

УРОКИ ИСТОРИИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XIX ВЕКА

ВОРОТНИЦКИЙ В.Э., д.т.н., главный научный сотрудник АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Повышение энергетической эффективности было одной из главных целей передачи электроэнергии уже на самых первых этапах ее истории, которая началась во второй половине XIX столетия. Это было время активного перехода от «века пара» к «веку электричества», время развития электрического освещения, создания первых электрических генераторов, двигателей и трансформаторов, линий электропередачи, электропривода и бытовых электроприборов, роста производительности труда и качества жизни населения в целом ряде стран. Это были годы великих изобретений и открытий, острейшей борьбы за их приоритеты, годы «Войны токов» между выдающимися представителями славной плеяды электротехников, создавших основу современной электроэнергетики. Их биографиям, творческим и техническим достижениям посвящены сотни книг, статей и исторических исследований, в том числе [1–6]. Цель статьи – вспомнить историю создания первых линий электропередачи постоянного и переменного тока и рассмотреть, что полезного из опыта этой истории мы можем использовать для нашей сегодняшней действительности.



**Валерий Эдуардович
ВОРОТНИЦКИЙ**

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ПРОВОДАМ

Первые линии для передачи электричества по проводам стали применяться в слаботочной телеграфной связи. Активные работы в этом направлении начались с изобретения Павлом Львовичем Шиллингом (1786–1837) в 1832 г. телеграфной линии. В 1841 г. Борис Семенович Якоби (1801–1874) на основе этого изобретения построил первую телеграфную линию между Зимним дворцом и Главным штабом в Санкт-Петербурге. В 1843 г. конгресс США выделил американскому изобретателю электромагнитного пишущего телеграфа Сэмюэлю Морзе (1791–1872) субсидию для строительства телеграфной линии между Вашингтоном и Балтимором, по которой в 1844 г. была передана первая депеша со словами «Чудны дела Твои, Господи!». В те годы телеграфные воздушные и кабельные сети стали получать стремительное развитие в крупных городах, странах и на континентах.

В 1864 г. был проложен подводный трансконтинентальный телеграфный кабель между Европой и Америкой. К тому времени уже был полноценный опыт промышленного производства проводов и кабельной продукции для телеграфных линий [7].

Вместе с накоплением опыта воздушной проводной и кабельной телеграфной связи, с появлением первых электрических ламп, генераторов и двигателей, все большее внимание исследователей и изобретателей стали привлекать вопросы коммерческой передачи больших потоков мощности по проводам на большие расстояния. Начало работ в этом направлении принято считать с Венской международной выставки, на которой французский электрик Ипполит Фонтен (1833–1910) [8] в 1873 году продемонстрировал обратимость двух одинаковых электрических машин Грамма постоянного тока (рис.1). Одна из них работала в режиме генератора, вторая – в режиме двигателя и приводила в действие водяной насос искусственного водопада. Что-

бы вода не перелилась из бассейна, И.Фонтен решил несколько снизить мощность двигателя насоса и в качестве дополнительной нагрузки включил между машинами барабан с кабелем длиной около километра, имитируя тем самым удаление этих машин на расстояние друг от друга. Получив желаемый эффект за счет больших потерь в кабеле, Фонтен усомнился в экономической целесообразности электропередачи по проводу. Два года спустя он написал: «...тогда, как и теперь, я не верю в возможность электрической передачи больших мощностей на большие расстояния; электрические железные дороги мне казались и кажутся и теперь решением, применять которое можно посоветовать только в совершенно исключительных случаях» [8].

Примерно в те же 70-е годы начались активные исследования и разработки во всем мире по применению и распределению электричества для освещения городов. Российский электротехник Александр Николаевич Лодыгин (1842–1923) в 1873 году первым предложил применять в электрических лампах накаливания вольфрамовые нити и закручивать их в спирали [4]. Тогда же в России началась разработка конструкции первой электродуговой лампы (свечи). Она была завершена к началу 1876 года другим выдающимся отечественным изобретателем, конструктором и ученым – Павлом Николаевичем Яблочковым (1847–1894) [5]. Лампа Яблочкова произвела настоящий переворот в технике электрического освещения и послужила, по существу, началом массового применения электричества для освещения. Уже в апреле 1876 года свеча стала самым заметным экспонатом на выставке приборов в Лондоне. П.Н. Яблочковым было начато внедрение переменного тока для осветительных установок. В 1878 году он предложил систему распределения тока между лампами (по терминологии автора – «дробления света») при помощи индукционных катушек, которые представляли собой первые трансформаторы. По его инициативе в 1880 году был создан первый русский электротехнический журнал «Электричество», который



Рис. 1. Электрическая машина Грамма

сразу стал главной информационной и дискуссионной площадкой в России по обсуждению самых актуальных вопросов развития мировой и отечественной электротехники.

В 1882 году трансформатор П.Н. Яблочкова был усовершенствован русским ученым-самоучкой Иваном Филипповичем Усагиным (1855–1919). Его трансформатор приобрел почти современный вид (рис. 2) [1]. В том же году он был продемонстрирован на Всероссийской промышленно-художественной выставке в Москве. К трансформатору на этой выставке подключались не только электрические свечи, но и двигатель, дуговая лампа с регулятором и проволоочная нагревательная спираль, что стало убедительной иллюстрацией универсальности трансформации переменного тока.

В 1885 г. венгерские инженеры фирмы «Ганц» в Будапеште Микша Дери (1854–1938), Отто Блати (1869–1939) и Карой Циперновски (1853–1942) разработали трансформаторы с замкнутой магнитной цепью с кольцевым и броневым сердечником, что послужило стимулом для дальнейшего развития трансформаторостроения и техники переменного тока [1].

