



УДК537. 08. 001

С. В. Браун

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

В. А. Быстров

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Л. П. Козлова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Связь электротехнических и геометрических параметров

Предложен приближенный способ определения электрической емкости соленоида, удобный для практических расчетов. Способ получен в результате сопоставления рассмотренных аналитических решений аналогичных технических задач и основан на использовании двух крайних предельно возможных значений исследуемой величины.

Электрическая емкость, соленоид, провод, круговой виток, среднее значение, погрешность

В природе и обществе все взаимосвязано и взаимообусловлено.

Г. Гегель

Данная статья посвящена исследованию вопроса, необычного для традиционной электротехники. Предлагается рассмотрение способа оценки электрической емкости соленоида (катушки индуктивности). Ранее достаточно подробно в специальной литературе рассматривались и обсуждались только активные сопротивления и индуктивности соленоидов [1], [2].

Тысячелетнее развитие науки и научных исследований выработало методологические подходы и приемы, существенно упрощающие проведение исследований различных явлений природы и общества. Эти приемы стали классическими.

Основоположники классической философии обоснованно доказали, что абсолютная истина недостижима из-за действия бесконечного числа связей, но в процессе последовательного проведения корректных исследований к ней можно последовательно приближаться.

В этих условиях при проведении конкретного научного исследования исследователи обычно сужают рассматриваемую область исследований, четко ограничивая рассматриваемый диапазон изменения основных определяющих параметров.

Такой подход существенно упрощает решение задачи, дает возможность исключать из рассмотрения некоторые параметры.

Так, в классической электротехнике при ограничении рассматриваемого частотного диапазона является привлекательная возможность узкой идентификации основных электротехнических элементов анализируемых электротехнических цепей, которые рассматриваются только как сопротивления:

- активное;
- индуктивное;
- емкостное.

Такое упрощение значительно облегчает рассмотрение предмета исследования в рамках действия принятых ограничений. Подобные естественные упрощения известны давно, описаны в десятках различных учебников, широко применяются при решении большинства практических задач [1], [3]–[5].

Однако при более тщательном рассмотрении задач в расширенном диапазоне частот указанное широко распространенное упрощение становится некорректным.

В рамках данной статьи рассматривается лишь один конкретный частный случай анализа электротехнического элемента. Этот элемент – соленоид.

Ранее достаточно подробно исследовались методы определения индуктивного и активного сопротивлений данного электротехнического элемента и даже возможности их взаимосвязи [5].

Однако наличие электрической емкости у подлежащего рассмотрению соленоида обычно не принимается во внимание. Одной из причин этого служит отсутствие каких-либо методов расчетной оценки указанной величины.

Представляется целесообразным попытаться устранить или ослабить влияние этого сложившегося пробела.

Необходимость расчета электрической емкости возникает при проектировании и наладке различных электротехнических и радиотехнических устройств и целого ряда других задач, с которыми приходится встречаться инженерам-электротехникам в повседневной деятельности.

Между зарядами и потенциалами любых проводников существует взаимно однозначная линейная связь, для выражения которой вводится понятие электрической емкости.

Электрическая емкость является характеристикой любого проводника и представляет собой количественную меру его способности удерживать электрические заряды [6]. В электростатическом поле все точки поверхности проводника имеют один и тот же потенциал U , который пропорционален заряду q проводника [7]. Электрическая емкость уединенного проводящего тела равна отношению заряда к потенциалу:

$$C = \frac{q}{U},$$

где C – электрическая емкость.

Электрическая емкость определяется только формой и геометрическими размерами проводника, а также электрическими свойствами окружающей среды и не зависит от материала проводника.

В действующей системе измерения (СИ) электрическая емкость измеряется в фарадах. Для нее справедливо следующее соотношение:

$$1 \text{ Ф} = 9 \cdot 10^{11} \text{ см.}$$

Фарада в ряду единиц измерения физических величин представляется очень крупной величиной. Обычно ее практическое использование связано одновременно с применением уменьшающих десятичных кратных и дольных значений: пико-

(10^{-12} пФ), нано- (10^{-9} нФ), микро- (10^{-6} мкФ), милли- (10^{-3} мФ).

