

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА НА ПРОВОДНИК

Из закона сохранения количества движения получена оценка динамического воздействия электрического поля заряженной сферы на проводник с током; для этого использован характерный временной параметр передачи заряда проводящей сфере. Проведена оценка силы взаимодействия и величины передаваемой энергии, которые позволят определить физическую природу динамического воздействия. Дано описание лабораторного стенда.

Ключевые слова: кулоновское взаимодействие, Ампера закон, поле сферы, проводник с током вблизи заряженной сферы, закон сохранения количества движения.

Введение. В последнее время большое внимание уделяется вопросам взаимодействия проводящих заряженных тел. В одном случае исследуются упрощенные модели [1], в другом — комплексы проводящих линейных структур и заряженных сфер [2]; в исследованиях широко используется численное моделирование уравнений Лапласа и Дирихле с привлечением специальных систем координат [3–5], а также проводятся экспериментальные работы [6, 7]. Рассматриваются преимущественно модели проводящих тел сферической формы с нахождением расстояний, при которых имеет место их взаимное притяжение и отталкивание. Показано [8], что при любом отношении одноименных зарядов, отличном от отношения зарядов соприкасающихся сфер, всегда существует малое расстояние между сферами, на котором они притягиваются друг к другу. Результаты теории и экспериментов, по выражению авторов [5, 9], находятся в удовлетворительном качественном и количественном соответствии.

Для практических целей электроэнергетики, где имеет место электродинамическое взаимодействие за счет близко расположенных проводников, ставится настоящая задача.

1. Постановка задачи. Оценка динамического воздействия электрического заряда на проводник включает получение сведений о силе взаимодействия между проводником и сферой, а также выяснение природы этих взаимодействий. Сведения предполагается получить из экспериментальных результатов с помощью стенда, состоящего из изолированной проводящей сферы, расположенной над заземленным экраном (железный лист) и изолированного гибкого проводника в свободном состоянии повеса вблизи экватора сферы. Для

достижения высокой точности оценки взаимодействия сферы и проводника применить оптическую систему измерений.

2. Основные положения теории. Взаимодействия между заряженной сферой и проводником определяется законом Кулона, сила взаимодействия между токами, текущими по поверхности проводящей сферы и по проводнику — законом Ампера.

Закон Кулона лежит в основе теории электростатического поля, являющийся обобщением данных опыта [5]. Согласно этому закону, два заряженных тела *бесконечно малых размеров* (два точечных заряда) отталкиваются, если заряды их одноименны, и притягиваются, если они разноименны. Сила их взаимодействия $|\vec{F}|$ пропорциональна $e_1 e_2 / R_{12}^2$:

$$F = \frac{e_1 e_2}{R_{12}^2}, \quad (1)$$

где e_1 и e_2 — заряды первого и второго тел, R_{12} — расстояние между ними.

В формулировке закона Кулона *бесконечная малость размеров* заряженных тел понимается в смысле *достаточной их малости по отношению к взаимному расстоянию* между этими телами. В основе вычисления лежит допущение, что сила взаимодействия двух точечных зарядов не зависит от того, подвергаются ли эти заряды воздействию других зарядов, или нет. Это предположение вместе с утверждением, что равнодействующая электрических сил равна векторной сумме этих сил, составляет содержание принципа *наложения* или *суперпозиции* электрических полей.

Закон Ампера (закон ponderomotorного взаимодействия элементов тока) исходит из предположе-

ния, что взаимодействие элементов тока должно удовлетворять третьему закону Ньютона и направлено по линии их соединения.

$$\vec{F}_{12} = \frac{J_1 J_2}{c^3 R_{12}^3} [dl_1 \vec{R}_{12}], \quad (2)$$

где рассмотрена сила \vec{F}_{12} , испытываемая вторым $J_2 dl_2$ элементом со стороны первого $J_1 dl_1$, находящегося на расстоянии \vec{R}_{12} друг от друга. Это — равнодействующая сил, испытываемая элементами замкнутых токов, причем элементы длины dl_1 и dl_2 каждой нити тока могут быть рассмотрены как элементы объема dV бесконечно малого отрезка нитей тока [5].

