

К истории колебательного характера электрического разряда

В. М. Пестриков

Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения

pvm205@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены ранние научные исследования колебательного разряда, которые привели к открытию явления электрического резонанса.

Ключевые слова: лейденская банка, искра, искровой разряд, затухающие электрические колебания

I. ВВЕДЕНИЕ

Самые ранние знания об электрическом токе были связаны со статическим электричеством, которое проявляется в накоплении электрического заряда на поверхностях тел или в материалах. Изобретение гальванического элемента привело к появлению постоянного тока. Только с созданием устройств, которые были способны производить переменный или колебательный электрический ток было открыто явление электрического резонанса. Это явление получило широкое распространение в радиотехнике. Сегодня поворачивая ручку настройки радиоприемника при поиске радиостанций, мы тем самым «настраиваемся» на нужную нам станцию в резонанс.

Лейденская банка, открытая в 1746 году, в течение многих лет была одним из важнейших инструментов в скромном оборудовании экспериментаторов-электриков. Когда банка заряжалась электрической машиной, а разрядные ручки сближались достаточно близко, между ними проскакивала искра. Ученые тех дней предполагали, что эта банка с двойным покрытием была накопителем электричества, конденсатором. После прохождения искры, на одной обкладке накапливался положительный заряд, а на другой — отрицательный. При разряде банки, проскакивала искра и заряды на обкладках нейтрализовывали друг друга. Исследователи не знали и не подозревали, что этот разряд был колебательным. Сначала одна сторона покрытия, а затем и другая, становились положительно заряженными. Перезарядка происходила с затуханием тока до тех пор, пока он не становился равным нулю.

II. I. ЭКСПЕРИМЕНТЫ Г. В. РИХМАНА

Колебательный характер электрического разряда был доказан еще до экспериментальных работ с электромагнитными волнами Г. Герца.

Одними из первых такими работами стали исследования разряда лейденской банки. Русский ученый Георг Вильгельмович Рихман (11.06.1711–26.06.1753) в 1753 году разработал схему, состоящую из лейденской банки, включенной между двумя изолированными телами, одно из которых могло заряжаться машиной, а другое — одновременно от конденсатора (рис.1). К обоим телам были присоединены электрометры с одинаковыми шкалами. Экспериментируя со схемой, Г. В. Рихман впервые

создал режим заряда–разряда конденсатора и выявил колебательный характер разряда лейденской банки, чему, однако, объяснения дать не мог [1]. Об обнаруженном явлении он написал в своих «Заметках по электричеству»: «электричество может попеременно как бы выталкиваться из одного тела в другое» [2].

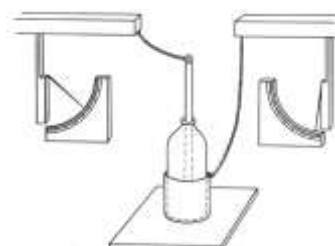


Рис. 1. Рихман и его эксперимент по колебательному разряду лейденской банки (1753 г.) [2]

Эффект Рихмана произвел ошеломляющее впечатление на русского физика Франца Эпинуса (нем. Franz Ulrich Maria Theodor Aepinus (Äpinus, Hoch), 13.12.1724–10.08.1802), что тот в своем капитальном труде «Опыт теории электричества и магнетизма», изданном в 1759 году в Петербурге, поместил статью с объяснением «одного явления в лейденской банке, открытого знаменитейшим Рихманом» [3].

Ф. Эпинус, однако, не особо разобрался в сути явления. Упомянув об экспериментах «профессора Рихмана из Петербурга» с лейденской банкой, известный английский физик Джозеф Пристли (англ. Joseph Priestley, 13.03.1733–06.02.1804) назвал их «весьма любопытными и элегантными».

В 1801 году английский физик и химик Уильям Хайд Волластон (англ. William Hyde Wollaston, 06.08.1766–22.12.1828) опубликовал короткую, но значимую статью «Эксперименты по химическому производству и действию электричества», в которой он добавил свой голос к сторонникам того, что электрический ток столба Вольты такое же электричество, как и на основе трения [4]. В статье приводились десять проведенных им опытов по этой тематике.

В одном из опытов У. Волластону удалось разложить воду с помощью электрических разрядов искры. В ходе эксперимента он наблюдал, что, когда разложение происходит под действием разряда статического электричества, то водород и кислород не появляются на разных электродах, как в опыте с гальваническим столбом, а на каждом электроде выделяется смесь газов, словно ток прошел через воду в обоих направлениях.

