



# Эмилий Христианович Ленц (1804–1865)



*Григорьев Николай Дмитриевич – кандидат технических наук, Москва, Россия\*.*

**Николай ГРИГОРЬЕВ**

Эмилий Ленц – знаменитый русский физик немецкого происхождения, академик, профессор Петербургского университета, а впоследствии его ректор, доктор филологии, тайный советник... Он участвовал в кругосветном путешествии Коцебу на шлюпе «Предприятие». Ленц известен своими фундаментальными работами по электромагнетизму и изучению теплового действия электрического тока.

Автор закона определения направления индукционного тока (Правило Ленца) и соавтор закона о тепловом воздействии электрического тока (закон Джоуля–Ленца), он провёл ряд значительных исследований по воздействию тока на разнородные проводники, разработал методы расчёта электромагнитов для построения электрических машин.

*Ключевые слова:* Ленц, история транспорта, закон Джоуля–Ленца, правило Ленца, закон Фарадея–Максвелла–Ленца, баллистический гальванометр, электромагнит, переменный ток.

О его замечательных лекциях по физике и физической географии ходили легенды, они отличались удивительной ясностью и систематичностью.

На протяжении всей своей жизни Ленц занимался исследованиями в области физики. Вклад Ленца в науку сложно переоценить. Эмилий Христианович был исключительно разносторонним учёным. Он был автором учебников по физике для средней школы, работал над гальваническим золочением куполов Храма Спасителя в Москве, над проблемой освещения Невского проспекта в Петербурге. Ленц был физиком в самом широком смысле этого слова. Он никогда не замыкался на «чистой теоретической науке», всегда стремился на практике применить результаты своих открытий.

\*Информация об авторе:

**Григорьев Николай Дмитриевич** – кандидат технических наук, Москва, Россия, 9165688074@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 13.02.2019, принята к публикации 15.01.2020.

**For the English text of the article please see p. 206.**

**29** января 1865 г., 155 лет назад, в Риме в возрасте 60 лет скоропостижно скончался российский учёный немецкого происхождения Эмилий Ленц — один из основоположников электротехники. Ленц — автор правила (1833), названного его именем, учёный экспериментально обосновавший закон Джоуля—Ленца (1842), создавший методы расчёта электромагнитов (совместно с Б. С. Якоби), открывший обратимость электрических машин. С его именем связано открытие закона, определяющего тепловые действия тока, и закона, определяющего направление индукционного тока.

Эмилий Ленц был профессором и ректором Императорского Санкт-Петербургского университета (1863–1865), действительным членом Русского географического общества с 19 сентября (1 октября) 1845 года.

Основоположник современного учения об электрических и магнитных явлениях Эмилий Христианович Ленц [1–10] родился 24 (12 по старому стилю) февраля 1804 г. в г. Дерпт (ныне Тарту, Эстония) в семье обер-секретаря (старшего чиновника) городского магистрата. В 1820 г. он в возрасте 16 лет окончил с отличием гимназию и поступил вначале на естественный факультет Дерптского (ныне Тартуского) университета. Затем по материальным соображениям юноша перевёлся на богословский факультет, но занятия по физике не прекратил. После второго курса студент Ленц участвовал в качестве физика для выполнения наблюдений на море и на суше в 1823–1826 годах в кругосветном путешествии в Атлантическом, Индийском и Тихом океанах на шлюпе «Предприятие» под командованием русского мореплавателя О. Е. Коцебу. Он при помощи сконструированных глупомера и батометра (прибора для взятия проб воды и измерения температур на разных глубинах) изучал физические свойства океанической воды, наблюдал и подробно описывал атмосферные явления и извержение вулканов, исследовал магнитное склонение, разработал циркуляционную теорию морских течений и впервые обозначил задачи физической географии как науки. Всё это послужило началом точных наблюдений в области



океанографии. Им было доказано наличие взаимосвязи между солёностью океанической воды, количеством солнечной радиации и силой ветра: наименее солёная вода на экваторе, так как там больше всего солнечного тепла, а воздух малоподвижен; в этих условиях в процессе испарения микрокапли остаются на поверхности океанической воды, создавая препятствие для воздействия Солнца. В 1827 г. Ленц по материалам океанографических научных исследований после их обработки методом наименьших квадратов и анализа защитил в Германии при Гейдельбергском университете диссертацию на степень доктора философии и переехал в Санкт-Петербург, где непродолжительное время преподавал в школе.

В 1828 г. в Санкт-Петербургскую Академию наук была представлена работа Ленца «О солёности и температурах воды океанов на разных глубинах», за которую его избрали адъюнктом (помощником профессора) Академии по физике. В 1829 г. Академия направила 25-летнего учёного для выполнения магнитных и гравитационных наблюдений в научную экспедицию на гору Эльбрус, где им была рассчитана её высота по показаниям барометра. Ленц организовал изучение магнитных явлений и качаний маятника в Николаевской обсерватории на Кавказе, наблюдал измене-





Императорский Санкт-Петербургский университет.

ния уровня Каспия, установив барометрическим способом, что его уровень на 30,5 м ниже, чем у Чёрного моря, исследовал выход на поверхность горючих газов в районе Баку, где недалеко от города собрал образцы нефти.

