, 16, 17]. Вызов был принят, и всего за 6 месяцев была построена трёхфазная линия электропередачи на напряжении 15 кВ, с помощью которой запущен самый мощный на тот момент трёхфазный асинхронный двигатель (рис. 6) насоса для искусственного водопада и подключены более 1000 ламп накаливания для освещения территории выставки. При этом потребовалось: изготовить два повышающих трёхфазных трансформатора на станции и два понижающих трансформатора на выставке; установить опоры линии электропередачи, на которых закрепить на изоляторах арендованные медные провода; оснастить линию измерительными приборами и устройствами защиты. КПД линии электропередачи составил рекордную на то время величину 75,2 %.

Следует заметить, что успех М.О. Доливо-Добровольского и его победа на выставке не были безоблачными. Даже ближайший его соратник Чарльз Браун из фирмы «Эрликон», бывшей соисполнителем по проекту, приписывал себе разработку асинхронного двигателя, утверждал, что система трёхфазного переменного тока придумана Николой Тесла, и считал, что электропередачу на выставке надо было делать однофазной, как более надёжной [16]. Но жизнь впоследствии всё расставила на свои места. Победителем в соревновании с Эдисоном становится Доливо-Добровольский (рис. 4), который сегодня по праву считается отцом-основателем трёхфазной системы передачи переменного тока [3, 8, 16, 17].

После выставки во Франкфурте Михаил Доливо-Добровольский приложил много усилий к популяризации трёхфазных систем переменного тока. Спустя несколько лет в докладе, опубликованном журналом «Электричество», Михаил Осипович так описывал случившееся: *«Электрическая выставка 1891 г. во Франкфурте-на-Майне была главным образом тем важна в истории электротехники, что на ней в первый раз выступил публично как новая система так называемый трёхфазный ток (далее Т.Ф.). Несмотря на то, что вращающееся магнитное поле было открыто профессором Феррарисом за 5-6 лет до того и имело в свою очередь предвестников (см. работы Дедре, Бейлэя и др.), несмотря на то что опыты Н. Тесла, а также и мои существовали уже года за два до этой выставки, всё же год этой выставки (1891) должно считать, так сказать, годом рождения Т.Ф. тока. Техника не заботится много о лабораторных опытах, мало интересуется теоретическими размыш-*

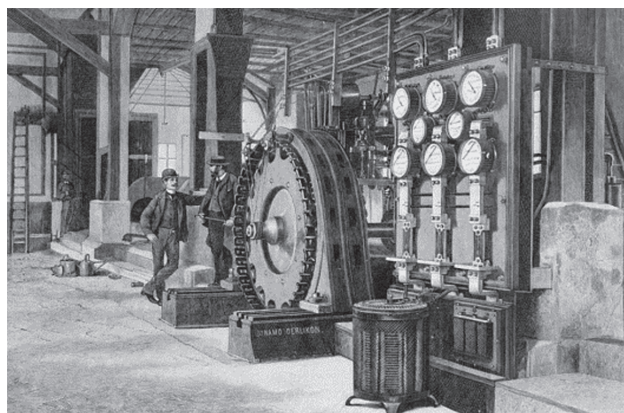


Рис. 5. Генератор электростанции на водопаде в Лауфене
Fig. 5. Generator of the power plant at the waterfall in Laufen

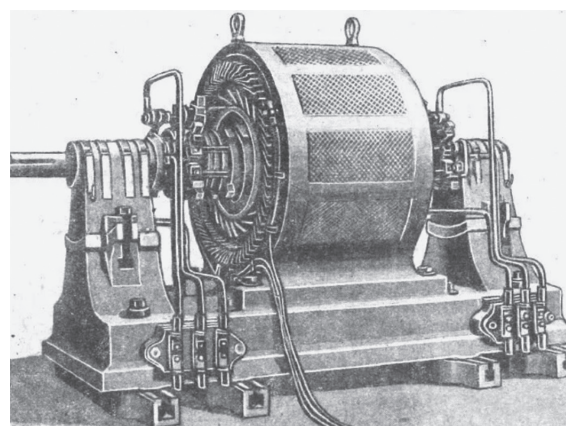


Рис. 6. Трёхфазный двигатель переменного тока AEG (М.О. Доливо-Добровольского)

Fig. 6. AEG three-phase alternating current motor (M.O. Dolivo-Dobrovolsky)

лениями и «возможностями», она приветствует открытия лишь тогда, когда ей покажут, что из них можно кое-что «сделать», покажут хотя бы и не в законченной, но, по крайней мере, в сколь-нибудь практической форме (выделено авторами)». [17]. Это утверждение и жизненная позиция великого инженера-исследователя и изобретателя и сегодня не только не потеряли, но приобретают всё большую актуальность. В те годы доведение «лабораторных опытов» до законченных практических результатов послужило основой для сокрушительной победы переменного тока на многие годы вперёд. В настоящее время такие победы и умения промышленного внедрения новых и прорывных технологий особенно необходимы для скорейшего и устойчивого обеспечения технологического суверенитета России.