Оценка динамического воздействия электрического разряда на проводник может быть охарактеризована элементарной работой силы \vec{F} на малом перемещении $d\vec{r}$ точки ее приложения

$$\delta A = (\vec{F}, d\vec{r}) = (\vec{F}, \vec{v}) dt. \quad (3)$$

На основании второго закона Ньютона: скорость изменения импульса \vec{p} материальной точки массой m и скорости \vec{v} равна действующей на нее силе \vec{F} , то есть

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} \quad \text{или} \quad \frac{d}{dt}(m\vec{v}) = \vec{F}.$$

Здесь импульс силы \vec{F} — векторная величина за малое время dt действия характеризует изменение импульса материальной точки.

Закон сохранения импульса (закон сохранения количества движения) утверждает, что в замкнутой системе векторная сумма импульсов всех тел, входящих в систему, остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой:

$$\sum_{n=1}^N \vec{p}_n = const, \quad (4)$$

т. е. суммарный импульс системы из N частиц является постоянной величиной.

3. Описание экспериментальной установки.

Посеребрённая латунная сфера (рис. 1) массой $M = 0,224$ кг радиуса $R = 6$ см подвешена на изолированной нити над поверхностью экрана на высоте $h = 27$ см. Экран в виде железного листа размером 100×200 см расположен на лабораторном столе и надежно заземлен. В качестве проводника использован многожильный медный провод диаметром $d = 2,5$ мм.

Согласно схеме рис. 1, проводник закреплен на изолированных стойках, а свободно висящий провод имеет дугу провеса величиной $\Pi = 18$ см. Между точками крепления на стойках провод лишен изоляции, поэтому наименьшее расстояние $x = 1$ см между экватором сферы и нижней точкой провеса было выбрано из соображения, чтобы избежать их взаимного соприкосновения в эксперименте.

Для определения величины отклонения проводника от положения равновесия использовалась система, состоящая из легкого зеркала размера 1×1 см, жестко закрепленного в нижней части проводника во избежание его «проворачивания» при отклонении проводника в плоскости качения. Раз-

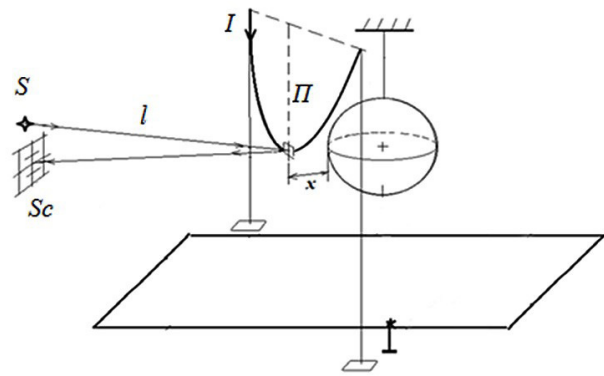


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

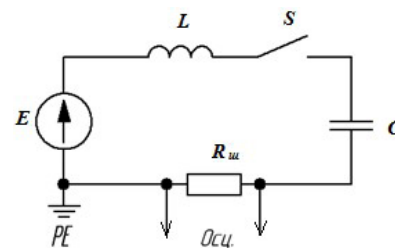


Рис. 2. Электрическая схема для регистрации осциллограммы тока переходного процесса. Сопротивление шунта $R_{ш} = 1,0$ Ом

мер и положение регистрирующего экрана (Sc), на который проецировался отраженный от зеркала световой луч диодного лазера (S), обеспечивало регистрацию его положения при противоположных направлениях качения проводника.

В эксперименте применялись два источника электропитания. Один из них представлял высоковольтный источник вторичного электропитания (ИВЭ) постоянного тока с диапазоном регулирования $0,6 \dots 10$ кВ при максимальном выходном токе не более 1 мА. Корпус его не был заземлен, чем обеспечивалась возможность передачи заряда сфере положительного или отрицательного знаков относительно заземленного экрана. Второй источник представлял собой блок питания «Токоисправитель стабилизированный» ТЕС 88 НТР30.2 — стандартный источник питания постоянного тока с незаземленными выводами, обеспечивающего регулируемое значение тока проводника $\pm 1,0$ А с погрешностью ± 5 %. Заряд и разряд сферы осуществлялся в точках ее полюсов гибкими проводниками, закрепленными на изолированных штангах.