В 1830 г. Эмилий Ленц в возрасте 26 лет был избран экстраординарным (сверхштатным) академиком Санкт-Петербургской Академии Наук. В его ведение перешёл физический кабинет, собранный предшественником В. В. Петровым [11], в котором прошла вся последующая деятельность учёного.

В 1831 г. английский физик М. Фарадей открыл и описал явление «Магнитоэлектрической и вольтгаэлектрической индукции», где он приводил различные правила для определения направления индуцированных токов. Ленц в 1833 г., изучив все работы в этой области, установил: *«возникающий в замкнутом контуре индукционный ток имеет такое направление, что созданный им поток магнитной индукции через площадь, ограниченную контуром, стремится компенсировать то изменение первоначального магнитного поля, вследствие которого происходит индукция»*. Это правило, названное его именем, является фундаментальным в теоретической электротехнике [12; 13] и оно вошло во все учебники по электротехнике [14; 15]. В последующем на основании этого правила были получены математические связи для мгновенных значений токов и электродвижущих сил. Немецкий физик Ф. Нейман в 1846 г. при выводе законов электромагнитной индукции воспользовался правилом Ленца. Немецкий физик Г. Л. Гельмгольц в 1847 г. в работе о сохранении энергии также сослался на это правило. Следовательно,

Ленц явился предшественником распространения закона сохранения энергии на область явлений электромагнитной индукции, т.е. обобщения величайшего физического открытия XIX века. В математической форме явление электромагнитной индукции дал в 1873 г. английский физик Д. К. Максвелл. В научной и учебной литературе в настоящее время количественный закон Фарадея—Максвелла—Ленца для мгновенного значения электродвижущей силы  $e$  записывается как  $e = -d\psi/dt$  (электродвижущая сила пропорциональна скорости изменения магнитного потока  $\psi$ , то есть первой производной магнитного потока по времени  $d\psi/dt$ ), где знак минус соответствует правилу Ленца.

Правило Ленца помогло решению задачи о точных измерениях напряжённости и намагничивания железа. Он был одним из первых авторов индукционных измерительных приборов [16; 17] и совместно с русским физиком и электротехником Б. С. Якоби предложил баллистический метод для измерения величины магнитного потока теми индукционными действиями, которые возникают при создании или исчезновении потока. Этот метод был единственным в те годы индикатором тока. Он лежит в основе современного баллистического гальванометра, применяющегося для измерения малых величин при кратковременных импульсах тока, в котором подвижная часть имеет относительно небольшой момент инерции, а результат отсчитывается по наибольшему отклонению указателя.

В формулировке правила Ленца заключена идея принципа эквивалентности (обратимости) электрических машин. Он показал, что магнитоэлектрическая индук-

ция Фарадея связана с электромагнитными силами французского учёного А. М. Ампера. «Положение, посредством которого магнитоэлектрическое явление сводится к электромагнитному, заключается в следующем: если металлический проводник движется поблизости от гальванического тока или магнита, то ток мог бы обусловить его перемещение в противоположную сторону; при этом предполагается, что покоящийся проводник может перемещаться в направлении движения или в противоположном направлении». В работе «О некоторых опытах из области гальванизма» принцип обратимости электрических машин им был сформулирован более чётко: *«Каждый электромагнитный опыт может быть обращён таким образом, что он приведёт к соответствующему магнитоэлектрическому опыту. Для этого нужно только сообщить проводнику гальванического тока каким-либо иным способом то движение, которое он совершает в случае электромагнитного опыта, и тогда в нём возникает ток направления, противоположного направлению тока в электромагнитном опыте»*. Из правила Ленца следует, что, пропуская в подвижных катушках, расположенных между полюсами магнитов, токи, можно добиться их вращения. Наоборот, если в подвижные катушки ток не пускать, а вращать их между полюсами магнита за счёт посторонней силы, то в них возникает индуцированная электродвижущая сила. Следовательно, он первым пришёл к выводу об одинаковом устройстве и обратимости электрических машин, экспериментально превратив генератор в двигатель. У современных коллекторных электрических машин имеются конструктивные различия генераторов и двигателей из-за особенностей их коммутации [18; 19].

Уже через четыре года, в 1834 г., Ленц был избран ординарным (штатным) академиком Санкт-Петербургской АН по физике. Он выполнял также педагогическую работу в Морском кадетском корпусе, в Артиллерийской академии, в Главном педагогическом институте, а в 1835 г. был приглашён на должность ординарного профессора кафедры физики (отделённой от химии) Санкт-Петербургского университета, в 1836 г. возглавил кафедру физики и физической географии. В 1840 г. его из-

брали деканом на втором отделении философского факультета, где он пребывал бессменно на этой должности до избрания ректором университета в 1863 г. Им были написаны многочисленные учебники и пособия по физике, а руководство к физике, составленное для русских гимназий и опубликованное в 1839 г., выдержало 11 изданий.

