

**О НЕКОТОРЫХ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИХ ПОНЯТИЯХ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ,
СОДЕРЖАЩИХСЯ В СТАТЬЕ В.В. СОТНИКОВА
(«Технічна електродинаміка». 2017. № 3. С. 22–28)**

Ю.М. Васецкий, докт. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,
e-mail: yuriy.vasetsky@gmail.com

В статье в связи с различными терминологическими определениями в литературе рассматриваются понятия «разность потенциалов», «напряжение», «падение напряжения». Проанализированы два подхода к определению понятия «напряжение»: как разность потенциалов и как работа сил электрического поля по перемещению единичного заряда. Отмечены ошибочные и необоснованные положения в статье В.В. Сотникова. Библ. 10.

Ключевые слова: электрическое поле, разность потенциалов, напряжение, падение напряжения, определение.

Содержание статьи В.В. Сотникова [6] можно разделить на две различные по содержанию и обоснованности части. Первая относится к используемым в литературе и нормативных документах таких понятий как «разность потенциалов», «напряжение», «падение напряжения». Вторая часть связана с интерпретацией автором физических процессов в электростатических и стационарных электрических полях, а также обоснованием на основе такой интерпретации авторского определения указанных понятий.

На наш взгляд, автор справедливо обращает внимание на различное определение в литературе понятия «напряжение».

Прежде чем обсуждать это понятие и его определение в работе В.В. Сотникова, отметим, что близкое к нему понятие «разность потенциалов» обычно трактуется одинаково и относится исключительно к потенциальному полю \mathbf{P} , которое удовлетворяет условию $\operatorname{rot} \mathbf{P} = 0$. Приведем некоторые тривиальные положения, которые, тем не менее, поясняют возникновение различий в определениях.

В качестве потенциального обычно указывается напряженность электрического поля \mathbf{E} в электростатике, электрическое поле при протекании стационарного тока в электропроводной среде, переменное квазистатическое поле [3]. Потенциальным можно считать и индуцированное электрическое поле в односвязных областях, создаваемое переменным магнитным потоком, который не распространяется на область определения электрического поля. Для потенциальных полей работа сил

поля по перемещению единичного заряда $W_{12} = \int_1^2 \mathbf{E} d\mathbf{l}$ не зависит от пути интегрирования и поэтому

определяется как разность потенциалов $W_{12} = \varphi_2 - \varphi_1$ ($\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi$).

Напряженность электрического поля \mathbf{E} как основная (измеряемая) силовая характеристика не обязательно совпадает с \mathbf{P} . Так, если в точках пространства присутствует изменяющееся во времени магнитное поле или существуют сторонние, не электромагнитной природы источники поля, то напряженность электрического поля, которое включает все факторы силового действия на заряды, не обязательно удовлетворяет условию потенциальности, т.е. $\operatorname{rot} \mathbf{E} \neq 0$ и поэтому нельзя, как прежде, ввести потенциал. Вместе с тем работа сил поля над единичным зарядом при его перемещении из одной точки в другую, которая без сомнения имеет физическое содержание, может быть определена

$W_{12}(l) = \int_1^2 \mathbf{E} d\mathbf{l}$. Для непотенциального поля величина работы сил поля зависит от пути l и не может

быть представлена как разность потенциалов.

Представляется, что причиной использования авторами разных определений понятия «напряжение» является различный смысл, вкладываемый в это понятие, используя исходную позицию как контурный интеграл от напряженности электрического поля.

В первом случае это понятие относится к потенциальному полю и подразумевается как разность потенциалов такого поля. Наиболее последовательно указанного подхода придерживается известный представитель «московской школы» К.М. Поливанов. Показательными в этом отношении являются его пояснения к изначальным положениям теории электрических цепей, которые содержат, в том числе, индуктивные элементы и источники ЭДС. Об электрических цепях говорят, когда можно отчетливо выделить элементы (ветви) с определенным током, а напряжение на элементе можно определить как разность потенциалов (потенциального поля во всех точках, за исключением, быть может, внутренности элемента) между его концами [4]. Комментируя в примечании учебника [10] понятие „напряжение источника“, К.М. Поливанов прямо указывает, что «...оно употребляется только в смысле интеграла от напряженности поля по линии, соединяющей его полюсы и лежащей целиком в области, где отсутствует сторонняя напряженность поля (интеграл по внешнему пути). Эта величина измеряется вольтметром, включенным между полюсами источника». Из рассмотрения элементов электрической цепи как определенных замкнутых элементов, которые имеют только «вход» и «выход», естественно вытекают и основные положения теории цепей, в частности второй закон Кирхгофа.