4. Результаты экспериментов и обсуждение результатов. Входящее в определение импульса силы малое время ее действия Δt может быть найдено как характерный параметр переходного процесса — «т», наблюдаемый при передаче заряда от высоковольтного источника питания сфере, закрепленной на подвешенной нити (рис. 1). Для этого согласно электрической схеме (рис. 2), в которой, в отличие от сосредоточенного характера емкости сферы C , индуктивность L имеет распределенный характер, была снята осциллограмма тока (рис. 3).

В исходном состоянии система находилась в состоянии покоя: сфера оставалась неподвижной на нити, проводник с током — в состоянии свободного провеса (рис. 1).

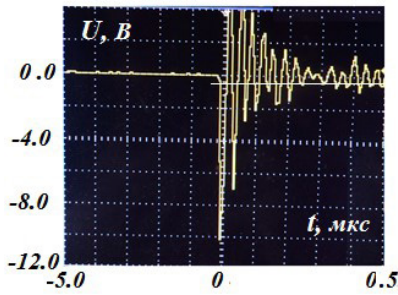


Рис. 3. Осциллограмма тока переходного процесса в виде падения напряжения на сопротивлении R_m ; приведена ширина по уровню $0,1 U_{max}$

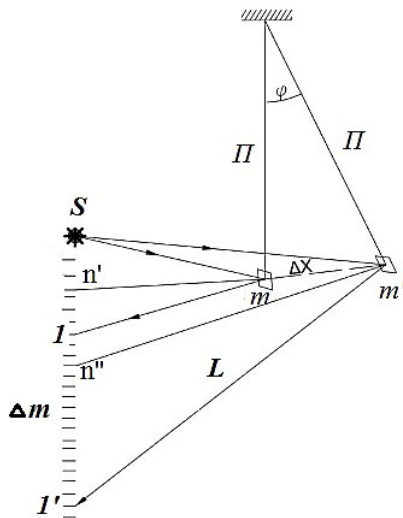


Рис. 4. Геометрические параметры оптической системы регистрации амплитуды колебаний, возникающих под действием заряда

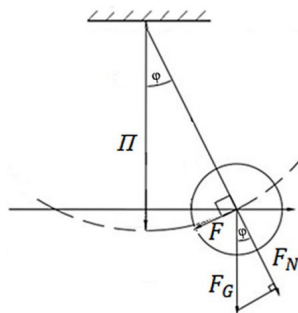


Рис. 5. Сила отклонения маятника равна и противоположна силе F , возвращающей его в исходное положение

В результате передачи сфере (проводником на изолированной штанге) заряда от ИВЭ возникает сила взаимодействия между сферой и проводником, в результате чего появляется угол его наклона относительно вертикального положения. Полученное отклонение Δx (рис. 4), регистрируемого на экране S отклонения луча Δm , как разность между положениями I и I' , длина «маятника» $\Pi = l$,

а также расстояния L от зеркала до экрана, связаны соотношением

$$\frac{\Delta m}{\Delta x} = \frac{L}{l}$$

С учетом известных значений величин $l = 18$ см и $L' = 2,00$ м, полученное отношение $\Delta m/L' \approx 11$; при точности регистрации Δm на экране ± 1 мм погрешности определения величины Δx не превышает 0,16 мм.

Согласно схеме сложения векторов (рис. 5),

$$\vec{F}_G = \vec{F}_N + \vec{F}$$

Значение силы $|\vec{F}|$, возвращающей маятник в исходное состояние,

$$F = F_G \sin \varphi \approx mg \frac{\Delta x}{\Pi}$$

позволяет по (5) определить элементарную работу силы \vec{F} , что дает оценки величин начальной скорости \vec{V}_1 и затраты энергии электростатического поля на выполнение элементарной работы \vec{F} на малом перемещении $d\vec{r}$ точки ее приложения.

Закон сохранения импульса (4) позволяет определить значение скорости \vec{V}_2 . Полученное при $N=2$ из закона сохранения импульса $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = 0$ соотношение между скоростями

$$m\vec{V}_1 = -M\vec{V}_2,$$

где \vec{V}_1, \vec{V}_2 — начальные скорости сферы и проводника, делает оценку отношению

$$\frac{\vec{V}_2}{\vec{V}_1} = \frac{m}{M} \ll 1. \tag{5}$$

При $M \gg m$ начальная скорость движения проводника \vec{V}_1 существенно больше начальной скорости движения сферы \vec{V}_2 , и угол его отклонения от положения равновесия измеряется с большей точностью.