Английский физик Уильям Стёрджен (В. Стэджен) в 1825 г. изобрёл электромагнит. В то время отсутствовали данные по магнитным свойствам железа. Только в совместных работах Ленца с Борисом Якоби «О законах электромагнитов», «О притяжении электромагнитов» и «О влиянии силы тока на интенсивность возбуждаемых в железе магнетизма» были даны методы расчёта электромагнитов в электрических машинах, которые применялись до установления законов магнитной цепи. В них была установлена пропорциональность действия электромагнита силе тока и числу витков катушки (по современной терминологии числу ампер-витков) [20].

В 1841 г. другой английский физик Джеймс Прескотт Джоуль (Джул) опубликовал работу «О теплоте, выделяемой токами», но в Лондонском Королевском обществе (научное общество Великобритании) она встретила некоторые обоснованные возражения, и от него потребовали дополнительных экспериментальных уточнений. Ленц исследовал тангенс-буссоли (прибор для измерения тока, изобретённый И. Нервандером), проверил справедливость и обосновал современникам закон немецкого физика Г. С. Ома и исследовал нагревательное действие токов, результаты которых доложил в Санкт-Петербургской Академии Наук в 1842 г. («О законах выделения тепла гальваническим током») и в 1843 г. («О выделении тепла в проволоках»). В этих сообщениях им точными и экспериментальными данными были доказаны зависимости сопротивления металлов от температуры и основные положения теплового действия тока, названного законом Джоуля–Ленца: выделяемое током тепло пропорционально сопротивлению проводника, квадрату силы тока, времени и не зависит от каких-либо других его свойств. Это явилось одной из предпосылок установления закона сохра-



нения и превращения энергии. В настоящее время на законе Джоуля—Ленца основан расчёт нагревательных электроприборов, выбор сечений воздушных проводов и жил кабельных линий электропередачи, плавких вставок предохранителей и тепловых расцепителей устройств защиты электроустановок от перегрузки и аварийных режимов короткого замыкания [21; 22].

В 1844 г. Ленц вывел формулу для определения тока в любой из параллельно соединённых ветвей, содержащих источники электродвижущих сил, явившуюся предшественницей двух законов для разветвлённых электрических цепей, открытых в 1847 г. немецким учёным Г. Р. Кирхгофом [12–15].

В 1845 г. Ленц стал Действительным членом Русского географического общества, был избран в Совет и до конца жизни выполнял в нём большую разностороннюю работу. В 1851 г. он опубликовал свой фундаментальный труд «Физическая география», который неоднократно переиздавался в России и за рубежом. В нём им были рассмотрены строение земной коры, происхождение и непрерывное перемещение образующих её пород, влияющее на рельеф материков. Были отмечены три фактора, вызывающих непрерывное изменение поверхности суши: вулканические силы, влияние вод при содействии атмосферы и органические существа, и указаны закономерности суточного и годового хода температуры и давления воздуха, ветровой деятельности, испарения воды, конденсации водяного пара и образования облаков, электрических и оптических явлений в атмосфере. Было объяснено происхождение голубого цвета неба, радуги, кругов около Солнца и Луны. Учёный установил причину небольшого повышения температуры воды с глубиной в зоне к югу от 51 градуса южной широты и отметил, что подобная инверсия должна иметь место и в Северном Ледовитом океане. Тем самым он предвосхитил открытие норвежского исследователя Арктики Ф. Нансена, обнаружившего во время экспедиции в 1893–1896 годах тёплые атлантические воды в глубинных слоях Арктического бассейна. Им также было установлено, что солёность воды в океане мало изменяется с глубиной, а в верхнем слое уменьшается с широтой.

Однако наибольшая солёность наблюдается не в экваториальной зоне, а в районах близ тропиков вследствие сильного испарения. Плотность воды возрастает с широтой и с глубиной из-за уменьшения температуры воды в этих направлениях. Поэтому, по мнению Ленца, в Мировом океане наряду с течениями, вызываемыми ветром и наклоном уровня поверхности дна, должно существовать общее и не менее сильное движение поверхностных вод из тропической зоны в области высоких широт и движение глубинных вод из этих областей в тропическую зону. Такая циркуляция, существование которой было подтверждено последующими наблюдениями, представляет собой одну из важнейших причин водообмена между низкими и высокими широтами. Она и обуславливает поступление холодных вод из Индийского, Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов в глубинные слои умеренных и низких широт. Ленц привёл методические указания для определения скоростей течений навигационным способом и высказал мысль о том, что орбиты частиц в ветровых ваннах представляют собой эллипсы. По его предположению главной причиной процессов, происходящих в атмосфере Земли, является солнечная радиация, наибольшая часть энергии которой поглощается океанами, огромными резервуарами влаги и тепла. Она расходуется в основном на испарение воды, вызывая её кругообращение в природе и формируя климат на Земле. Ленц явился основоположником учения о взаимодействии океанов с атмосферой, а его труд «Физическая география», содержащий точные и достоверные океанографические наблюдения, имел большое значение для развития наук о Земле.