Справедливости ради следует отметить, что победа переменного тока на том историческом этапе развития была не абсолютной, а относительной и временной. Забегая вперёд, можно констатировать, что постоянный ток уже давно занял надёжное место на дальних

линиях электропередачи сверхвысокого напряжения ряда стран, на подводных высоковольтных кабельных линиях. Сегодня всё активнее идут дискуссии о целесообразности применения постоянного тока в распределительных сетях. Разрабатываются и строятся сверхпроводящие кабельные линии постоянного тока. Для этого имеются вполне убедительные технико-экономические предпосылки [18], рассмотрение которых не является предметом настоящей статьи. Важен факт, что на разных этапах создания новых и прорывных технологий всегда существуют конкуренция и альтернативные варианты их развития. Выбор и практическая реализация наиболее оптимального из них, как правило, требуют: высокой квалификации, значительных усилий и времени талантливых команд исполнителей; глубокой убежденности в правоте своего дела и умении его отстаивать; материальных и финансовых средств квалифицированных заказчиков и спонсоров; поддержки государства. Полноценное технологическое развитие возможно только в честной борьбе мнений, тщательном изучении и использовании работ предшественников и конкурентов, в умении объединять к сотрудничеству талантливых единомышленников для решения сложных комплексных задач.

Несмотря на все противоречия, принципиальные разногласия, участники «Войны токов» навсегда вписали свои имена в мировую историю электротехники, в память потомков и внесли свой неоценимый вклад в её развитие на более, чем столетний период.

Современные тенденции и перспективы развития. С 1890 г. современное потребление электрической энергии в мире выросло примерно в 3000 раз и составило около 25,5 трлн кВт.ч [19]. Население планеты за это же время увеличилось более чем в 5 раз и уже превышает 8 млрд чел. Переход от паровой энергии к электрической, который принято называть второй промышленной революцией, а также период последующего развития технологий передачи электроэнергии принципиальным образом изменили облик планеты и жизнь человечества. Сегодня мир стоит на пороге нового энергетического перехода, обусловленного развитием цифровых технологий, изменением климата, ростом требований к надёжности, качеству, экономичности и доступности электрической энергии. Как и 100 лет назад, эти вызовы и изменения нельзя игнорировать. Их необходимо учитывать в программах технологического развития на среднесрочные и долгосрочные периоды.

Традиционно ключевыми составляющими очередного этапа энергетического перехода принято считать: Декарбонизацию; Децентрализацию; Диджитализацию – сокращенно 3D (от англ. *Decarbonisation, Decentralisation, Digitalisation*).

Декарбонизация обусловлена необходимостью радикального сокращения загрязняющих выбросов в атмосферу земли и, как следствие, необходимостью

постепенного замещения ископаемых видов топлива (в первую очередь, уголь и нефть) «зелёными» источниками энергии (в первую очередь, энергией солнца и ветра).

Децентрализация вызвана объективным развитием технологий накопления электрической энергии, потенциальной возможностью снижения зависимости от крупных источников питания, необходимостью повышения экономической эффективности работы энергосистем и потребителей.

Цифровая трансформация (Диджитализация) обусловлена стремительным развитием информационных технологий: вычислительных мощностей процессоров; новых алгоритмов обработки информации; нейросетей (искусственного интеллекта) и др. Всё это открывает новые возможности для создания имитационных моделей (цифровых двойников) объектов и процессов в электроэнергетике, новых алгоритмов работы защит и автоматики, интеллектуального оборудования, систем поддержки принятия решений, предиктивной аналитики, новых схемных решений для сетей и подстанций, развития автокластерных электрических сетей. Как следствие, появляется возможность совершенствовать сложившиеся организационные и бизнес-модели субъектов электроэнергетики, повышая их операционную эффективность в направлении улучшения потребительских свойств электрической энергии (надёжность, качество, экономичность и доступность).

Все 3D-направления сегодня активно развиваются и обсуждаются в мире и в России. Каждое из них формирует набор гипотез, исследований и разработок, у которых есть как союзники, так и противники. Декарбонизация и развитие возобновляемой энергетики зачастую сильно политизированы и вызывают много споров. Так, большинство стран сделали ставку на то, что «зелёной» энергетикой являются только солнечные и ветряные электростанции. Под этим влиянием ряд стран отказались от развития атомной энергетики. Одновременно, в 2022 г. Еврокомиссия квалифицировала атомную энергетику как «зелёную» [20], а основатель компании Microsoft Билл Гейтс инвестирует миллиарды долларов в развитие малых атомных реакторов [21]. Ведутся активные работы в этом направлении и в России. Децентрализация, с одной стороны, приводит к активному развитию технологий изолированных *MircoGrids* (микросетей с ориентацией на локальные возобновляемые источники энергии). Одновременно наблюдается тренд на строительство централизованных ветропарков и солнечных электростанций большой мощности. Цифровизация охватывает все больше областей деятельности человечества. В то же время не прекращаются дискуссии: что первично – модернизация критически изношенных активов в электроэнергетике или внедрение цифровых технологий; каковы цена и риски информационной безопасности; каковы сферы применения цифровизации в технике, технологиях, бизнес-процессах и в принятии управленческих

решений; каковы риски широкого применения искусственного интеллекта для человечества в целом.