Это как раз и говорит о том, что разрядный ток состоит из чередующихся, противоположно направленных токов. Однако этот вопрос не интересовал

автора статьи, она была посвящена другой проблеме. На этот опыт У. Волластона как раз и сослался через 46 лет в своей статье Г. Гельмгольц, обосновывая колебательный характер искры лейденской банки. Недаром в кругу английских ученых была в ходу поговорка: «Тот, кто спорит с Волластоном, – неправ».

Нужно отметить, что в эксперименте У. Волластона электрический ток подводился от электростатического генератора по очень тонким проводящим скрученным нитям с двумя микроскопическими золотыми наконечниками, погруженными в воду. До У. Волластона для разложения воды использовали сильные разряды от батареи лейденских банок, которые пропускались через жидкость и производили в ней взрывы, сопровождавшиеся искрами.

III. ОПЫТЫ САВАРИ

После этих опытов, французский физик Феликс Савар (фр. Félix Savary, 30.06.1791–16.03.1841) на основании экспериментальных наблюдений в 1827 году опубликовал статью, в которой отметил, что когда несколько игл располагаются на различном расстоянии над проволокой, через которую проходит разряд лейденской батареи, то они намагничиваются в различных направлениях, и что путем последовательного усиления разряда через катушку достигается несколько перемен полюсов у находившихся в ней игл, рис. 2 [5].



Рис. 2. Ф. Савари и его эксперимент по колебательному характеру электрического разряда лейденской банки

В статье [5] Сафари высказал предположение о том, что полученные им результаты были вызваны колебательным разрядом банки:

«Электрический разряд – это явление движения. Является ли это движение непрерывным перемещением материи в определенном направлении? Тогда противоположная полярность магнетизма, наблюдаемая на разных расстояниях от прямого проводника или в спирали с постепенно увеличивающимися разрядами, была бы обусловлена исключительно взаимными реакциями магнитных частиц в стальных иглах. Способ, которым действие провода изменяется с его длиной, как мне кажется, исключает это предположение».

В 1834 году английский физик Чарльз Уитстон (англ. Sir Charles Wheatstone, 06.02.1802–19.10.1875) занялся изучением искрового разряда. Для этого он сконструировал вогнутое зеркало, которое вращалось вручную от ременной передачи со скоростью 50 об./с (рис. 3) [6]. Перед вращающимся зеркалом проскакивала искра, которая проецировалась на противоположную стену. В результате вращения зеркала она отображалась не как линия света, а как полоса света. Ч. Уитстон смог приблизительно измерить длину искры и таким образом легко определить длительность времени ее существования: длина световой полосы делилась на

скорость вращения зеркала, или расстояние, пройденное зеркалом, выраженное в угловых секундах.



Рис. 3. Английский физик сэр Ч. Уитстон (1837) и его установка для изучения искрового разряда

В середине 30-х годов XIX века французский физик Доминик Франсуа Араго, секретарь Парижской академии наук, рекомендовал выбрать Ч. Уитстона на вакантное место члена-корреспондента академии. Д. Араго хорошо был знаком с работами Ч. Уитстона.

Наиболее важными из них, которые послужили поводом для избрания в Парижскую академию, Араго считал его эксперименты по измерению скорости распространения электрического заряда по проводнику и определению длительности существования искры электрического разряда. Главным в этих опытах было то, что Ч. Уитстон разработал новую технологию для исследования быстропротекающих процессов, которая могла быть использована для решения других научных проблем.

Американский физик Джозеф Генри (Joseph Henry, 17.12.1797–13.03.1878), прочитав статью Ф. Савари, отметил: «...возникли некоторые сомнения в отношении правильности показаний направления тока этим путем с тех пор, как г. Савар опубликовал в 1826 г. сообщение о том, что когда несколько игл располагаются на различном расстоянии над проволокой, через которую проходит разряд лейденской банки, то они намагничиваются в различных направленных и что путем последовательного усиления разряда через спираль достигается несколько перемен полюсов у находившихся над ней игл» [7].

Это заставило Дж. Генри в 1840–1842 годах исследовать разряд лейденской банки в цепи, содержащей соленоид со стальной иглой. Намагнитив около 1000 толстых игл, Дж. Генри не обнаружил изменений полярности, однако, когда он взял тонкие иглы, то наблюдалось несколько перемен полярности, что было связано с «простым увеличением количества электричества, в то время как направление разряда оставалось прежним».

В итоге он пришел к выводу: «Разряд, какова бы ни была его природа, если воспользоваться для удобства теорией Франклина, не представляется единичным переносом невесомого флюида с одной обкладки банки на другую; явление заставляет нас допустить существование главного разряда в одном направлении, затем нескольких возвратных действий назад и вперед, каждое из которых слабее предыдущего, и так до тех пор, пока не наступит равновесие» [8]. Дж. Генри также утверждал, что при разряде «волны электричества» пробегают по поверхности проводника, а не внутри него, как это происходит при прохождении гальванического тока.