В 1846 г. немецкий физик В. Э. Вебер опытным путём установил, что вопреки закону электромагнитной индукции Фарадея электродвижущая сила электрических генераторов при подключении внешней электрической цепи не пропорциональна скорости вращения его вала. Вебер объяснял это тем, что железо магнитной цепи генератора не успевает принять полного намагничивания при быстром изменении электрического поля. Ленц на магнито-электрическом генераторе постоянного

тока собрал большой экспериментальный материал. По работе «О влиянии скорости вращения на индукционный ток, производимый магнитоэлектрическими машинами» он сделал в Санкт-Петербургской АН три сообщения: в 1847, 1853 и 1857 годах. Им было выдвинуто собственное объяснение уменьшению электродвижущей силы, которое в настоящее время называется реакцией якоря при протекании в нём электрического тока. Необходимо учитывать не только токи, индуцируемые во вращающемся якоре электрической машины магнитным полем полюсов, но и токи от самоиндукции в обмотке якоря. Его предложение смещения щёток на некоторый угол относительно нейтральной геометрической линии коллектора с целью ликвидации искрения применяется до сих пор в электрических машинах (генераторах и двигателях) постоянного тока при наличии дополнительных полюсов номинальной мощностью до 300 Вт, а при их отсутствии — мощностью до 1 кВт [23; 24].

В 1853 г. Ленц впервые установил смещение фазы переменного тока относительно фазы синусоидального напряжения, и в 1857 г. он придумал коммутатор, т.е. изобрёл прибор для изучения формы кривой индуктированного переменного тока. Им было определено условие режима полезной максимальной мощности источника электрической энергии, когда внутреннее сопротивление источника и внешней цепи равны между собой. Это условие режима в настоящее время применяется в маломощных электронных устройствах телемеханики, связи, автоматики и управления.

Эмилий Христианович Ленц скоропостижно скончался во время заграничного отпуска и лечения зрения в Риме 10 февраля (29 января по старому стилю) 1865 г. в возрасте 60 лет. Похоронили его в Риме на протестантском кладбище. Им были установлены правило Ленца и закон Джоуля—Ленца, подтверждён закон Ома и ему впервые в электротехнике удалось установить связь между электромагнитными и электродинамическими явлениями [25]. За свои научные труды в области электротехники и геофизики он был избран членом-корреспондентом Академии наук в Турине и в Берлинской академии наук.

Эмилий Ленц всю жизнь прожил в Российской империи, но он так и не выучил русский язык, что ему не помешало стать основателем отечественной школы электротехники.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ленц Эмилий Христианович // Новая Российская энциклопедия / Гл. редактор А. Д. Некипелов. — Т. IX (2). — М.: Энциклопедия, 2013. — С. 246–247.
2. Ленц Эмилий Христианович // Советская энциклопедия / Гл. редактор А. М. Прохоров. — Т. 14. — М.: Советская энциклопедия, 1973. — С. 335–336.
3. Ленц Эмилий Христианович // Большая Советская энциклопедия / Гл. редактор Б. А. Введенский. — Т. 24. — М.: Большая Советская энциклопедия, 1953. — С. 570–571.
4. Ленц Эмилий Христианович // Советский энциклопедический справочник / Гл. редактор А. М. Прохоров. — М.: Советская энциклопедия, 1985. — С. 701.
5. Шателен М. А. Русские электротехники второй половины XIX века. — М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1949. — 379 с.
6. Шателен М. А. Русские электротехники XIX века. — М.: Госэнергоиздат, 1955. — 432 с.
7. Веселовский О. Н., Шнайберг Я. А. Очерки по истории электротехники. — М.: Издательство МЭИ, 1993. — 252 с.
8. Самин Д. К. 100 великих учёных. — М.: Вече, 2000. — 592 с.
9. Истомин С. В. Самые знаменитые изобретатели России. — М.: Вече, 2000. — 469 с.
10. Ржонсницкий Б. Н., Розен Б. Я. Эмилий Христианович Ленц. — М.: Мысль, 1987. — 136 с.
11. Григорьев Н. Д. Пророк в своём отечестве // Мир транспорта. — 2018. — № 3. — С. 236–248.
12. Основы теории цепей. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 528 с.
13. Буртаев Ю. В., Овсянников П. Н. Теоретические основы электротехники. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 552 с.
14. Касаткин А. С., Немцов М. В. Электротехника. — М.: Высшая школа, 2000. — 542 с.
15. Электротехника и электроника / Под ред. В. В. Кононенко. — Ростов-на-Дону, 2004. — 752 с.
16. Электрические измерения / Под ред. А. В. Фремке. — Л.: Энергия, 1973. — 424 с.
17. Электрические измерения / Под ред. Е. Г. Шрамкова. — М.: Высшая школа, 1972. — 518 с.
18. Алексеев А. С. Конструкция электрических машин. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958. — 428 с.
19. Вольдек А. И. Электрические машины. — Л.: Энергия, 1974. — 840 с.
20. Григорьев Н. Д. Умножение движущих сил // Мир транспорта. — 2014. — № 3. — С. 238–245.
21. Цигельман И. Е. Электроснабжение гражданских зданий и коммунальных предприятий. — М.: Высшая школа, 1982. — 368 с.
22. Григорьев Н. Д. Выбор проводников по нагреву. — М.: Типография МИИТ, 2005. — 59 с.
23. Петров Г. Н. Электрические машины. — Ч. 3. Коллекторные машины постоянного и переменного тока. — М.: Энергия, 1968. — 224 с.
24. Брускин Д. Э., Зорохович А. Я., Хвостов В. С. Электрические машины и микромашины. — М.: Высшая школа, 1971. — 432 с.
25. Рассказы из истории русской науки и техники. — М.: Молодая гвардия, 1957. — 125 с.