При всей объективности и неизбежности перечисленных тенденций и вызовов, вероятнее всего, наиболее оптимальными сценариями развития электроэнергетики в мире будут комбинации традиционных подходов с новыми направлениями. В этом смысле всем странам, в том числе и России, предстоит не революционное, а скорее эволюционное развитие с учётом национальных, природных, исторических и экономических особенностей этих стран. Для России, в рамках Национальной технологической инициативы «Энерджинет», такой подход был сформулирован как «3С» (сообеспечение, соорганизация, соразвитие). В сравнении с «3D» данная концепция так отвечает на главные вопросы о развитии энергетики:

вместо полного «отказа от углерода» – экономически приемлемое управление низко-углеродными и безуглеродными энергетическими ресурсами местности;

вместо механической фрагментации энергосистемы – создание сети внутренне сбалансированных энергетических ячеек, сотрудничающих друг с другом и с «большими» энергосистемами предыдущего уклада;

вместо цифровизации бизнес-процессов энергетических компаний предыдущего уклада – переход к новым практикам самоорганизации людей и сообществ на базе цифровых технологий.

Также безусловным является тот факт, что все современные вызовы и тенденции, формирующие принципиально новые задачи для современных инженеров-энергетиков, должны эффективно решаться, опираясь на фундамент и опыт, сформированный предшественниками.

Следует отметить, что во всех перечисленных направлениях развития российские учёные и инженеры всегда принимали и принимают активное и непосредственное участие. В частности, основы цифровой трансформации Единой энергетической системы России были заложены в начале 1970-х гг. в СССР при создании интегрированной отраслевой автоматизированной системы управления (ИОАСУ) «Энергия» [22], когда началось активное внедрение вычислительной техники в энергетику страны. Уже тогда стали внедряться математические методы, алгоритмы и компьютерные программы оптимизации режимов энергосистем, электрических сетей и управления их развитием. В 1990-е гг. данный опыт активно изучался крупнейшей французской энергетической компанией *Electricite de France (EDF)* и другими зарубежными компаниями. С тех пор эта работа не прекращалась и продолжает совершенствоваться до сегодняшнего дня. Сегодня, как и раньше, российские инженеры-исследователи и компании-разработчики вносят важный вклад в создание и развитие технологий энергетики будущего, создают перспективное электросетевое оборудование и программное обеспечение, которые по многим параметрам являются лучшими в мире.

Развитие технологий – объективный непрерывный процесс. Об этом свидетельствует вся история развития человечества. Многие гипотезы, которые ещё вчера составляли сюжет научно-фантастических рассказов, спустя десятилетия трудами ученых, изобретателей, технологических предпринимателей становятся реальностью. История развития науки и техники свидетельствует о том, что предела для рождения новых идей и открытий не существует. Как в своё время Леонардо Да Винчи в XVI в., опередив время на столетия, предсказал появление многих инженерных механизмов, так и в трудах последующих поколений и наших современников было и есть много интересных гипотез, которые могут воплотиться в жизнь уже в ближайшем будущем.

Одной из таких гипотез является идея Николы Тесла «О беспроводной передаче электрической энергии» (рис. 7). В 1905 г. в своей лекции с одноименным названием он сказал: «*В многочисленных наблюдениях, экспериментах и измерениях, качественных и количественных, я безошибочно установил, что электрическую энергию можно экономически эффективно передавать беспроводным способом на любое расстояние в пределах Земли. Они продемонстрировали, что возможно распределять энергию с центральной станции в неограниченных количествах с потерями, не превышающими малой части одного процента, при передаче даже на самые большие расстояния в 12 тысяч миль – на противоположный конец земного шара ... Экономичная беспроводная передача энергии имеет для человека превосходящую важность. С её помощью он получит полное господство в воздухе, на воде и в пустыне...*» [23].