При проведении предварительных испытаний было подтверждено, что конструкция обеспечивает жесткое закрепление нахождения луча в плоскости колебания проводника, причем падающий световой луч находился в пределах отклонений зеркала, а отраженный — не выходит за пределы экрана S (рис. 1).

Напряжение питания проводника $U_{num} = 0,7$ В; масса m проводника 6,9 Г, а с учетом веса зеркала $m \sim (6,9 + 1,8) \text{ Г} = 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$.

Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Угол, на который проводник отклонился, и величина силы отклонения F проводника от положения равновесия, согласно схеме рис. 5, $\sin(\varphi) = \frac{6,3 \text{ мм}}{180 \text{ мм}} = 0,035$; $\varphi = 2,00^\circ$, составляет

$$F = mg \cdot \sin(\varphi) = 8,7 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot \sin(2^\circ) = 2,97 \cdot 10^{-3} \text{ Н.} \tag{6}$$

Анализ периодического затухающего процесса на уровне $0,1 U_{max}$ (рис. 3) позволил найти оценку характерного времени передачи $\Delta \tau \sim 0,3$ мкс, а также импульса

Таблица 1

Исходные данные

N п/п	Заряд, кВ	Ток, А	Отклонение, мм	
			Δm (изм.)	Δx (расч.)
1	+5,00	+0,8	+70	6,3

$$p = 2,97 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 10^{-6} = 0,89 \cdot 10^{-9} \text{ кг}\cdot\text{м.}$$

Элементарная работа δA силы \vec{F} , направление которой сонаправлено с вектором $d\vec{r}(dx, 0, 0) \sim \Delta x$ и направлено против силы веса (6) $\delta A = (\vec{F}, d\vec{r}) \sim F \cdot x$

$$\delta A = 2,97 \cdot 10^{-3} \cdot 6,3 \cdot 10^{-3} = 18,71 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} \quad (7)$$

позволяет воспользоваться элементарной работой (3) для нахождения начальной скорости V_1 движения массы m проводника

$$\begin{aligned} \vec{V}_1 &= \frac{\delta A}{F \cdot \Delta t} = \\ &= (18,71 \cdot 10^{-6}) / (2,97 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 10^{-6}) = \\ &= 21,0 \cdot 10^3 \text{ м/с,} \end{aligned}$$

а также начальной скорости движения сферы, массы $M = 0,224$ кг, согласно (5)

$$V_2 = 21 \cdot 10^3 \cdot 8,7 \cdot 10^{-3} / 0,224 = 182 \text{ м/с.}$$

Величина емкости сферы, радиуса $R = 6$ см, находящейся на высоте $h = 27$ см над проводящим экраном,

$$C = \frac{\pi \epsilon \epsilon_0}{d - R} R(2d - R) = 386,12 \cdot 10^{-14} = 3,86 \text{ пФ}$$

позволяет сделать оценку запасенной в конденсаторе электрической энергии

$$\begin{aligned} W_E &= (cU^2)/2 = 193 \cdot 10^{-14} \cdot 25 \cdot 10^6 = \\ &= 4826,5 \cdot 10^{-8} = 48,26 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.} \end{aligned} \quad (8)$$

Значение распределенной индуктивности $L = 383$ мкГн электрической схемы (рис. 2) была определена из значения собственной частоты $\omega_0 = (47,1 \pm 5,2)$ МГц колебаний тока переходного процесса с амплитудой $I \sim 10$ А.

В ходе эксперимента при передаче сфере положительного потенциала ($U = +5$ кВ) от высоковольтного источника было обнаружено, что линейный проводник с током, расположенный на расстоянии $x = 1$ см относительно поверхности сферы, реагирует на заряд сферы первоначальным отклонением проводника в сторону сближения с ней. По результатам эксперимента были определены начальные скорости движения системы взаимодействующих тел — сферы и проводника, вычислены значения энергии электрического поля емкости сферы, полученной от АС — источника, а также элементарной работой силы на малом перемещении точки ее приложения.