## Emilius Lenz (1804–1865)



*Grigoriev, Nikolay D., Ph.D. (Eng), Moscow, Russia\*.*

**Nikolay D. GRIGORIEV**

### ABSTRACT

*Emilius Lenz is a famous Russian physicist of German origin, academician, professor at St. Petersburg University, and later its rector, doctor of philology, privy councilor ... He took part in Kotzebue's trip around the world on the sailing sloop Enterprise. Lenz is known for his fundamental work on electromagnetism and the study of the thermal effect of electric current.*

*The author of the law stating the direction of induced current (Lenz's law) and co-author of the law on the thermal effect of electric current (Joule–Lenz law). He carried out several significant studies on the effect of current on dissimilar conductors, developed methods for calculating electromagnets for building electrical machines.*

*Legends circulated about his wonderful lectures on physics and physical geography, they were remarkable for their amazing clarity and systematicity.*

*Throughout his life, Lenz was engaged in research in the field of physics. Lenz's contribution to science can hardly be overestimated. Emilius Lenz was an exceptionally versatile scientist. He was the author of textbooks on physics for high school, worked on the galvanic gilding of the domes of the Cathedral of Christ the Saviour in Moscow, on the problem of lighting Nevsky Prospekt in St. Petersburg. Lenz was a physicist in the broadest sense of the word. He never closed himself on «pure theoretical science», always tried to apply the results of his discoveries in practice.*

*Keywords: Lenz, history of transport, Joule–Lenz law, Lenz's law, Faraday–Maxwell–Lenz law, ballistic galvanometer, electromagnet, alternating current.*

\*Information about the author:

**Grigoriev, Nikolay D.** – Ph.D. (Eng), Moscow, Russia, 9165688074@yandex.ru.

Article received 13.02.2019, accepted 15.01.2020.

**For the original Russian text of the article please see p. 200.**

**O**n January 29, 1865, 155 years ago, at the age of 60, in Rome a Russian scientist of German origin Emilius Lenz, one of the founders of electrical engineering, died suddenly. Lenz is the author of the law (1833) named after him, a scientist who experimentally substantiated the Joule–Lenz law (1842), who created methods for calculating electromagnets (together with B.S. Jacobi), who discovered reversibility of electrical machines. His name is associated with the discovery of the law that determines thermal effects of the current, and the law that determines direction of the induced current.

Emilius Lenz was a professor and rector of the Imperial St. Petersburg University (1863–1865), a full member of the Russian Geographical Society since September 19 (October 1) 1845.

The founder of the modern doctrine of electrical and magnetic phenomena Emilius Christianovich Lenz [1–10] was born on February 24 (12 according to the old style), 1804 in the city of Dorpat (now Tartu, Estonia) in the family of the chief secretary (senior official) of the city magistrate. In 1820, at the age of 16, he graduated from the gymnasium with honours and first entered the Faculty of Science at the University of Dorpat (now Tartu). Then, for material reasons, the young man transferred to the theological faculty, but did not stop his physics studies. After the second year of his studies, student Lenz participated as a physicist in conducting the observations at sea and on land in 1823–1826 during a round-the-world voyage in the Atlantic, Indian and Pacific oceans on the sailing sloop Enterprise under the command of the Russian navigator Otto E. Kotsebue. With the help of a constructed depth gauge and a bathometer (a device for taking water samples and measuring temperatures at different depths), he studied physical properties of ocean water, observed, and described in detail atmospheric phenomena and volcanic eruptions, investigated magnetic declination, developed the circulation theory of sea currents and for the first time outlined the problems of physical geography as a science. All this was the beginning of accurate observations in the field of oceanography. He proved the existence of a relationship between salinity of ocean water, the amount of solar radiation and wind strength: the least salty water is at the equator, since there is the most solar heat, and the air is inactive; under these conditions, during the evaporation process, microdroplets remain on the surface of ocean water, creating an obstacle to the action of the sun.

In 1827, Lenz defended his Ph.D. thesis in Germany at the University of Heidelberg, based on the materials of oceanographic scientific research, after their processing by the least squares' method and analysis, and moved to St. Petersburg, where he taught at school for a short time.

In 1828, Lenz's work «On salinity and temperatures of ocean water at different depths» was presented to St. Petersburg Academy of Sciences, in recognition of that he was elected an associate (assistant professor) of the Academy in physics. In 1829, the Academy sent a 25-year-old scientist to perform magnetic and gravitational observations on a scientific expedition to Mount Elbrus, where he calculated its height according to the readings of a barometer. Lenz organized the study of magnetic phenomena and pendulum swings at Nikolaev Observatory in the Caucasus, observed changes in the level of the Caspian Sea, establishing by a barometric method that its level was 30,5 m lower than that of the Black Sea, investigated the release of flammable gases to the surface in the Baku region, where he also collected oil samples.