К 80-м годам уже были разработаны и выпускались промышленные образцы электрических генераторов и двигателей, в основном, постоянного тока, которые почти сразу получали практическое применение. В частности, в 1834 году Б.С. Якоби сконструировал первый в мире электродвигатель постоянного тока,

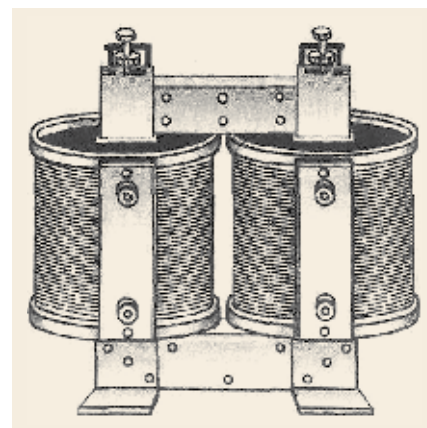


Рис. 2. Трансформатор И.Ф. Усагина

питающийся от аккумулятора. Через четыре года доработанный двигатель был изготовлен в 1838 году на Ижорском заводе, установлен на катере, на котором были проведены показательные катания по Неве (рис. 3а) [9]. Позже был продемонстрирован первый электровелосипед (рис. 3б), принцип действия которого сохранился до сих пор.

Для эффективной передачи больших электрических мощностей по проводам от удаленных централизованных источников к потребителям в 70-х годах XIX века имелись два решения – увеличивать сечение проводов или повышать напряжение линии с экономией на стоимости проводов. Снижение удельного сопротивления проводов было в те годы практически неосуществимо, так как медь, ставшая основным материалом для изготовления проводов, уже имела предельно малое удельное электрическое сопротивление. Лишь много позже, практически в наше время, были проведены теоретические и экспериментальные работы по снижению удельных сопротивлений проводов линий электропередачи с использованием новых материалов и явления сверхпроводимости.

Увеличение площади поперечного сечения проводников представлялось в то время мероприятием, более естественным и технически легче осуществимым по сравнению с повышением напряжения. Уже через год после И. Фонтена русский военный инженер Федор Аполлонович Пироцкий (1845–1898) [8] в 1874 г. приступил к опытам пере-

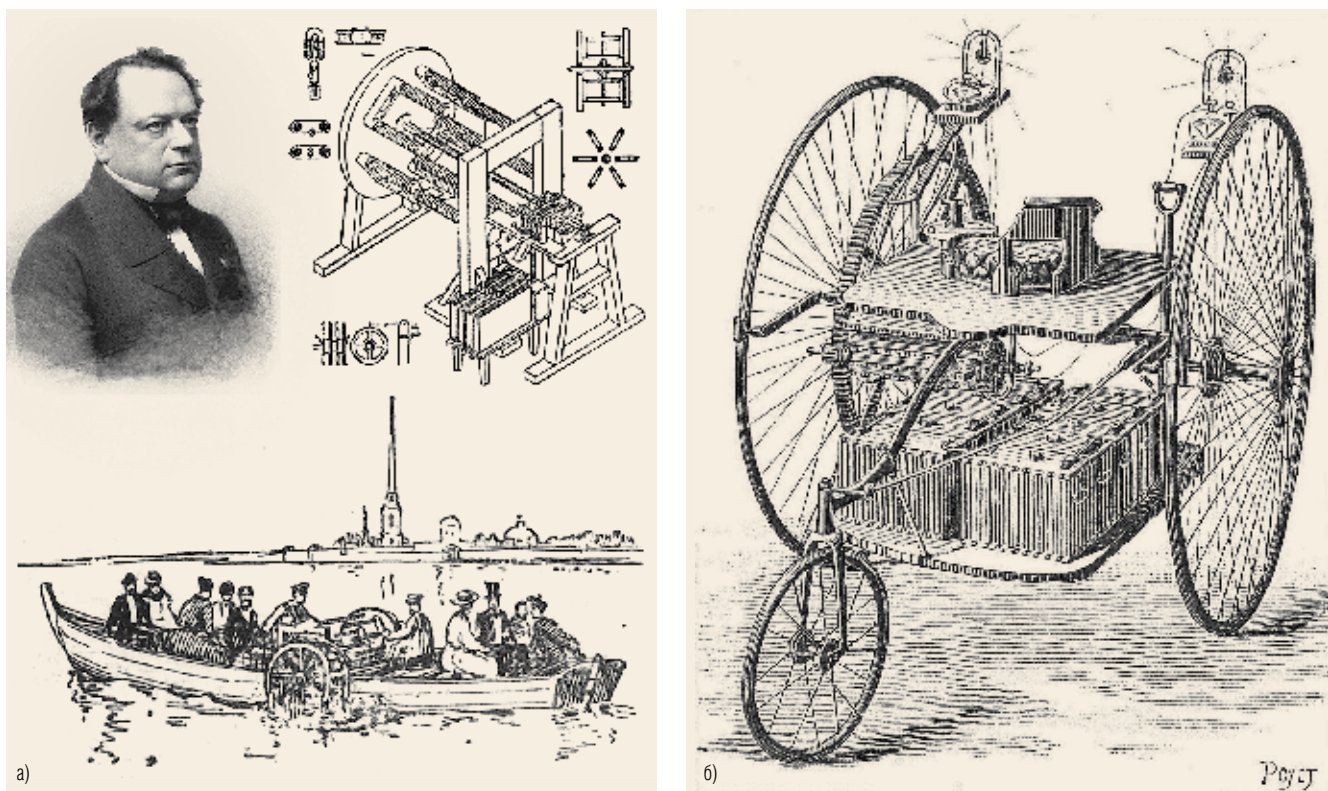


Рис. 3. а) Б.С. Якоби, его электродвигатель и демонстрационный катер [9]. б) Электрический велосипед с аккумуляторами. Ксилограф Луи Пойе. Нива, 1884, № 34, с. 81 [10]

дачи электроэнергии на расстояние чуть более 200 метров на артиллерийском полигоне Волкова поля (около Петербурга). По результатам этих опытов для уменьшения потерь в линии Пироцкий решил использовать в качестве проводников электрического тока железнодорожные рельсы, площадь поперечного сечения которых более чем в 600 раз превышала площадь поперечного сечения широко распространенного и доступного тогда телеграфного провода. Стремясь проверить это решение, он в конце 1875 г. провел опыты передачи электроэнергии по рельсам бездействовавшей ветки Сестрорецкой железной дороги длиной около 3,5 км. Оба рельса изолировались от земли, один из них служил прямым, второй – обратным проводом. Электрическая энергия передавалась от генератора Грама к электродвигателю, удаленному на расстояние около 1 км. Предложение Пироцкого об использовании железнодорожных рельсов для передачи электрической энергии на расстояние быстро нашло свое применение при разработке и реализации первых проектов городских элект-

рических трамваев. В частности, в мае 1879 года на промышленной выставке в Берлине была продемонстрирована первая электрическая железная дорога длиной 300 м, построенная Вернером фон Сименсом (1816–1892), известным немецким инженером, изобретателем и промышленником. К электролокомотиву с двигателем, мощностью 9,6 кВт были присоединены три вагончика, которые двигались со скоростью 7 км/ч и вмещали 18 пассажиров [11]. А в 1882 г. Сименсом был создан первый в мире троллейбус.