Звучавшая ещё пару десятков лет назад как фантастика, данная гипотеза уже сегодня начинает находить воплощение в жизни. Первые робкие шаги беспроводной передачи электроэнергии делают устройства и системы для зарядки мобильных устройств, в том числе электромобилей и электробусов, беспилотных летальных аппаратов. Во многих странах мира сегодня трудится множество научных групп над разработкой проектов *Space Based Power Plant* (космическая элек-

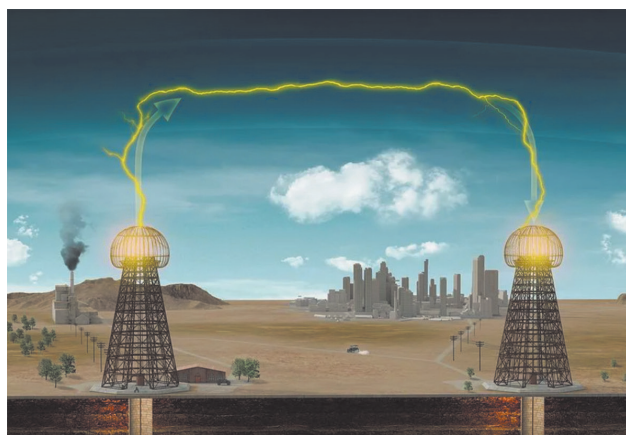


Рис. 7. Передающая башня Николы Тесла

Fig. 7. Nikola Tesla transmission tower

тростанция) [24]. Основная ставка сделана на космическую солнечную электростанцию и беспроводную технологию передачи электрической энергии от этих станций на Землю. Первым идею космической электростанции высказал в далёком 1968 г. американский учёный Питер Глейзер [25].

На пути практической реализации этой идеи перед современными учёными и изобретателями, как и всегда в начале, стоит огромное количество казалось бы непреодолимых проблем: строительства и сборки многомодульных конструкций в космосе; их технического обслуживания и защиты от космического мусора, метеоритов и астероидов; передачи электроэнергии из космоса на Землю; строительства приёмных станций; обеспечения надёжности, качества и безопасности работы оборудования и доставки электроэнергии потребителям и т.д. Но также маловероятно, что эти проблемы способны остановить исследования: всё больше стран начинают работу над такими проектами.

Ученые из Японии предложили вариант размещения вокруг Луны солнечных панелей, производимых из лунного грунта. В России в МИРЭА [26] прорабатывается технология двухступенчатой солнечной энергосистемы с размещением солнечных панелей на орбите Земли (рис. 8).

Очевидно, что на наших глазах закладываются основы энергетики следующего технологического уклада. Сколько на это понадобится времени? Сейчас трудно ответить. Никола Тесла об этом написал так [23]: «...Человечество ещё не развито достаточно, чтобы охотно следовать за пытливым проникающим рассудком. Но кто знает? Возможно, в этом нашем современном мире лучше, чтобы революционная идея или изобретение вместо поддержки или поощрения подвергались стеснениям и плохому отношению в период своей юности – по причине недостатка средств, корыстного интереса, педантизма, тупости и невежества; чтобы их критиковали и душили; чтобы они прошли через мучительные испытания и злоключения,

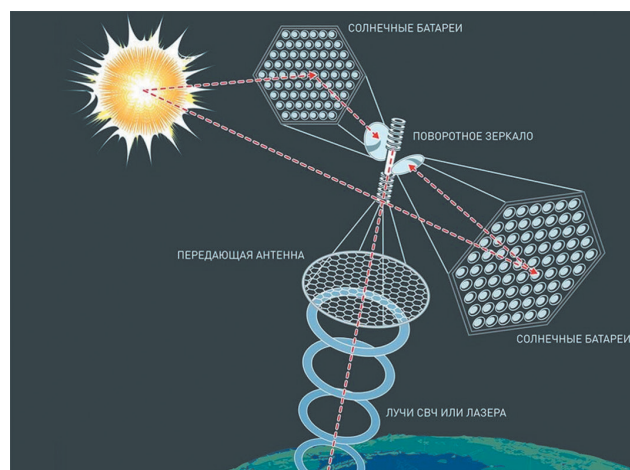


Рис. 8. Двухступенчатая орбитальная солнечная электростанция

Fig. 8. Two-stage orbital solar power plant

через безжалостное противостояние коммерческого существования. Именно так мы получаем свой свет. Так всё, что было великого в прошлом, высмеивали, проклинали, боролись с ним, подавляли – только для того, чтобы оно выходило из борьбы с ещё большей мощью, с ещё большим триумфом...».

Ещё один известный инженер, наш современник, технологический предприниматель Стив Джобс (основатель компании *Apple*) сказал: «Безумцы, уверенные, что могут изменить мир – на самом деле его меняют». Опираясь на знания и опыт предшественников, не боясь ставить невозможные цели и выдвигать смелые гипотезы, с обеспечением преемственности поколений, возможны и необходимы новые открытия и достижения на благо эффективного технологического развития электротехники и электроэнергетики. При этом очевидно, что это развитие должно быть направлено не на военные цели, гегемонию одних стран над другими, а на повышение качества жизни всего населения планеты Земля.