Сообщение об этих работах Дж. Генри представил 17 июня 1842 года на сессии Американского философского общества (American Philosophical Society). Описывая свои эксперименты, он сослался на работу Савари и заявил, что взял на себя обязательство повторить эксперименты этого исследователя, прежде чем предпринимать какие-либо новые шаги. В печати сообщение появилось в виде авторизованного реферата: «Статья № 5. Об индукции от обычного электричества и о колебательном разряде» (англ. Contribution N 5. On induction from ordinary electricity and on the oscillatory discharge) [9]. Информация об исследованиях Дж. Генри через 5 лет была помещена в английском журнале «Philosophical Magazine» [10]. П. Рисс (Peter Theophil Riess, 27.06.1805–23.10.1883).

У. Волластон и Г. Гельмгольц быстро повторили эксперимент Генри. Об явлении, исследованном Дж. Генри, сделал сообщение 23 июля 1847 г. перед членами Берлинского физического общества (Berlin Physical Society) 26-летний Герман фон Гельмгольц (нем. Hermann-Ludwig-Ferdinand von Helmholtz, 31.08.1821–08.09.1894) в своей лекции «О сохранении силы», будущий учитель и наставник Генриха Герца. Он, в частности, предложил рассматривать «разряд батареи не как простое движение электричества в одном направлении, а как своего рода маятниковые колебания между двумя обеими обкладками, которые все более и более уменьшаются, пока вся последовательность жизненных сил не будет уничтожена суммой сопротивлений» [11]. В этом высказывании новым явилось лишь упоминание о живой силе.

В 1897 г. Эрнест Резерфорд в одной из своих ранних работ, посвященных проблеме обнаружения электромагнитных волн, отметил главное достижение Дж. Генри: «Аномальный характер намагничивания стальных игл, натолкнул Дж. Генри на мысль, что разряд лейденской банки происходит колебательным образом» [12]. Тем самым Дж. Генри экспериментально установил колебательный характер искрового разряда лейденской банки (конденсатора) и указал на возможность создания электрических колебаний.

Полезность конденсатора, как и в случае многочисленных других открытий, появилась только после того, как были сделаны другие открытия и выявлены взаимосвязи между разрядом конденсатора и явлениями, ранее считавшимися обособленными, не связанными с ним.

IV. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Английский физик Уильям Томсон (лорд Кельвин, 26.06.1824–17.12.1907) прочитал статью Г. Гельмгольца [13], и в 1853 году опубликовал свою статью, в которой впервые математически обосновал возможность существования колебательных электрических разрядов [14]. В статье, на основании закона сохранения энергии для электрической цепи, моделирование резонансного контура описано обыкновенными дифференциальными уравнениями первого порядка с постоянными коэффициентами:

$$i = \frac{dq}{dt}, \quad (1)$$

$$-d\left(\frac{1}{2} \frac{q^2}{C}\right) = d\left(\frac{1}{2} Li^2\right) + Ri^2 dt, \quad (2)$$

где начальные условия: $q = q_0$ – первоначальный заряд и $i = 0$ когда $t = 0$. (3)

В выражениях (1) и (2) следующие обозначения: i – сила тока в разряднике, q – величина заряда в момент времени t , C – емкость конденсатора, R – сопротивление проводника, через который происходит разряд, L – индуктивность или коэффициент самоиндукции этого проводника.

После подстановки (1) в (2) и преобразований получено обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{CL} q = 0. \quad (4)$$

В результате решения дифференциального уравнения (4) с условиями (3) получена формула для определения величины заряда, появляющегося в конденсаторе при колебательном разряде, спустя t секунд после момента начала последнего:

$$q = \frac{q_0}{\varepsilon L} e^{-\frac{R}{2L}t} \left\{ \varepsilon L \cos(\varepsilon t) + \frac{R}{2} \sin(\varepsilon t) \right\},$$

где $\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$. (5)

Для определения величины периода полного электрического колебания T , т. е. продолжительность одного полного изменения заряда конденсатора в работе получена следующая формула:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (6)$$

Когда проводник, через который происходит разряд, имеет очень малое сопротивление, т. е. тогда можно пренебречь величиной $\frac{R^2}{4L^2}$ в сравнении с величиной $\frac{1}{LC}$, то период полного электрического колебания можно записать в виде:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (7)$$

Относительная погрешность формулы (7) по сравнению с (6), приблизительно равна $\frac{R^2 C}{8L}$, т. е. порядка одной тысячной.