Опыты Ф. Пироцкого привлекли также внимание к передаче энергии вообще и вызвали ряд новых исследований и разработок, приведших ко второму, более рациональному пути повышения ее энергоэффективности. Этот путь, основанный на повышении напряжения, впервые обстоятельно и теоретически исследовали в 1880 г. независимо друг от друга французский инженер (впоследствии академик) Марсель Дебре (1843–1918) и профессор физики Петербургского лесного института Дмитрий Александрович Лачинов (1842–1902). [1].

В марте 1880 г. был опубликован доклад Дебре «О коэффициенте полезного действия электрических двигателей и об измерении количества энергии в электрической цепи». В нем автор математически доказывал, что КПД установки, состоящей из электродвигателя и линии передачи, не зависит от сопротивления самой линии. При этом ему не удалось установить, что увеличение сопротивления линии не влияет на эффективность электропередачи только при условии увеличения напряжения передачи. На это условие впервые было указано Лачиновым в статье «Электромеханическая работа», опубликованной в 1880 г. в первых номерах журнала «Электричество» [12]. К подобным же выводам пришел год спустя и М. Дебре. В 1882 г. он построил первую линию электропередачи Мисбах – Мюнхен протяженностью 57 км. На одном конце опытной линии в г. Мисбахе была установлена паровая машина, приводившая в действие генератор постоянного тока мощностью 3 л.с., дававший ток напряжением 1,5–2 кВ. Энергия передавалась по стальным телеграфным проводам диаметром 4,5 мм на тер-

риторию выставки в г. Мюнхене, где была установлена такая же машина, работавшая в режиме электродвигателя и приводившая в действие насос для искусственного водопада. Хотя этот первый опыт показал низкую энергетическую эффективность (КПД передачи не превысил 25 %), электропередача Мисбах – Мюнхен стала одним из отправных пунктов для дальнейших работ по развитию техники передачи электроэнергии на расстояние.

В эти же годы были успешно осуществлены и другие единичные проекты передачи электроэнергии на постоянном токе для промышленного использования и освещения городов. Однако они не принесли высоких результатов энергоэффективности и надежности передачи из-за возникшего тогда весьма важного противоречия. С одной стороны, практика проектирования и производства электрических машин и аппаратов постоянного тока уже получила значительное развитие. Двигатели постоянного тока обладали рабочими характеристиками, удовлетворяющими основным требованиям промышленности и бизнеса. С другой, технические возможности того времени не позволяли строить генераторы постоянного тока высокого напряжения. Такие генераторы часто выходили из строя из-за повреждения изоляции. Кроме того, электроэнергию постоянного высокого напряжения нелегко было использовать потребителям: нужно было строить двигатель-генераторную установку для преобразования высокого напряжения в низкое.

Частичное решение этих непростых задач было найдено Д.А. Лачиновым. Он предложил для повышения напряжения линий постоянного тока соединять последовательно по несколько машин на каждом её конце. В этом случае каждая в отдельности машина могла быть рассчитана на более низкое напряжение, а следовательно, могла быть более надежной. И. Фонтен первым реализовал практически эту идею, осуществив в 1886 г. электропередачу, в которой со стороны генератора работали четыре последовательно соединенные машины мощностью по

25 л.с. (напряжением по 1,5 кВ, т.е. получил 6 кВ), а со стороны приемника – три двигателя суммарной мощностью около 50 л.с. КПД этой передачи достигал 52 %. Позднее эта идея о последовательном включении генераторов была развита и в других электропередачах. Но во всех случаях, такие технические решения были, как правило, громоздкими, не очень надежными и дорогими. Требовались новые решения. И вскоре они были найдены в виде перехода с постоянного на переменный ток.

«ВОЙНА ТОКОВ» – БОРЬБА ИДЕЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В конце XIX века электротехники раскололись на два лагеря. Одни видели будущее за ставшим уже привычным постоянным током, другие – за переменным. Активным сторонником и защитником постоянного тока был всемирно известный американский изобретатель и бизнесмен Т.А. Эдисон (1847–1931). Он был не столько исследователем, сколько талантливейшим экспериментатором, изобретателем и организатором, отличающимся удивительной целеустремленностью и работоспособностью. Вплоть до самого преклонного возраста он работал по 16–19 часов. В своих опубликованных посмертно дневниках Эдисон признавался: *«Мое отличие от большинства изобретателей заключается в том, что у меня кроме склада ума, присущего изобретателям, есть жилка практицизма..., деловая сметка, умение оценить прибыль от изобретения»* [12]. Он самым внимательным образом изучал новейшие для того времени патенты и открытия и успешно использовал их в бизнесе, не забывая при этом фиксировать свои приоритеты в виде огромного количества патентов. По разным источникам у него было от 1100 до 1900 патентов США и около 3000 патентов других стран. Уже в 1882 г. он создал в Нью-Йорке компанию постоянного тока «Эдисон Электрик Лайт Компани», в которой число электростанций стало быстро расти. Спрос



Рис. 4. Нью-Йорк в 80-е годы XIX века

на электроосвещение также рос, город покрывался паутиной проводов (рис. 4), компания процветала. В 1884 году к нему пришел талантливый, впоследствии великий сербский ученый, изобретатель и не меньший, чем Эдисон, самозабвенный труженик, будущий непримиримый его оппонент в «Войне токов» Никола Тесла (1856–1943).