Изучение истории – путь к развитию. Вся история мировой электротехники и электроэнергетики – непрерывный процесс, в котором вне зависимости от внешних факторов никогда не прекращались международная кооперация и неизбежная конкуренция между учёными, инженерами, изобретателями и технологическими компаниями, и в котором с самых первых его шагов русская инженерная школа играла ключевую, а подчас определяющую роль.

Основной продукт электроэнергетики – доступная, качественная и надёжная электрическая энергия с приемлемой ценой для потребителей в современном мире играет первостепенное и возрастающее значение. По этой причине сегодня исключительно важна популяризация профессии энергетика среди молодёжи, которой предстоит создавать энергетику будущего и которой необходимо рассказывать об удивительной истории мира электричества, о роли и месте русских инженеров в её развитии. Технологический суверенитет невозможен без суверенитета когнитивного, когда страна в определённой области деятельности обладает достаточным количеством фундаментальных и прикладных знаний для формирования и отстаивания собственной точки зрения. Сам по себе технологический суверенитет – это не изоляция, а способность предложить и себе и миру лучшие инженерные решения.

Сегодня электроэнергетика России остро нуждается в привлечении в свои ряды наиболее талантливой и активной молодежи, в постоянном повышении квалификации работающих специалистов, в росте престижа энергетических инженерных профессий, в популяризации и разъяснении роли отрасли в технологическом развитии мировой экономики и экономики России.

По этой причине в рамках реализации плана мероприятий «дорожной карты» Национальной технологической инициативы «Энерджинет» [27] в 2023 г. стартовало одновременно несколько инициатив:

создание на ВДНХ культурно выставочного центра (КВЦ), посвященного истории будущего в сфере электротехники и электроэнергетики – «МИР ЭЛЕКТРИЧЕСТВА»;

создание общероссийского курса по истории развития мировой электротехники и электроэнергетики;

развитие с 2019 г. на базе энергетических вузов сети лабораторий моделирования распределительных сетей будущего (*ENERGYNET.LAB*).

На сегодняшний день лаборатории *ENERGYNET.LAB* открылись в Ивановском энергетическом университете (ИГЭУ), Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) (рис. 9), Белорусском национальном техническом университете (БНТУ). В 2023 г. в тестовом режиме на базе этих лабораторий в БНТУ, ИГЭУ, КГЭУ, НГТУ, а также в Уральском федеральном университете и Алма-Атинском университете энергетики и связи стартовал первый онлайн курс сетевой магистратуры «Энерджинет» – «Цифровые распределительные электрические сети». Совместно с экспертами-методологами разработана и внедряется модель образовательной деятельности, в которой присутствуют: онлайн теоретический курс, различные интерактивные форматы сетевого общения ребят из разных вузов между собой и с экспертами, а также участие в решении реальных практических задач.

В 2023 г. разработана и согласована первая редакция Концепции КВЦ «МИР ЭЛЕКТРИЧЕСТВА». Экспозиция, мероприятия, тематические выставки КВЦ должны обеспечивать: познание основ электричества, истории электротехники и электроэнергетики; знакомство с технологиями производства, передачи, распределения и использования электрической энергии; формирование представлений о будущем электроэнергетики и путях решения ключевых научно-технических и практических задач её развития; осознание ценности электроэнергетики для благополучия и развития общества. Главная задача КВЦ – представить наглядно, ярко и убедительно эволюцию мировой и отечественной электротехники и электроэнергетики, роль и место русских инженеров в этой эволюции, тенденции и перспективы развития отрасли. Продемонстрировать безусловную связность и преемственность мировых научно-технологических достижений, передовых научных школ и разработчиков новых технологий в мире. Подготовительными этапами к созданию КВЦ на ВДНХ послужили две выставки по эволюции мировой и отечественной электротехники в июле и октябре-ноябре 2023 г. в Москве и Севастополе (рис. 10).

Выставки вызвали большой интерес и много положительных отзывов. На них была продемонстрирована издаваемая с 2020 г. компанией «Таврида Электрик» Библиотека энергетика с перепечаткой наиболее интересных книг по истории электротехники и электроэнергетики и биографий известных российских инженеров и ученых, в том числе [3–8] (рис. 11).



Рис. 9. Лаборатория *ENERGYNET.LAB* на базе Новосибирского государственного технического университета

Fig. 9. *ENERGYNET.LAB* laboratory on the basis of Novosibirsk State Technical University



Рис. 10. Фрагмент выставки с образцами эволюции коммутационной аппаратуры разных поколений

Fig. 10. A fragment of the exhibition with evolution samples of switching equipment of different generations



Рис. 11. Фрагмент выставки с образцами литературы по истории электротехники

Fig. 11. A fragment of the exhibition with samples of literature on the electrical engineering history

Это открытые проекты, в которых могут участвовать все заинтересованные стороны: отраслевые эксперты, компании, учебные заведения и институты развития.