In 1830 Emilius Lenz at the age of 26 was elected an extraordinary (supernumerary) academician of St. Petersburg Academy of Sciences. He was in charge of the physics «cabinet» (laboratory), arranged by V. V. Petrov, his predecessor [11], in which all subsequent activities of the scientist took place.

In 1831, the English physicist M. Faraday discovered and described the phenomenon of «*Magnetolectric and voltaelectric inductions*», where he gave various rules for determining the direction of induced currents. Lenz in 1833, having studied all the works in this area, established: «*the induced current arising in a closed loop has such a direction that the flux of magnetic induction created by it through the area bounded by the loop tends to compensate for the change in the initial magnetic field due to which induction occurs*». This law, named after him, is fundamental in theoretical electrical engineering [12; 13] and it was included in all textbooks on electrical engineering [14; 15]. Subsequently, based on this law, mathematical relationships were obtained for the instantaneous values of currents and electromotive forces. In 1846 the German physicist F. Neumann used Lenz's law to derive the laws of electromagnetic induction. The German physicist G. L. Helmholtz in 1847, in his work on conservation of energy, also referred to this law. Consequently, Lenz was the predecessor of extension of the law of conservation of energy





to the field of electromagnetic induction phenomena, i.e. generalization of the greatest physical discovery of 19<sup>th</sup> century. In a mathematical form, the phenomenon of electromagnetic induction was given in 1873 by the English physicist D. C. Maxwell. In the scientific and educational literature, at present, the quantitative Faraday–Maxwell–Lenz law for the instantaneous value of the electromotive force  $e$  is written as  $e = -d\psi/dt$  (the electromotive force is proportional to the rate of change of the magnetic flux  $\psi$ , that is, the first derivative of the magnetic flux  $d\psi/dt$ ), where the minus sign corresponds to Lenz's law.

Lenz's law helped solving the problem of accurate measurements of magnetic strength and magnetization of iron. He was one of the first authors of induction measuring instruments [16; 17], and together with the Russian physicist and electrical engineer B. S. Jacobi proposed a ballistic method for measuring the magnitude of the magnetic flux by those inductive actions that arise when the flux is created or disappeared. This method was the only current indicator in those years. It forms the basis of the modern ballistic galvanometer, used to measure small values at short-term current pulses, in which the moving part has a relatively small moment of inertia, and the result is counted by the largest deflection of the pointer.

The formulation of Lenz's law contains the idea of the principle of equivalence (reversibility) of electrical machines. He showed that Faraday's magnetolectric induction is associated with the electromagnetic forces of the French scientist A. M. Ampère. *«The position by which a magnetolectric phenomenon is reduced to an electromagnetic one is as follows: if a metal conductor moves near a galvanic current or magnet, then the current could cause its movement in the opposite direction; it is assumed that the stationary conductor can move in the direction of motion or in the opposite direction»*. In his work «On some experiments in the field of galvanism» the principle of reversibility of electric machines was formulated by him more clearly: *«Every electromagnetic experiment can be reversed in such a way that it will lead to a corresponding magnetolectric experience. For this, it is only necessary to give the conductor of the galvanic current in some other way the movement that it makes in case of an electromagnetic experiment, and then a current of the direction opposite to the direction of the current in the electromagnetic experiment appears in it»*. It follows from Lenz's law that by passing currents in moving coils located

between the poles of magnets, currents can be made to rotate. On the contrary, if no current is allowed into moving coils, but they will be rotated between the poles of the magnet due to an external force, then an induced electromotive force arises in them. Consequently, he was the first to come to the conclusion about the same structure and reversibility of electric machines, experimentally turning a generator into a motor. Modern collector electric machines have structural differences between generators and motors due to the peculiarities of their commutation [18; 19].

Four years later, in 1834, Lenz was elected an ordinary (full-time) academician of St. Petersburg Academy of Sciences in physics. He also performed pedagogical work at the Naval Cadet Corps, at the Artillery Academy, at the Main Pedagogical Institute, and in 1835 he was invited to the post of ordinary professor of the Department of Physics (separated from chemistry) at St. Petersburg University, in 1836 he headed the Department of Physics and physical geography. In 1840 he was elected dean of the second department of the Faculty of Philosophy, where he held this position permanently until his election as rector of the university in 1863. He wrote numerous textbooks and manuals on physics, and a manual on physics, compiled for Russian gymnasiums and published in 1839, withstood 11 editions.

The English physicist William Sturgeon invented the electromagnet in 1825. At that time, there were no data on magnetic properties of iron. Only in the joint works of Lenz with Boris Jacobi «On the laws of electromagnets», «On attraction of electromagnets» and «On the influence of current on intensity of magnetism excited in iron» were given methods for calculating electromagnets in electric machines, which were used before the laws of the magnetic circuit were established. In them, proportionality of action of the electromagnet to the current strength and the number of turns of the coil (in modern terminology, the number of ampere-turns) was established [20].