У Эдисона Тесла проработал чуть меньше года. За это время он спроектировал 24 новых типа генераторов постоянного тока, которые были пущены в серийное производство, изобрел быстродействующий регулятор напряжения, на который компания Эдисона получила патент. Они разошлись потому, что попытки Тесла продолжить начатую им в 1883 году работу по конструированию индукционного двигателя встречали упорное противодействие Эдисона, принципиального противника переменного тока.

К тому времени генераторы переменного тока в широких масштабах начала применять американская фирма «Вестингауз электрик» (рис. 5). В 1888 г. основатель и владелец этой фирмы Джордж Вестингауз (1846–1914) выплатил Тесле один миллион долларов за право эксплуатации сорока его патентов, позвал его к себе на работу и пригласил переехать на завод в Питсбург для производства асинхрон-

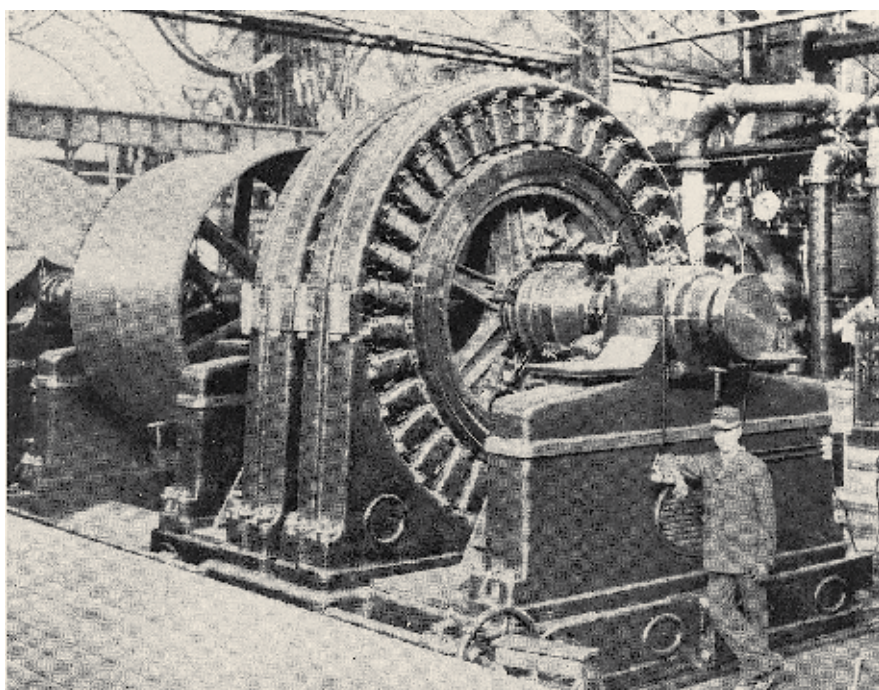


Рис. 5. Генератор компании «Вестингауз электрик» конец 1800-х годов



Рис. 7. Социальная реклама 1889 года против использования переменного тока [15]



Рис. 6. Один из плакатов времен «Войны токов» [14]

ных машин и руководства внедрением многофазных переменных токов. Уже через год, в 1889 г. на одном из заводов Вестингауза вошел в строй новый цех с 39 станками, оснащенными асинхронными двухфазными электродвигателями мощностью от 7,5 до 60 кВт.

Бизнес Эдисона на постоянном токе оказывался под все большей угрозой, его потребовалось защищать. В 1888 г. началась яростная полемика между сторонниками постоянного и переменного тока (рис. 6).

Фирма «Эдисон Электрик Лайт Компани» опубликовала Красную книгу под заголовком «Предостережение», в которой переменный ток подвергся резкой критике. К ней был приложен список людей, смертельно пораженных переменным электрическим током. Описывались другие действительные и мнимые недостатки переменного тока, но особый упор делался все же на опасность его применения (рис. 7).

В борьбу против переменного тока включился один из инженеров компании Эдисона, некий Гарольд Браун, конструировавший в то время электрический стул и начавший эксперименты по воздействию электротока на животных. Иногда опыты делались публичными, во время которых на глазах у публики погибали собаки и лошади. Апогеем этой борьбы стал письменный вызов Брауна Вестингаузу. Он писал: «Я вызываю г-на Вестингауза на встречу со мной в присутствии компетентных экспертов в области электротехники, и пусть через его тело пропускают переменный ток, а через мое – постоянный. Напряжение будет повышаться до тех пор,

пока один из нас не закричит и этим публично признает свое поражение. Однако я хочу предупредить г-на Вестингауза о том, что согласно моим экспериментам, воздействие переменного тока напряжением 160 В в течение 5 секунд приводит к фатальному исходу» [5]. Вестингауз вызова не принял. Но в некоторых штатах США под влиянием ответственности были приняты законы, запрещающие применять напряжение переменного тока более 200 В.

В одном из американских электротехнических журналов Эдисон опубликовал статью «Об опасностях электрического освещения», которая была перепечатана в российском журнале «Электричество» [16]. В ней автор писал: «...Употребление переменных токов высокого напряжения не имеет никакого оправдания ни с коммерческой, ни с научной точек зрения. Их употребляют только в виде уменьшения издержек на медь...». Чтобы у читателей журнала не создавалось мнение о безусловной правильности суждений Эдисона, в том же номере «Электричества» были помещены выдержки из публикаций ряда авторов в зарубежных изданиях с изложением различных точек зрения на достоинства, недостатки и области применения постоянного и переменного тока. Из этих публикаций следует, что дискуссия по этому вопросу оставалась открытой.

Сторонники переменного тока на критику отвечали делом. В 1893 году Тесла и Вестингауз реализовали заказ на освещение переменным током ярмарки в Чикаго. Это была убедительная победа над Эдисоном. Но не окончательная. В последующие годы борьба продолжалась достаточно долго, но все с большим перевесом переменного тока.