Для подтверждения этого обстоятельства оценим электрическую емкость планеты Земля. Она расположена в части пространства, которую можно считать вакуумом, имеет форму, близкую к сферической, при этом средний радиус планеты

$$R = 6371 \text{ км.}$$

Электрическая емкость в СГСЕ составит:

$$C = 0.64 \cdot 10^9 \text{ см,}$$

в СИ:

$$C = 0.71 \approx 1 \text{ мФ.}$$

Полученная величина может служить ориентиром емкости естественного происхождения.

Следует отметить, что емкости современных искусственно созданных промышленных конденсаторов более чем на два порядка превышают указанное значение [8].

При решении прикладных практических задач широко используются упрощенные приближенные методы определения величины электрической емкости с учетом конкретных условий решаемой задачи [9].

Ввиду того, что получить точное значение электрической емкости соленоидальной обмотки достаточно сложно, представляется целесообразным на начальной стадии рассмотреть приближенные оценки данной величины.

Подобное рассмотрение может быть начато с формирования оценки двух крайних предельно возможных значений исследуемой величины. Одно такое значение (максимальное) достигается при предельном уменьшении диаметра витков, образующих соленоид, и сохранении длины провода, образующего соленоид (растягивании соленоида в прямой провод).

Ранее была получена достаточно точная приближенная формула (возможная погрешность не превышает 2 %) для определения электрической емкости C_1 прямолинейного провода конечной длины в следующем виде [7], [9]:

$$\begin{aligned} C_1 &= 2\pi\epsilon l \left[\ln \frac{2l}{a} - 1 \right]^{-1} = 2\pi\epsilon l \left[\ln \frac{2l}{a} - \ln e \right]^{-1} = \\ &= 2\pi\epsilon l \left[\ln \frac{2l}{ae} \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость; l – длина провода; a – радиус провода; $e = 2.72$ – основание натуральных логарифмов.

Известна также достаточно точная формула для определения C_2 электрической емкости провода, используемого в форме плоского кругового кольца сравнительно малого диаметра $\left(\frac{R}{a} < 5\right)$. Эта величина может быть принята в качестве второго экстремального значения соленоида – минимального:

$$C_2 = 4\pi^2 \varepsilon R \left[\ln \frac{8R}{a} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где $R = \frac{1}{2\pi}$ – радиус кругового кольца, образованного проводом длиной l .

Подставив в (1) длину провода $l = 2\pi R$, получим удобную для сравнения формулу в следующем виде:

$$C_1 = 4\pi^2 \varepsilon R \left[\ln \frac{4\pi R}{ae} \right]^{-1}. \quad (3)$$

Сравнение (2) и (3) позволяет установить незначительность их различия:

– множители, стоящие перед знаком логарифма, совпадают полностью;

– аргументы, стоящие под знаком логарифма, различаются лишь постоянным множителем, для кругового кольца (2) аргумент больше на величину

$$\frac{2e}{\pi} = 1.73.$$

Следовательно, в этом случае знаменатель больше, а сама величина меньше.

Логарифмическая функция нелинейная, поэтому линейное изменение аргумента не приводит к линейному изменению значений самой функции.

Используя одно из основных свойств логарифмической функции (логарифм произведения), можно утверждать, что при сравнении двух рассматриваемых крайних случаев в знаменателе дроби, определяющей электрическую емкость плоского кругового кольца, фигурирует постоянное слагаемое

$$\ln 1.73 = 0.54.$$

Это подтверждает, что знаменатель в этом случае всегда больше, а значение емкости кругового кольца – всегда меньше.

Представленный анализ позволяет утверждать, что значение электрической емкости реального соленоида будет находиться внутри диапазона, ограниченного двумя рассмотренными крайними значениями.

Следует отметить, что для больших значений отношения длины провода к его диаметру ($l \geq 100a$) рассматриваемые крайние значения сближаются и представляют собой величины одного порядка.