In 1841, another English physicist James Prescott Joule (Jule) published his work «On the heat given off by currents», but in the Royal Society of London (the scientific society of Great Britain), it faced some justified objections and the members demanded additional experimental clarifications from him. Lenz investigated the tangent-compass (a device for measuring current invented by Johan Jakob Nervander, checked validity and substantiated to his contemporaries the law of the German physicist G. S. Ohm and investigated the

heating effect of currents, the results of which he communicated to St. Petersburg Academy of Sciences in his reports in 1842 («On the laws of release of heat by galvanic current») and in 1843 («On release of heat in wires»). In these reports, he proved the dependence of resistance of metals on temperature and the main provisions of the thermal action of current, called the Joule–Lenz law, with accurate and experimental data: the heat released by the current is proportional to resistance of the conductor, the square of the current strength, time and does not depend on any of its other properties. This was one of the prerequisites for establishing the law of conservation and transformation of energy. Currently, the Joule–Lenz law is based on calculation of electrical heating devices, the choice of cross-sections of overhead wires and cores of cable power lines, fuse-links, and thermal releases of devices for protecting electrical installations from overload and emergency modes of short circuit [21; 22].

In 1844 Lenz derived a formula for determining the current in any of the parallel-connected branches containing sources of electromotive forces, which was the predecessor of two laws for branched electric circuits, discovered in 1847 by the German scientist G. R. Kirchhoff [12–15].

In 1845 Lenz became a Full Member of the Russian Geographical Society, was elected to the Council, and until the end of his life he performed a great and versatile work in it. In 1851 he published his fundamental work «Physical Geography», which was reprinted several times in Russia and abroad. In it, he examined the structure of the earth's crust, the origin and continuous movement of the rocks that form it, and which affects the relief of the continents. Three factors were noted that cause a continuous change in the land surface: volcanic forces, the influence of waters assisted by the atmosphere and organic creatures, and the patterns of daily and annual variations in air temperature and pressure, wind activity, water evaporation, condensation of water vapour and the formation of clouds, electrical and optical phenomena in the atmosphere. The origin of the blue colour of the sky, rainbow, circles around the Sun and Moon was explained. The scientist found the reason for the slight increase in water temperature with depth in the zone south of 51 degrees south latitude and noted that a similar inversion should take place in the Arctic Ocean. Thus, he anticipated the discovery of the Norwegian Arctic explorer F. Nansen, who discovered warm Atlantic waters in the deep layers of the Arctic basin

during his expedition in 1893–1896. He also found that salinity of water in the ocean changes little with depth, and in the upper layer decreases with latitude. However, the highest salinity is observed not in the equatorial zone, but in areas near the tropics due to strong evaporation. The density of water increases with latitude and depth due to a decrease in water temperature in these directions. Therefore, according to Lenz, in the World Ocean, along with currents caused by wind and the slope of the bottom surface level, there should be a general and no less strong movement of surface water from the tropical zone to high latitudes and movement of deep waters from these areas to the tropical zone. This circulation, the existence of which has been confirmed by subsequent observations, is one of the most important causes of water exchange between low and high latitudes. It also determines the flow of cold waters from the Indian, Atlantic, Pacific, and Arctic oceans into the deep layers of temperate and low latitudes. Lenz gave methodological instructions for determining velocities of currents in a navigational way and suggested that the orbits of particles in wind baths are ellipses. According to his position, the main reason for the processes taking place in the Earth's atmosphere is solar radiation, the largest part of which is absorbed by the oceans, huge reservoirs of moisture and heat. It is spent mainly on evaporation of water, causing its circulation in nature, and forming the climate on Earth. Lenz was the founder of the theory of interaction of the oceans with the atmosphere, and his work «Physical Geography», containing accurate and reliable oceanographic observations, was of great importance in development of earth sciences.

In 1846, the German physicist W. E. Weber experimentally established that, contrary to Faraday's law of electromagnetic induction, the electromotive force of electric generators when connected to an external electrical circuit is not proportional to speed of rotation of its shaft. Weber explained this by the fact that iron of the generator's magnetic circuit does not have time to accept full magnetization when the electric field changes rapidly. Lenz collected a large amount of experimental material on a magnetoelectric DC generator. He made three reports in the St. Petersburg Academy of Sciences on the work «On the influence of speed of rotation on the induction current produced by magnetoelectric machines»: in 1847, 1853 and 1857. He put forward his own explanation



for decrease in the electromotive force, which is currently called the reaction of the armature when an electric current flows through it. It is necessary to consider not only the currents induced in the rotating armature of an electric machine by the magnetic field of the poles, but also currents from self-induction in the armature winding. His proposal to displace the brushes by a certain angle relative to the neutral geometric line of the collector in order to eliminate sparking is still used in electric machines (generators and motors) of direct current in the presence of additional poles with a rated power of up to 300 W, and in their absence – with a power of up to 1 kW [23; 24].

In 1853 Lenz first established the phase shift of an alternating current relative to the phase of a sinusoidal voltage, and in 1857 he invented a switch, i.e., invented a device for studying the shape of the curve of the induced alternating current. He determined the condition for the maximum useful power of the source of electrical energy when the internal resistance of the source and the external circuit are equal to each other. This condition of the mode is currently used in low-power electronic devices for telemechanics, communications, automation, and control.