Выводы. Развитие мировой электротехники и электроэнергетики – непрерывный эволюционный процесс. Знание ключевых этапов развития, изучение опыта выдающихся учёных, изобретателей, технологических предпринимателей – важнейшая составляющая успешной творческой инженерной деятельности.

Российская электротехника и электроэнергетика по многим направлениям была, до сих пор находится и должна оставаться в авангарде развития современных и перспективных техники и технологий, в том числе цифровых, для совершенствования и развития систем управления в отрасли.

Обеспечение технологического и энергетического суверенитета России, её конкурентоспособности на международных рынках требует популяризации профессии энергетика и новых подходов к высшему техническому образованию. Профессиональные патриотизм и квалификация будущих инженеров-энергетиков должны воспитываться на основе изучения истории и достижений мировой и отечественной электротехники и электроэнергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воротницкий В.Э.** Уроки истории техники и технологий передачи электроэнергии во второй половине XIX века. – Энергоэксперт, 2023, № 1, с. 14–23.
2. **Воротницкий В.Э.** Тенденции и перспективы развития техники и технологий передачи и распределения электроэнергии. – Энергоэксперт, 2023, № 2, с. 28–33.
3. **Белькинд Л.Д. и др.** Учебник энергетической техники. М.: Б.и., 2020, 828 с.
4. **Яроцкий А.В.** Якоби Борис Семёнович. М.: Б.и., 2020, 292 с.
5. **История электротехники** / под ред. И.А. Глебова. М.: Издательство МЭИ, 1999, 524 с.
6. **Белькинд Л.Д.** Александр Николаевич Лодыгин [1847–1923]: Очерк жизни и деятельности. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1948, 64 с.
7. **Белькинд Л.Д.** Павел Николаевич Яблочков. Жизнь и труды. М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1950, 379 с.
8. **Веселовский О.Н.** Михаил Осипович Доливо-Добровольский. М.: Радугапринт, 2021, 348 с.
9. **История развития проводных каналов связи** [Электрон. ресурс], URL: https://www.myuniversity.ru/Информатика/История_развития_проводных_каналов_связи/325296_2898016_страница1.html (дата обращения 12.01.2024).
10. **Первые** опыты передачи электроэнергии на расстояние [Электрон. ресурс], URL: <https://elektrobgu.narod.ru/Chast444/Peredachaelectroenergii/newpage2.htm> (дата обращения 12.01.2024).
11. **Бородин Д.А.** Мюнхенская выставка Оскара фон Миллера. Ч. 2. Замечательный результат (к 140-летию Мисбах-Мюнхенской электропередачи М. Дёпре). – Электричество, 2023, № 1, с. 61–75.
12. **Лачинов Д.** Электромеханическая работа. – Электричество, 1880, № 1, с. 9–11, 1880, № 2, с. 27–30.
13. **Цверева Г.К.** Никола Tesla. М.: Наука, 1974, 211 с.
14. **Война токов – Tesla против Эдисона** [Электрон. ресурс], URL: <https://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/1630-vojna-tokov-tesla-protiv-jedisona.html> (дата обращения 12.01.2024).
15. **Об опасности** электрического освещения. – Электричество, 1890, № 2, с. 29–32.

16. **Бородин Д.А.** «Drehstrom» – вращающийся ток (к 160-летию со дня рождения М.О. Доливо-Добровольского). – Электричество, 2022, № 1, с. 53–64.

17. **Современное** развитие техники трехфазного тока. Доклад М.О. Доливо-Добровольского. – Электричество, 1900, № 4, с. 49–57, 1900, № 5–6, с. 65–78.

18. **Суслова О.В.** Тенденции развития и применения технологий передачи электроэнергии постоянным током: мировой и отечественный опыт. – Энергоэксперт, 2019, № 4, с. 32–42.

19. **Мировая** энергетика. Топливные балансы [Электрон. ресурс], URL: <https://www.eeseaacc.org/toplivnye-balansy> (дата обращения 12.01.2024).

20. **Brussels** Controversially Labels Gas and Nuclear Energy as Green Despite a Growing Backlash. – Euronews, 2022 [Электрон. ресурс], URL: <https://www.youtube.com/watch?v=2fpttkv6dEw> (дата обращения 12.01.2024).

21. **Bill** Gates and the US Energy Department to Develop Small Nuclear Power Reactors that are Less Expensive, More Efficient and 'Could Power America's Energy Future'. – Daily Mail, 2018 [Электрон. ресурс], URL: <https://www.dailymail.co.uk/news/article-6100489/amp/Bill-Gates-Energy-Department-develop-small-nuclear-power-reactors.html> (дата обращения 12.01.2024).