Несмотря на явные успехи того времени по развитию техники переменного тока, во второй половине 80-х годов XIX в. возникла и очень беспокоила инженеров и ученых задача включения двигательной нагрузки в электрическую сеть. Требовались новые решения. И в 1887–1888 гг. начались разработки многофазной, в том числе трехфазной, системы переменного тока, актив-

ное участие в которых принимали многие специалисты. Среди них был и наш великий соотечественник, инженер и изобретатель Михаил Осипович Доливо-Добровольский (1862–1919). Не вдаваясь в анализ этих разработок, их отличий и совпадений и отсылая читателей к обширной литературе по этим вопросам [1, 6, 13, 17, 19, 20] отметим, что победителем на этом этапе создания и практического применения техники и технологий передачи электроэнергии переменным током оказался Доливо-Добровольский.

ДОЛИВО-ДОБРОВОЛЬСКИЙ – СОЗДАТЕЛЬ ТЕХНИКИ ТРЕХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Михаил Осипович Доливо-Добровольский родился 2 января 1862 года в Гатчине под Петербургом в российско-польской дворянской семье. В 1873 году семья переехала в Одессу. Там прошли детство, юность и учеба в Одесском реальном училище. После его окончания в 1878 году Доливо-Добровольский поступил в Рижский политехнический институт на химический факультет. Но окончить его он не успел – в 1881 году за участие в политической студенческой забастовке его исключили из института без права поступления в любое высшее учебное заведение в пределах Российской империи. Через три года ему удалось выехать за границу, где в 1883 году он поступил в Высшее Техническое Училище в немецком городе Дармштадт. Уже в 1882 году там была образована кафедра электротехники, ее возглавил талантливый преподаватель и лектор профессор Эразм Киттлер (1852–1929). Киттлер не только блестяще читал, но и уделял первостепенное внимание лабораторной практике. Через год после образования кафедры и при поступлении Михаила Осиповича в училище заведующему кафедрой удалось построить, оборудовать современными стендами и ввести в действие большую электротехническую лабораторию из девяти комнат на площади 290 квадратных метров. После окончания с отличием училища Доливо-Добровольский занял должность ассистента кафедры



Михаил Осипович Доливо-Добровольский

электротехники в своем училище, и в лаборатории стал успешно закреплять не только теоретические, но, главным образом, практические знания и навыки.

Уже в процессе учебы появляются первые публикации Доливо-Добровольского, посвященные вопросам электротехники. Эти публикации были замечены, и в 1887 г. их автора пригласил к себе на работу Эмиль Ратенау, возглавлявший в то время «Всеобщую компанию электричества» (AEG). Там Михаил Осипович проработал до конца жизни, сначала шеф-электриком, а в 1909 году он стал директором предприятия. В первое время работы в компании Доливо-Добровольский, кроме общего технического руководства, основное внимание уделял конструированию аккумуляторов. Здесь пригодились его прошлые знания в электрохимии. Параллельно он стал заниматься исследованиями и разработками в области переменных токов.

В 1888 году Доливо-Добровольский ознакомился с работами итальянского физика Галилео Феррариса (1847–1897) по вращающемуся магнитному полю. Феррарис утверждал, что коэффициент полезного действия асинхронного двухфазного двигателя не может превы-

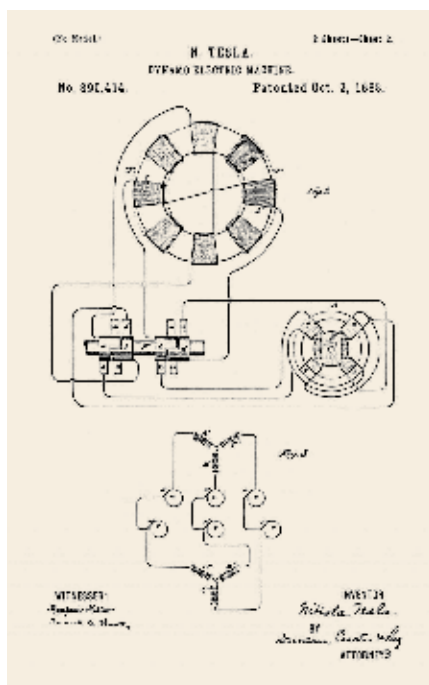


Рис. 8. Принципиальная схема трехфазной связанной системы Н. Теслы (патент №390. 414. от 02 октября 1888 г.)

шать 50 % и поэтому многофазные электрические машины переменного тока не получают широкого применения. Осенью того же года Михаил Осипович ознакомился с патентами Теслы, касающимися систем многофазных и трехфазных токов. В 1891 году, выступая на собрании Союза германских электротехников в Берлине, М.О. Доливо-Добровольский сказал [17]: «Я обязан добавить, что приоритет относительно многофазных машин принадлежит Тесле... Я имею в виду американский патент № 390. 414, выданный ему 2 октября 1888 г.» (рис. 8).

После изучения работ своих предшественников и проведения ряда экспериментов, Доливо-Добровольский пришел к выводу, что более эффективен не двухфазный ток, который считали основным для широкого применения Феррарис и Тесла, а трехфазный. Он предложил и запатентовал важнейшие устройства трехфазных систем, в том числе [6, 17]:

- асинхронный двигатель с ротором типа «беличья клетка» (1889 г.);
- распределенные обмотки якоря машин переменного тока (у Теслы обмотки были сосредоточенными, катушечными);