Для более полного представления динамических процессов передачи энергии системе проводник — проводящая сфера необходимо принять

во внимание равнодействующую сил (закон Ампера), испытываемая элементами замкнутых поверхностных токов, протекающих в момент передачи заряда сфере (что, возможно, имел в виду автор [10]).

Выводы и заключение. Опытная установка, укомплектованная оптической системой регистрации отклонений проводника, позволила регистрировать амплитуду колебания зеркала от положения равновесия с точностью $\pm 0,16$ мм.

Опытное испытание дало возможность оценить ряд динамических параметров воздействия электрического заряда на проводник. Для более полного представления динамических процессов передачи энергии требуется продолжение работы.

Благодарности

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору В. В. Шалаю (г. Омск) за стимулирующие дискуссии.

Библиографический список

1. Тарунин Е. Л. Задача электростатики о взаимодействии заряженных шаров на близких расстояниях // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2014. № 3 (26). С. 16–27.
2. Kunze K.-K., Netz R. Complexes of semiflexible polyelectrolytes and charged spheres as models for salt-modulated nucleosomal structures // Physical Review E. 2002. Vol. 66 (1). DOI: 10.1103/PhysRevE.66.011918.
3. Коромыслов В. А., Щерба Е. А., Григорьев А. И. Поляризионное взаимодействие двух близко расположенных проводящих шаров в однородном электростатическом поле // Электронная обработка материалов. 2003. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/polyarizatsionnoe-vzaimodeystvie-dvuh-blizko-raspolozhennyh-provodyaschih-sharov-v-odnorodnom-elektrostaticheskom-pole> (дата обращения: 15.04.2022).
4. Щерба Е. А., Григорьев А. И., Коромыслов В. А. О взаимодействии двух заряженных проводящих шаров при малых расстояниях между ними // Журнал технической физики. 2002. Т. 72, вып. 1. С. 15–19.
5. Саранин В. А., Майер В. В. Теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия двух проводящих заряженных шаров // УФН. 2010. № 180 (10). 1109–1117. DOI: 10.3367/UFN.0180.201010f.1109.
6. Lekner J. Electrostatics of two charged conducting spheres // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2012. Vol. 468 (2145). P. 2829–2848. DOI: 10.1098/rspa.2012.0133.
7. Davis M. H. Two charged spherical conductors in a uniform electric field: forces and field strength // Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. 1964. Vol. 17. P. 499–511. DOI: 10.1093/QJMAM/17.4.499.
8. Grashchenkov S. I. On the force of electrostatic interaction between two conducting spheres // Technical Physics. 2011. Vol. 56 (7). P. 914–918. DOI: 10.1134/S1063784211070115.
9. Saranin V. A. Energy, force and field strength in a system of two charged conducting balls // Journal of Electrostatics. 2013. Vol. 71 (4). P. 746–753. DOI: 10.1016/j.jelstat.2013.05.003.
10. Тамм И. Е. Основы теории электричества. Изд. 9-е, испр. Москва: Физматлит, 2003. 616 с. ISBN 978-5-9221-0313-8.

ГОРБУНКОВ Владимир Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2858-6763
AuthorID (РИНЦ): 601948
ORCID: 0000-0002-5495-5641
AuthorID (SCOPUS): 36954424000
ResearcherID: Q-5370-2016

ХОЛМОВ Михаил Александрович, студент гр. ЭЭМ-213 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2561-3270
AuthorID (РИНЦ): 1087396

Адрес для переписки: misha97h@gmail.com

ИУКИНА Анастасия Васильевна, студентка гр. ЭЭМ-213 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ, г. Омск.

КСЕНДЗОВ Игорь Владимирович, студент гр. ЭЭМ-213 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: zonaksendzova@mail.ru
ЖИГАДЛО Владислав Александрович, студент гр. ЭЭМ-213 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ, г. Омск.

Для цитирования

Горбунков В. И., Холмов М. А., Иукина А. В., Ксендзов И. В., Жигадро В. А. Динамическое воздействие электрического заряда на проводник // Омский научный вестник. 2022. № 3 (183). С. 80–84. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-80-84.

Статья поступила в редакцию 11.04.2022 г.

© В. И. Горбунков, М. А. Холмов, А. В. Иукина,
И. В. Ксендзов, В. А. Жигадро