22. **Основные** научно-технические требования к созданию интегрированной отраслевой автоматизированной системы управления Минэнерго СССР (ИОАСУ-ЭНЕРГИЯ) [Электрон. ресурс], URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200041102> (дата обращения 12.01.2024).

23. **Никола Tesla.** Лекции. [Электрон. ресурс], URL: <https://litportal.ru/avtory/nikola-tesla-2/kniga-lekcii-1071598.html> (дата обращения 12.01.2024).

24. **Передача** электроэнергии без проводов – от начала до наших дней [Электрон. ресурс], URL: <https://habr.com/ru/post/373183> (дата обращения 12.01.2024).

25. **Space-Based** Solar Market Worth \$821m by 2027 – Report [Электрон. ресурс], URL: <https://www.powerengineeringint.com/solar/space-based-solar-market-worth-821m-by-2027-report> (дата обращения 12.01.2024).

26. **Сигов А.С., Матюхин В.Ф.** Пути развития солнечных стратосферных аэрокосмических энергетических комплексов с дистанционной передачей энергии. – Лазеры в науке, технике, медицине, 2014, с. 50–60.

27. **План** мероприятий («дорожная карта») «Энерджинет» Национальной технологической инициативы, 2016, 141 с.

Поступила в редакцию [22.01.2024]
Принята к публикации [28.03.2024]

Авторы:



Воротницкий Валерий Эдуардович – доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «Научно-технический центр Россети ФСК ЕЭС», Москва, Россия; vve46@yandex.ru



Воротницкий Владислав Валерьевич – заместитель генерального директора ООО «Таврида Электрик», Москва, Россия; vvv@tavrida.ru

Lessons from the History and Prospects for the Development of Electric Power Transmission

VOROTNITSKIY Valeriy E. (JSC "Scientific and Technical Center of Rosseti FGC UES», Moscow, Russia)
– Chief Scientific Officer, Dr. Sci. (Eng.), Professor.

VOROTNITSKIY Vladislav V. (Tavrida Electric LLC, Moscow, Russia) – Deputy General Director.

The article addresses the important topic of the need to use the experience and lessons drawn from the world and national history of electrical engineering in ensuring accelerated technological development of Russia. The history of electrical engineering began almost 200 years ago and has gone through a difficult path from the first low-current telegraph lines to modern powerful national grids and interstate power pools. The optimal solutions for electricity transmission over long distances from power plants to consumers were born in the course of scientific and technical disputes, competition and international cooperation. The historical lessons show that Russian scientists and engineers have long been and remain among the world's leaders in electrical engineering, and that the development of the electric power industry is a continuous evolutionary process. Knowledge of the key stages of this development, the study of the experience of outstanding scientists, inventors and technological entrepreneurs is among the most important components of successful creative engineering activities today and in the foreseeable future. The article provides a brief analysis of the history of transmission and distribution of electricity in the 19th century, including the ongoing debate between supporters and opponents of direct and alternating current. The current trends and prospects for the development of electric networks in the world and Russia are considered. It is shown that the solution of new challenges faced by electrical engineers should be based not only on these trends, prospects and new developments, but also on the knowledge and experience of their predecessors. For the practical use of this experience and introduction of new technologies, an approach is proposed, which involves step-by-step training, advanced training, and attraction of talented and active youth to the Russian electric power industry through studying its history, new management methods, and setting up modern training courses and laboratories.

Key words: electrical engineering, electric power industry, transmission, distribution of electricity, direct current, alternating current, engineering, technology, history, technological development