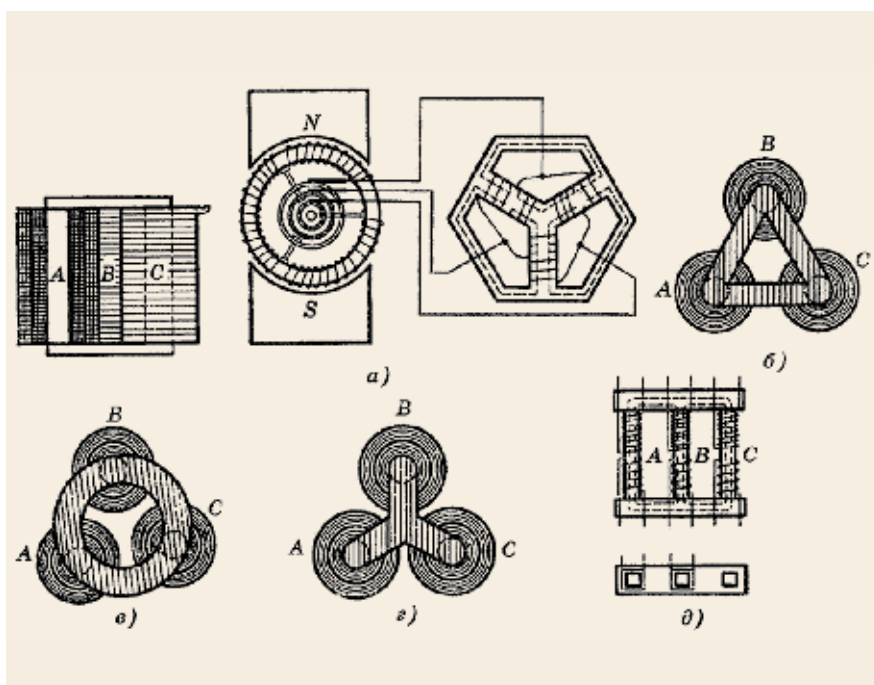


Рис. 9. Схемы конструкций трехфазных трансформаторов, предложенные Доливо-Добровольским

- первый асинхронный двигатель регулируемой скорости с обмоткой ротора, подключенной через контактные кольца к пускорегулирующему реостату;
- схемы конструкций трехфазных трансформаторов (1889 г.) на едином магнитопроводе различной конфигурации. До него в трехфазной линии использовали три однофазных трансформатора (рис. 9).

Широкому внедрению трехфазных систем способствовал блестящий успех Международной электротехнической выставки 1891 г. во Франкфурте, техническим руководителем и заместителем председателя выставочного комитета которой был назначен известный немецкий инженер-электрик Отто фон Миллер (1855–1934). В своем выступлении на общем собрании выставочного комитета в 1890 г. он заявил: «Прежние электрические выставки в Мюнхене и в Вене имели целью привлечь симпатии к электрическому освещению... Задачей Франкфуртской выставки должна стать демонстрация передачи и распределения электрической энергии в различных системах и применениях...» [6].

Миллер был убежденным сторонником переменного тока. Поэтому он от имени выставочного комитета

сделал компании AEG и работавшей по ее лицензии швейцарской фирме Эрликон официальное предложение по реализации запланированной передачи электроэнергии с гидростанции в Лауфене на выставку во Франкфурт. В марте 1891 г. было решено поручить AEG изготовление четырех трансформаторов по 100 кВА, асинхронного электродвигателя 73 кВт, 1000 электрических ламп по 55 Вт, всей измерительной и коммутационной аппаратуры. Фирме Эрликон предстояло изготовить синхронный генератор мощностью 220 кВт и два трансформатора по 150 кВА. Проектирование линии было поручено инженеру Эберту. Все эти работы должны были быть выполнены в жесточайший срок, за полгода. Как руководитель работ, Доливо-Добровольский понимал, что срыв сроков будет означать окончательное недоверие к его идеям, разработкам и изобретениям по трехфазному току. Победа же привлечет новых союзников и позволит продолжить работы в этом направлении. И он успешно справился с поставленными задачами. Работать пришлось буквально день и ночь. Все элементы линии электропередачи были переданы руководству выставки точно в срок.

Была построена воздушная трехфазная линия передачи электроэнергии протяженностью 170 км от генератора с водяной турбиной (рис. 10), установленного на водопаде города Лауфен, на выставку во Франкфурте. Напряжение на линии могло меняться в широких пределах от 15 до 33 кВ с помощью регулирования скорости генератора. На выставке она работала на напряжении 15 кВ. Выставку эффектно освещали 1000 ламп накаливания. Был запущен самый мощный по тем временам трехфазный асинхронный двигатель 73 кВт (рис. 11) с водяным насосом, питающим десятиметровый декоративный водопад. На выставке была практически реализована конструкция силового трехфазного трансформатора «призматического» типа мощностью 150 кВА (рис. 9). Испытания электропередачи убедительно подтвердили ее надежную работу и КПД на уровне 75 % [6].

По существу, в результате успешной, яркой и весьма убедительной демонстрации преимуществ системы трехфазного тока на выставке во Франкфурте в 1891 г. закончился второй этап «Войны токов». Следует заметить, что 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. Сама же эта компания после прихода в нее выдающегося электротехника Чарльза Штейнмеца (1865–1923) стала активной сторонницей трехфазных систем. Датой окончательной победы переменного тока считается 2007 г., когда Нью-Йорк полностью перешел с постоянного тока на переменный. Но дискуссия продолжается. Постоянный ток по-прежнему актуален. Он имеет свои области и перспективы применения [18].

Много труда после выставки Доливо-Добровольский приложил для пропаганды внедрения трехфазного переменного тока. При помощи диспутов, докладов, статей и монографий он смог добиться того, что у него практически не осталось идейных противников. В 1899 году, на Первом Всероссийском электротехническом