Во втором подходе понятие «напряжение» обычно относят к контурному интегралу между двумя точками от общей напряженности электрического поля, которое может иметь не только потенциальную составляющую. Среди электротехников той же «московской школы» в теории электрических цепей используется и второй подход к понятию «напряжение». Так, авторы учебника [2] в обоснование затруднений при измерении напряжения в цепях с распределенными параметрами как разности потенциалов приводят пример различных измеряемых значений в зависимости от конфигурации соединяющих вольтметр проводников. Более того, К.М. Поливанов при рассмотрении непотенциальных полей приводит многочисленные примеры того, что показания прибора по измерению напряжения зависят от расположения проводников, идущих к вольтметру [3, с. 62-65]. Отсюда следует, что показания вольтметра сами по себе не могут служить достаточным основанием для принятия решения об определении понятия «напряжение».

В качестве еще одного аргумента в пользу использования указанного второго подхода можно указать особенности в определении потенциалов в теории электромагнитного поля. Как известно, потенциалы в классической макроскопической электродинамике не являются основными величинами и вводятся таким образом, чтобы неизменными остались основные векторы поля – напряженность электрического и индукция магнитного полей $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$; $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi - \partial \mathbf{A} / \partial t$. При этом разделение между потенциальной $\mathbf{E}_p = -\text{grad } \varphi$ и непотенциальной $\mathbf{E}_A = -\partial \mathbf{A} / \partial t$ составляющими напряженности электрического поля неоднозначно. Необходимы еще дополнительные условия, в том числе калибровки – уравнение для источников векторного потенциала $\text{div } \mathbf{A}$, в зависимости от которого меняется распределение между отдельными слагаемыми вектора напряженности электрического поля. Из этих соображений следует, что разность потенциалов между двумя точками также является неоднозначной характеристикой поля. На указанные здесь трудности в разделении поля на потенциальную и непотенциальную составляющие обращает внимание и К.М. Поливанов, несмотря на его приверженность к первому подходу в определении понятия «напряжение» [3].

Можно договориться о конкретном выборе условия калибровки и, тем самым, при определенных дополнительных условиях однозначно определить потенциальную составляющую, однако такой способ носит признаки искусственности. Например, при калибровке Кулона $\text{div } \mathbf{A} = 0$ векторный потенциал, а значит и составляющая электрического поля $\mathbf{E}_A = -\partial \mathbf{A} / \partial t$ определяются однозначно при условии, что учитываются токи во всем бесконечном пространстве и отсутствует поле в бесконечно удаленных точках [7]. Отсюда следует, что при выполнении указанных условий однозначной будет и потенциальная составляющая, которая при такой калибровке определяется полем всех зарядов [9].

Выбор калибровочного условия еще недостаточен для однозначного разделения поля на потенциальную и непотенциальную составляющие. Дополнительное калибровочное условие называется градиентным преобразованием второго рода [9]. В этом отношении наглядный пример приведен в [5]. Два распределения векторного потенциала, удовлетворяющие условию $\text{div } \mathbf{A} = 0$ и $\text{rot } \mathbf{A} = B_z \mathbf{e}_z$:

$\mathbf{A}_1 = -B_z y \mathbf{e}_x$ – в декартовых координатах и $\mathbf{A}_2 = B_z \frac{\rho}{2} \mathbf{e}_\alpha$ – в цилиндрических, очевидно, отличаются один от другого на величину, которую можно представить как градиент скалярной функции (в нашем

случае связанную с градиентом скалярного потенциала): $\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2 = \text{grad}\psi$. Здесь электрические заряды отсутствуют, но векторный потенциал не затухает на бесконечности.

Как следует из представленных соображений, имеются аргументы как в пользу, так и против представленных подходов при выборе определения понятия «напряжение». На наш взгляд, вопрос имеет не столько принципиальное физическое содержание (авторы, которые пользуются разными понятиями, конечно, не ошибаются в описании электромагнитных явлений), а скорее – терминологический смысл. В этом отношении вопрос требует обсуждения, прежде чем отдать предпочтение какому-либо конкретному определению.