Emilius Christianovich Lenz died suddenly during an overseas vacation and vision therapy in Rome on February 10 (January 29, old style) 1865 at the age of 60. He was buried in Rome at a Protestant cemetery. He established the Lenz law and the Joule–Lenz law, confirmed Ohm's law and for the first time in electrical engineering he managed to establish a connection between electromagnetic and electrodynamic phenomena [25]. For his scientific work in the field of electrical engineering and geophysics, he was elected a corresponding member of the Academy of Sciences in Turin and of the Berlin Academy of Sciences.

Emilius Lenz lived all his life in the Russian Empire, but he never learned Russian, which did not prevent him from becoming the founder of the national school of electrical engineering.

## REFERENCES

1. Lenz Emilius Christianovich. In: New Russian Encyclopedia. Ch. Ed. A. D. Nekipelov. Vol. IX (2), Moscow, Encyclopedia, 2013, pp. 246–247.
2. Lenz Emilius Christianovich. In: Soviet encyclopedia. Ch. Ed. A. M. Prokhorov. Vol. 14, Moscow, Soviet encyclopedia, 1973, pp. 335–336.
3. Lenz Emilius Christianovich. In: Great Soviet Encyclopedia. Ch. Ed. B. A. Vvedensky. Vol. 24, Moscow, Great Soviet Encyclopedia, 1953, pp. 570–571.
4. Lenz Emilius Christianovich. In: Soviet encyclopedic reference book. Ch. Ed. A. M. Prokhorov. Moscow, Soviet encyclopedia, 1985, p. 701.
5. Shatelen, M. A. Russian electrical engineers of the second half of 19<sup>th</sup> century [*Russkie elektrotehniki vtoroi poloviny XIX veka*]. Moscow–Leningrad, State energy publishing house, 1949, 379 p.
6. Shatelen, M. A. Russian electrical engineers of 19<sup>th</sup> century [*Russkie elektrotehniki XIX veka*]. Moscow, Gosenergoizdat publ., 1955, 432 p.
7. Veselovsky, O. N., Shneiberg, Ya. A. Essays on the history of electrical engineering [*Ocherki po istorii elektrotehniki*]. Moscow, Publishing house of MEI, 1993, 252 p.
8. Samin, D. K. 100 great scientists [*100 velikikh uchenykh*]. Moscow, Veche publ., 2000, 592 p.
9. Istomin, S. V. The most famous inventors of Russia [*Samie znamenitie izobretateli Rossii*]. Moscow, Veche publ., 2000, 469 p.
10. Rzhonsnitsky, B. N., Rosen, B. Ya. Emilius Christianovich Lenz. Moscow, Mysl publ., 1987, 136 p.
11. Grigoriev, N. D. The prophet in his homeland. *World of Transport and Transportation*, Vol. 16, 2018, Iss. 3, pp. 236–248.
12. Fundamentals of circuit theory [*Osnovy teorii tsepei*]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1985, 528 p.
13. Burtaev, Yu. V., Ovsyannikov, P. N. Theoretical foundations of electrical engineering [*Teoreticheskie osnovy elektrotehniki*]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1984, 552 p.
14. Kasatkin, A. S., Nemtsov, M. V. Electrical engineering [*Elektrotehnika*]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 2000, 542 p.
15. Electrical engineering and electronics [*Elektrotehnika i elektronika*] / Ed. V. V. Kononenko. Rostov-on-Don, 2004, 752 p.
16. Electrical measurements [*Elektricheskie izmereniya*] / Ed. by A. V. Fremke. Leningrad, Energia publ., 1973, 424 p.
17. Electrical measurements [*Elektricheskie izmereniya*] / Ed. by E. G. Shramkov. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1972, 518 p.
18. Alekseev, A. S. Design of electrical machines [*Konstruktsiya elektricheskikh mashin*]. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat publ., 1958, 428 p.
19. Voldek, A. I. Electric machines [*Elektricheskie mashiny*]. Leningrad, Energia publ., 1974, 840 p.
20. Grigoriev, N. D. Multiplication of driving forces. *World of Transport and Transportation*, Vol. 12, 2014, Iss. 3, pp. 238–245.
21. Tsigelman, I. E. Power supply of civil buildings and communal enterprises [*Elektrosnabzhenie grazhdanskikh zdaniy i kommunalnykh predpriyatii*]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1982, 368 p.
22. Grigoriev, N. D. Selection of conductors for heating [*Vybor provodnikov po nagrevu*]. Moscow, MIIT Printing house, 2005, 59 p.
23. Petrov, G. N. Electrical machines. Part 3. Collector machines of direct and alternating current [*Elektricheskie mashiny. Ch. 3. Kollektornye mashiny postoyannogo i peremennogo toka*]. Moscow, Energia publ., 1968, 224 p.
24. Bruskin, D. E., Zorokhovich, A. Ya., Khvostov, V. S. Electric machines and micromachines [*Elektricheskie mashiny i mikromashiny*]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1971, 432 p.
25. Stories from the history of Russian science and technology [*Rasskazy iz istorii russkoi nauki i tekhniki*]. Moscow, Molodaya gvardiya publ., 1957, 125 p. ●