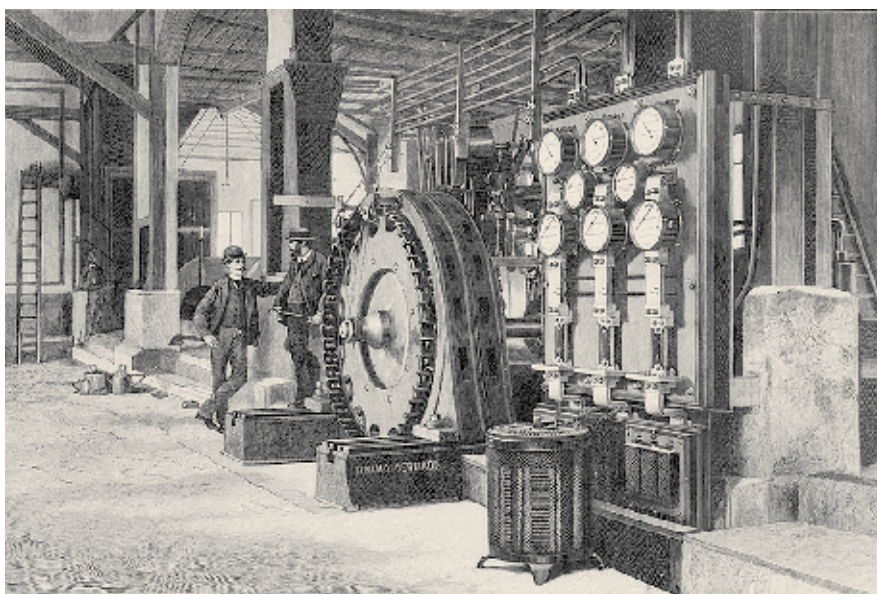


Рис. 10. Общий вид электрической части гидроэлектростанции в Лауфене

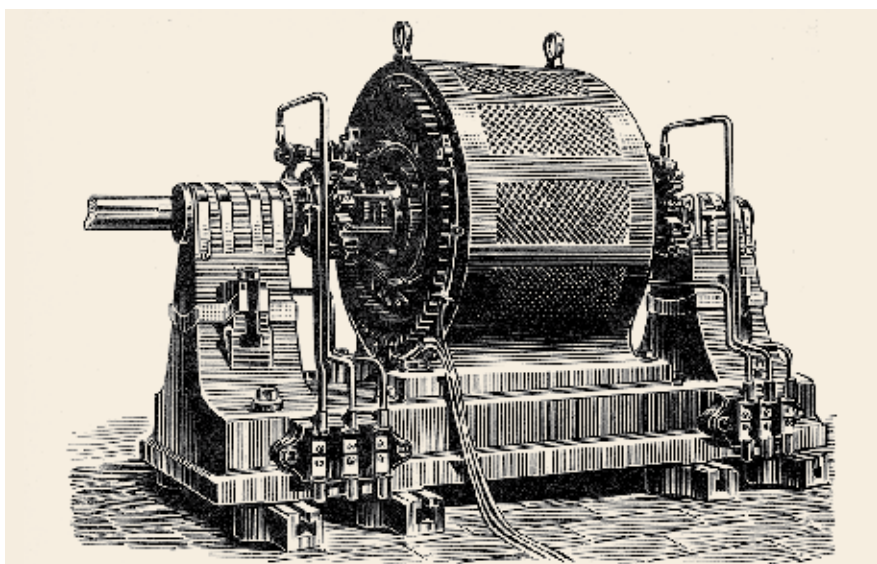


Рис. 11. Трехфазный двигатель М.О. Доливо-Добровольского

съезде Доливо-Добровольский выступил с докладом «Современное развитие техники трехфазного тока». В нем он подвел итоги выставки во Франкфурте и своей борьбы за правильность предложенных им технических решений по трехфазному переменному току. Этот достаточно большой доклад был опубликован в двух номерах журнала «Электричество» в 1900 году [19]. В начале доклада он отметил: «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 трехфазный 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 Дебре, Бейлза и др.). Несмотря на то, что опыты Тесла, а также и мои существовали уже года за два до этой выставки, все же год этой выставки (1891) должно считать, так сказать, годом рождения Т.Ф. тока. Техника не заботится много о лабораторных опытах, мало интересуется теоретическими размышлениями и «возможностями», она привет-



Рис. 12. Зал электротехники и электроэнергетики Немецкого музея достижений естественных наук и техники [20]



Рис. 13. Бюст М.О. Доливо-Добровольского в Немецком музее достижений естественных наук и техники [20]

ствует 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 сколько-нибудь практической форме...» (выделено автором). В конце своего доклада после рассмотрения примеров успешного применения трехфазных двигателей на различных металлообрабатывающих станках, на ситценабивной и бумажной фабриках, водоподъемных машинах и в электрических насосах До-

ливо-Добровольский отметил: *«Электрическая канализация дешевым током доставляет светлое, безопасное и гигиеничное освещение, она дает возможность ставить двигательную силу в самой раздробленной и простейшей форме каждому беднейшему жителю и ремесленнику. Нельзя не предвидеть влияния всего этого на мирное и постепенное улучшение социальных отношений... Т.Ф. ток стал современным культурным фактором; благотворное влияние, которое оказывает электротехника на жизнь западных народов, не замедлит обнаружиться и у нас на Руси».*

Показательно, что в этих словах, сказанных более 120 лет назад, говорилось не о капитализации, экономии операционных расходов и прибылях, а о культурной миссии доставки электроэнергии каждому беднейшему жителю планеты. В последующие годы жизнь со всей очевидностью подтвердила эти выводы Михаила Осиповича. Сегодня 90–95 % электроэнергии в мире (около 24 трлн. кВт·ч в год) передается по электрическим сетям трехфазного переменного тока со средним КПД около 92 %.

Несмотря на то, что М.О. Доливо-Добровольский долго жил и работал за границей, он мечтал вернуться на родину, постоянно поддерживал с ней связь. Он самым деятельным образом содействовал развитию электротехни-

ки в России, участвовал в собраниях Императорского Русского технического общества (РТО), выступал с докладами на Электротехнических съездах РТО и публиковал статьи в журнале «Электричество». В 1900–1901 гг. он участвовал в организации электромеханического отделения (факультета) Политехнического института в Санкт-Петербурге и получил приглашение возглавить этот факультет. Он помогал разрабатывать учебные программы и курсы, организовал снабжение института лабораторным оборудованием и передал институту всю свою библиотеку по электротехнике. Но из-за обострившейся в 1903 г. болезни планам вернуться жить в Россию не суждено было сбыться [20].

Последние годы своей жизни Михаил Осипович посвятил изучению способа передачи электроэнергии на большие расстояния при помощи постоянного тока высокого напряжения. Будущее развитие электротехники виделось ему в дальних передачах электроэнергии постоянного тока высокого напряжения по подземным кабелям.

Большинство из упомянутых выше выдающихся участников создания техники и технологии передачи электроэнергии в 70–80 гг. XIX века вместе с их амбициями и противоречиями навечно остались в истории мировой электротехники. Бюсты некоторых из них (в том числе и Доливо-Добровольского) и экспонаты их трудов теперь стоят в знаменитом на весь мир Немецком музее достижений естественных наук и техники в Мюнхене (рис. 12, 13). Он был основан в 1903 году тем же Оскаром фон Миллером, который активно содействовал успеху выставки во Франкфурте в 1891 году. Сегодня в музее около 30 тысяч экспонатов и ежедневно в нем бывает около 3,5 тысяч посетителей [21].