У. Томсон обнаружил, что решение дифференциального уравнения (4) критически зависит от относительных значений емкости, индуктивности и сопротивления в современной терминологии, и что при определенных обстоятельствах колебания вообще не происходят, т. е. в случае чрезмерного затухания.

Уравнение (4) обычно называют уравнением разряда конденсатора, причем при выполнении условия $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ разряд будет колебательным, а в случае $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ – аperiодическим, случай $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ называют критическим.

Теория Томсона показала, что разряд не представляет собой мгновенное явление, а наоборот он может происходить с различными периодами времени и

процессами различного характера. Интересно отметить, что У. Томсону в момент публикации упомянутой выше фундаментальной статьи было 29 лет.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 1861 году немецкий физик из Лейпцига Вильгельм Феддерсена (Berend Wilhelm Feddersen, 26.03.1832–01.07.1918) исследовал разрядную искру с помощью технологии Ч. Уитстона с вращающимися зеркалами, добавив к ней запись явления на фотографические пластины [15, 16]. В 1862 году он обнаружил, что каждый разряд состоит из целой серии разрядов. В одном из опытов В. Феддерсена, например, оказалось, что время свечения искры было 0,000025 с, и эта искра состояла из нескольких последовательных вспышек продолжительностью примерно 0,000005 с. Зная быстроту вращения зеркала, он определил промежуток времени между отдельными разрядами и показал, что этот период пропорционален квадратному корню из произведения емкости и самоиндукции цепи, в которой наблюдается разряд. Если бы разряд состоял только из одной искры, то в зависимости от длительности разряда изображение искры в зеркале получилось бы удлиненным. Немецкий физик экспериментально подтвердил теорию В. Томсона и убедительно доказал, что электрический разряд имеет колебательный характер.

Русский физик Г.В. Рихман впервые исследовал колебательный характер электрического разряда. Только после открытия колебательных токов электричества появилась возможность исследовать явление электрического резонанса, которое до сих пор играет большую роль в радиотехнике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Цверба Г.К. Георг Вильгельм Рихман. Л.: Наука, 1977. С. 131–132.
- [2] Рихман Г.В. Труды по физике. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 350–352.
- [3] Эпинус Ф.У.Т. Теория электричества и магнетизма. Л., 1951. С. 349–371.
- [4] Wollaston W.H. Experiments on the Chemical Production and Agency of Electricity // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1801. 31 December. Vol. 91. P. 427–434.
- [5] Savary F. “M’emoire sur l’aimantation”. Vol. 34. 1827. Oct. P. 5–57. [Online]. Available: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k65691629/f11.image> (31.05.2025).
- [6] Wheatstone Charles. An Account of some Experiments to measure the Velocity of Electricity and the Duration of Electric Light // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1834. 31 December. Vol. 124. P. 583–591.
- [7] Генри Дж. Колебательный разряд // сборник оригинальных статей и материалов «Из предыстории радио» / сост. проф. С.М. Рытов; под ред. Л.И. Мандельштама. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1948. С. 243–245.
- [8] Joseph Henry. Contributions to Electricity and Magnetism// Proceedings of the American Philosophical Society. Transactions of the American Philosophical Society. New Series. 1839. Vol. 6. P. 303–337.
- [9] Henry J. Contribution N 5. On induction from ordinary electricity and on the oscillatory discharge// Proceedings of the American Philosophical Society. 1842. Vol. 2. P. 193–196.
- [10] Henry J. Electrical experiments // Philosophical Magazine and Journal of Science. 1847. Vol. 30. No. 202. P. 368–369.
- [11] Гельмгольц Г. О сохранении силы // сборник оригинальных статей и материалов «Из предыстории радио» / сост. проф. С. М. Рытов; под ред. Л. И. Мандельштама. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1948. С. 246.
- [12] Резерфорд Э. Магнитный детектор электрических волн и некоторые его применения. Избранные научные труды. Т 1: Радиоактивность. М.: Наука, 1971. С. 41–65.
- [13] Helmholtz H. Messungen über fortpflanzungsgeschwindigkeit der reizung in den nerven-zweite reihe. Arch Anat Physiol Wiss Med. 1852. S. 199–216
- [14] Томсон В. О преходящих электрических тока // Сборник оригинальных статей и материалов «Из предыстории радио» / сост. проф. С.М. Рытов; под ред. Л.И. Мандельштама. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1948. С. 247–257.
- [15] Feddersen B.W. Beiträge zur Kenntniss des elektrischen Funkens // Annalen der Physik und Chemie. 1858. Band 103 [II]. S.69–88.
- [16] Feddersen B.W. Über die elektrische Flaschenentladung // Annalen der Physik und Chemie. 1862. Band 116. S. 132–171.