В сложившейся ситуации, если при оценке значения электрической емкости реального соленоида в качестве искомого значения может быть принята средняя арифметическая величина из двух рассмотренных крайних случаев, при этом по проведенным оценкам погрешность полученного таким образом приближенного значения не превысит 10 %. При решении многих практических задач такой уровень погрешности может быть признан достаточным.

Небольшое повышение точности в случае использования логарифмических функций достигается при применении среднего гармонического значения [10]. В рассматриваемом случае расчетная формула для определения электрической емкости соленоида C_3 может быть представлена в следующем виде:

$$C_3 = 2C_1 C_2 (C_1 + C_2)^{-1}.$$

Именно эту формулу представляется целесообразным рекомендовать для выполнения практических расчетов.

Учет выполненной оценки может позволить более обоснованно подходить к анализу электрических цепей в рассматриваемых диапазонах частот. Однако следует учитывать то, что приведенные оценки – приблизительные, и для получения более точных значений необходимо использовать экспериментальные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амалицкий М. В. Основы радиотехники. М.: Связьиздат, 1959. 616 с.
2. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
3. Асеев Б. П. Колебательные цепи. М.: Связьиздат, 1955. 463 с.
4. Иродов И. Е. Основные законы электромагнетизма. М.: Высш. шк., 1983. 59 с.
5. Китаев В. Е. Электротехника с основами промышленной электроники. М.: Высш. шк., 1985. 254 с.
6. Калашников С. Г. Электричество. М.: Физматлит, 2003. 624 с.

7. Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. Л.: Энергоиздат, 1981. 288 с.
8. Фортов В. Е. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока. М.: Наука, 2002. 399 с.

9. Русин Ю. С. Метод приближенного расчета электрической емкости // Электричество. 1960. № 11. С. 48.
10. Адамов В. Е., Бакланов Г. И., Устинов А. И. Статистика промышленности. М.: Наука, 1976. 439 с.

S. V. Braun
Saint Petersburg State Marine Technical University

V. A. Bystrov
Krylov of State Research Centermail

L. P. Kozlova
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

CONNECTION BETWEEN ELECTRICAL AND GEOMETRICAL PARAMETERS

Approximate method of definition of solenoid capacity convenient for practical calculations is proposed [n the paper. This method is reseved as a result of comparison of examined analytical solutions of similar technical problems. Necessity of calculation of capacity appears under different and wireless device manufacturing. Practical character of ordinary problems does not demand high accuracy of result. Approximate method of definition of solenoid capacity is proposed.

Electric capacity, solenoid, wire, circular winding, mean value, error

УДК 621.313

М. А. Ваганов, А. А. Гарчук
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Магнитная индукция в воздушном зазоре вентильного двигателя

Составлено выражение для магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя с возбуждением от постоянных радиально намагниченных магнитов прямоугольного сечения, которое может быть использовано при анализе поперечной геометрии вентильного двигателя с целью определения как оптимального значения диаметра расточки статора, так и определения оптимального значения магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя.

Постоянные магниты, кривая размагничивания, остаточная индукция и коэрцитивная сила, магнитная индукция в воздушном зазоре, ширина и высота постоянного магнита, коэффициент полюсного перекрытия

Вентильный двигатель представляет собой функциональное объединение двух преобразователей: электромеханического и полупроводникового, управляемого с помощью датчика положения ротора. Такая система, состоящая из неоднородных по своему принципу действия блоков, оказывается, тем не менее, достаточно надежной в сравнении с коллекторным двигателем постоянного тока практически при тех же потребительских свойствах.

В настоящее время в вентильных двигателях в качестве источника магнитного поля возбуждения используются главным образом постоянные магниты, имеющие в ряде случаев достаточно сложную химическую и физическую структуру [1]. Материалы, из которых изготавливаются постоянные магниты, характеризуются, в первую очередь, тремя физическими величинами: остаточная магнитная индукция B_r , определяющая началь-