ВЫВОДЫ

1. Великие изобретения и открытия, разработанные и внедренные технические средства и технологии второй половины XIX века в области электротехники и передачи электроэнергии – результат не только деятельности отдельных выдающихся изобретателей и ученых, но и большой армии простых инженеров и рабочих, изготовивших и испытавших новую технику.

2. Исторический опыт великих исследователей и создателей основ электротехники и электроэнергетики со всей очевидностью подтверждает, что изобретения и открытия, прежде чем стать передовыми технологиями, нуждаются в эффективной поддержке государства и бизнеса. Эта поддержка должна заключаться в достойном финансировании, в льготном налогообложении, в создании современной лабораторной, испытательной и метрологической базы, в качественном информационном обеспечении научных исследований, в совершенствовании системы образования.

3. Изобретения и открытия становятся полезными для их практического применения, когда они превращаются в экономически эффективные и перспективные конструкции, технику и технологии, открывающие новые возможности не только для бизнеса, но, в первую очередь, для улучшения качества жизни населения отдельных стран. Яркий пример тому – история создания и развития техники и технологий передачи и распределения электрической энергии.

4. Изучение и знание истории открытий, этапов и тенденций развития, способов борьбы за претворение их в жизнь – важнейшая составляющая успешной творческой инженерной деятельности. Обеспечение технологического суверенитета страны, ее конкурентоспособности на международных рынках требует новых подходов к высшему техническому образованию. Будущие инженеры-электрики должны получать не только достаточный объем фундаментальных знаний по математике, физике, химии, материаловедению и основам электротехники, но и навыки творческой, изобретательской работы по созданию инноваций.

5. Главные цели любого государства – обеспечение благосостояния и здоровья граждан, развитие их индивидуальных способностей, культуры, компетенции и инициативы, профессионального патриотизма. Если эти цели не на словах, а на деле будут достигнуты, лучшие люди и специалисты не только не будут уезжать из своей страны (как это случилось с М.О. Доливо-Добровольским и Николой Тесла), но станут возвращаться и

приезжать, чтобы вместе строить ее счастливое будущее.

6. Профессиональный патриотизм будущих инженеров-электриков должен воспитываться на основе изучения и глубокого уважения истории и достижений отечественной электротехники и электроэнергетики. Для этого необходимо:

- в базовых федеральных электротехнических университетах страны ввести обязательные образовательные стандарты и курсы изучения истории электротехники и электроэнергетики;
- в Москве и Санкт-Петербурге в тесном взаимодействии с Государственным политехническим музеем создать федеральные музеи истории энергетики и электротехники;
- на ВДНХ в павильоне электрификации России организовать постоянно действующую выставку достижений и направлений развития отечественной электроэнергетики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белькинд Л.Д. Учебник энергетической техники / Л.Д. Белькинд, О.Н. Веселовский, И.Я. Конфедератов, Я.Л. Шнейберг. М., 2020 – 828 с. <https://www.tavrida.ru/ter/energylibrary>
2. Шателен М.А. Русские электротехники XIX века. М.: Госэнергоиздат, 1955 – 142 с.
3. История электротехники. Под. Ред. И.А. Глебова <https://booktech.ru/books/istoriya/580-istoriya-elektrotehniki-1999-pod-red-ia-glebova.html>
4. Белькинд Л.Д. Александр Николаевич Лодыгин [Текст]: [1847–1923]: Очерк жизни и деятельности / Л.Д. Белькинд. – Москва; Ленинград: изд-во и тип. Госэнергоиздата, 1948 (Ленинград). – 64 с.
5. Белькинд Л.Д. Павел Николаевич Яблочков. Жизнь и труды. Государственное энергетическое издательство, Москва–Ленинград, 1950, 379 с. <https://www.tavrida.ru/ter/energylibrary>.
6. Веселовский О.Н. Михаил Осипович Доливо-Добровольский / О.Н. Веселовский. – Москва, 2021. – 348 с. <https://www.tavrida.ru/ter/energylibrary>
7. История развития проводных каналов связи / <https://www.myuniversity.ru/Информатика/325296/2898016/страница1.html>
8. Первые опыты передачи электроэнергии на расстояние <http://elektrotrobgau.narod.ru/Chast444/Peredacha-electroenergii/newpage2.html>

trobgau.narod.ru/Chast444/Peredacha-electroenergii/newpage2.html

9. Радовский М.И. Роль Б.С. Якоби в развитии русской и мировой электротехники // Электричество № 9, 1948, с. 65-76 http://museumrza.ru/old_journals/EL1948/zhurnal-elektrichestvo-no9-1948-god-sentyabr

10. Каск А.Н., Бородин Д.А. Изобразить электричество. Развитие электротехники и журнальная иллюстрация конца XIX века Коммуникации. Медиа. Дизайн, Том 1, № 1, 2016 с. 190–209.

11. Симонов Н.С. Развитие электроэнергетики Российской империи. Предыстория ГОЭЛРО М.: Русский фонд образования и науки. 2016. – 320 с.

12. Лачинов Д. Электромеханическая работа // Электричество № 1, 1880, с. 9–11, № 2 1880, с. 27–30.

13. Цверева Г.К. Никола Тесла. М.: Наука, 1974 – 211с.

14. Микеров А. Война токов и победа переменного тока https://www.researchgate.net/publication/316345547_Vojna_tokov_i_pobeda_peremennogo_toka.

15. Война токов: Тесла против Эдисона <http://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/1630-vojna-tokov-tesla-protiv-jedisona.html>

16. Об опасности электрического освещения// Электричество № 2, 1890, с. 29–32.

17. М.О. Доливо-Добровольский – русский новатор-электротехник и его изобретения <http://elektrik.info/main/fakty/647-m-o-dolivo-dobrovolskiy-russkiy-novator-elektrotehnik-i-ego-izobreteniya.html>

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

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

20. Бутузов В.А. Энергетическая общественность России в 1880-1992 годах <https://www.c-o-k.ru/articles/energeticheskaya-obschestvennost-rossii-v-18801992-godah>

21. Немецкий музей в Мюнхене – крупнейший технический музей в мире <http://electricalschool.info/history/2540-nemeckiy-muzey-v-myunhene.html>