REFERENCES

1. Vorotnitskiy V.E. *Energoekspert – in Russ. (Energy Expert)*, 2023, No. 1, pp. 14–23.
2. Vorotnitskiy V.E. *Energoekspert – in Russ. (Energy Expert)*, 2023, No. 2, pp. 28–33.
3. Bel'kind L.D. et al. *Uchebnik energeticheskoy tekhniki* (Textbook of Energy Engineering). M.: B.i., 2020, 828 p.
4. Yarotskiy A.V. *Yakobi Boris Semyonovich* (Jacobi Boris Semyonovich). M.: B.i., 2020, 292 p.
5. *Istoriya elektrotekhniki* (The History of Electrical Engineering) / By Ed. I.A. Glebov. M.: Izdatel'stvo MEI, 1999, 524 p.
6. Bel'kind L.D. *Aleksandr Nikolaevich Lodygin (Alexander Nikolaevich Lodygin) [1847–1923]: Ocherk zhizni i deyatel'nosti* (An Essay on Life and Work). M.-L.: Gosenergoizdat, 1948, 64 p.
7. Bel'kind L.D. *Pavel Nikolaevich Yablochkov. Zhizn' i Trudy* (Pavel Nikolaevich Yablochkov. Life and works). M.-L.: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo, 1950, 379 p.
8. Veselovskiy O.N. *Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolskiy* (Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolsky). M.: Radugaprint, 2021, 348 p.
9. *Istoriya razvitiya provodnykh kanalov svyazi* (The History of the Development of Wired Communication Channels) [Electron. resource], URL: https://www.myuniversity.ru/Информатика/История_развития_проводных_каналов_связи/325296_2898016_страница1.html (Date of appeal 12.01.2024).
10. *Pervye opyty peredachi elektroenergii na rasstoyanie* (The First Experiments in the Transmission of Electricity over a Distance) [Electron. resource], URL: <https://elektrobgau.narod.ru/Chast444/Peredachaelektroenergii/newpage2.htm> (Date of appeal 12.01.2024).
11. Borodin D.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2023, No. 1, pp. 61–75.
12. Lachinov D. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1880, No. 1, pp. 9–11, 1880, No. 2, pp. 27–30.
13. Tsvetava G.K. *Nikola Tesla*. M.: Nauka, 1974, 211 p.
14. *Voyna tokov – Tesla protiv Edisona* (The War of Currents – Tesla vs. Edison) [Electron. resource], URL: <https://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/1630-vojjna-tokov-tesla-protiv-jedisona.html> (Date of appeal 12.01.2024).
15. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1890, No. 2, pp. 29–32.
16. Borodin D.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2022, No. 1, pp. 53–64.
17. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1900, No. 4, pp. 49–57, 1900, No. 5-6, pp. 65–78.
18. Suslova O.V. *Energoekspert – in Russ. (Energy Expert)*, 2019, No. 4, pp. 32–42.
19. *Mirovaya energetika. Toplivnyye balansy* (Global Energy. Fuel Balances) [Electron. resource], URL: <https://www.eeseaec.org/toplivnyye-balansy> (Date of appeal 12.01.2024).
20. Brussels Controversially Labels Gas and Nuclear Energy as Green Despite a Growing Backlash. – Euronews, 2022 [Electron.

resource], URL: <https://www.youtube.com/watch?v=2fpttkv6dEw> (Date of appeal 12.01.2024).

21. **Bill Gates** and the US Energy Department to Develop Small Nuclear Power Reactors that are Less Expensive, More Efficient and 'Could Power America's Energy Future'. – Daily Mail, 2018 [Electron. resource], URL: <https://www.dailymail.co.uk/news/article-6100489/amp/Bill-Gates-Energy-Department-develop-small-nuclear-power-reactors.html> (Date of appeal 12.01.2024).

22. **Osnovnye nauchno-tehnicheskie trebovaniya k sozdaniyu integrirovannoy otraslevoy avtomatizirovannoy sistemy upravleniya Minenergo SSSR** (The Main Scientific and Technical Requirements for the Creation of an Integrated Industrial Automated Control System of the Ministry of Energy of the USSR) [Electron. resource], URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200041102> (Date of appeal 12.01.2024).

23. **Nikola Tesla. Lektsii** (Lectures). [Electron. resource], URL: <https://litportal.ru/avtory/nikola-tesla-2/kniga-lekcii-1071598.html> (Date of appeal 12.01.2024).

24. **Peredacha elektroenergii bez provodov – ot nachala do nashih dney** (Transmission of Electricity without Wires – from the Beginning to the Present Day) [Electron. resource], URL: <https://habr.com/ru/post/373183> (Date of appeal 12.01.2024).

25. **Space-Based Solar Market Worth \$821m by 2027 – Report** [Electron. resource], URL: <https://www.powerengineeringint.com/solar/space-based-solar-market-worth-821m-by-2027-report> (Date of appeal 12.01.2024).

26. **Sigov A.S., Matyuhin V.F. Lazery v nauke, tekhnike, meditsine – in Russ. (Lasers in Science, Technology, Medicine)**, 2014. pp. 50–60.

27. **Plan meropriyatiy («dorozhnaya karta») «Enerdzhinet» Natsional'noy tekhnologicheskoy initsiativy** (Action Plan (Roadmap) of Energynet National Technology Initiative), 2016, 141 p.

Received [22.01.2024]

Accepted [28.03.2024]

Дополнительная информация

об авторах работ, результаты которых опубликованы в журнале
«Электричество», 2024, № 12, с.4–15

Wang T., Huang D., Gu H., Ding F. Flux Pinning at High Magnetic Fields in $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$
Coated Conductors

DOI:10.24160/0013-5380-2023-12-4-15

Уточнение: Автор статьи Wang Tongxin является сотрудником двух организаций:

1) Key Laboratory of Applied Superconductivity and Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2) University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China.

Clarification: The author of the article Wang Tongxin is an employee of two organizations:

1) Key Laboratory of Applied Superconductivity and Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2) University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China.

Редакция