В.В. Сотников в своей статье однозначно отстаивает точку зрения определения «напряжения» как разности потенциалов. Игнорирование других аргументов суживает содержание статьи, но проблема в ней сформулирована вполне определенно.

Автор ограничивается только стационарными полями. Хотя основное содержание нашей работы не предполагает всестороннего анализа интерпретации автором электромагнитных процессов, тем не менее, считаем необходимым отметить некоторые положения статьи, обоснованность которых вызывает сомнение, в том числе такие.

1. Поле источника ЭДС (в статье «индуцированного электрического поля») записывается в виде разложения на потенциальную и соленоидальную составляющие $\mathbf{E}_n = \mathbf{E} + \mathbf{E}_n$. Утверждается, что напряженность поля потенциальной составляющей заканчивается на поверхности проводника, где сосредоточены заряды, создающие компенсирующее «кулоново» поле. Таким образом, в статье содержится положение, которое можно понять в том смысле, что стороннее поле источника распространяется за пределы ограниченного объема существования источника. В этом отношении необоснованным представляется и утверждение: «Физической причиной индуцирования поверхностных зарядов является действие первичного индуцированного электрического поля \mathbf{E}_n внутри проводника».

2. Утверждение автора о том, что в литературе влияние поверхностных зарядов в создании определенной структуры электрического поля проводников рассматривается обычно только при их нахождении во внешнем электрическом поле, не соответствует действительности, и заслуга автора в этом вопросе должна быть более аккуратно очерчена. О том, что этот вопрос рассматривали и другие авторы, свидетельствуют, например, материалы монографии О.В. Тозони [8], а также специальный раздел в монографии [1], где представлено общее решение задачи для заряженного проводника и найдены как поверхностная, так и усредненная линейная плотности распределенного заряда.

3. Утверждение, что в однородном проводнике электрические заряды сосредоточены только на поверхности, справедливо вне источника. В области источника возможно и наличие объемно распределенных зарядов. Если напряженность поля сторонних источников изменяется вдоль проводника (такое изменение обязательно существует из-за ограниченности размеров источника), то такая неоднородность их распределения является причиной существования зарядов во внутреннем объеме проводника. На наш взгляд, нельзя объяснить распределение поля внутри источника без наличия таких зарядов.

Мы не затрагиваем понятие «падение напряжения», которое, по мнению автора статьи, необходимо увязывать с диссипативными процессами в цепи постоянного тока. Вопрос о том, насколько целесообразно рассматривать данное понятие в связи с представлением о скорости преобразовании потенциальной энергии зарядов на концах элемента электрической цепи в другие ее виды внутри элемента, требует специального анализа как с точки зрения протекающих физических процессов, так и традиции использования соответствующей терминологии.

В целом, оценивая содержание статьи В.В. Сотникова, отметим обоснованность поднятого вопроса о терминологических несогласованностях в литературе и нормативных документах ряда электротехнических понятий. Вместе с тем подача автором собственного видения явлений далеко не всегда основывается на установленных общеизвестных положениях и содержит сомнительные утверждения.

1. Васецкий Ю.М. Асимптотические методы решения задач электродинамики в системах с массивными криволинейными проводниками. К.: Наукова думка, 2010. 271 с.

2. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1975. 752 с.

3. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Ч. 3. Теория электромагнитного поля. М.: Энергия, 1969. 352 с.
4. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи с сосредоточенными параметрами. М.-Л.: Энергия, 1965. 360 с.
5. Савельев И.В. Основы теоретической физики. Т. 1. Механика и электродинамика. М.: Наука, 1991. 496 с.
6. Сотников В.В. Физическая сущность стационарного электрического поля и терминологическое определение связанных с ним величин. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 3. С. 22–28.
7. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: ГИТТЛ, 1956. 620 с.
8. Тозони О.В. Метод вторичных источников в электротехнике. М.: Энергия, 1975. 296 с.
9. Федорченко А.М. Теоретическая физика. Классическая электродинамика. К.: Вища школа, 1988. 280 с.
10. Шимони К. Теоретическая электротехника. М.: Мир, 1964. 775 с.

УДК 621.3.011

ПРО ДЕЯКІ ТЕРМІНОЛОГІЧНІ ПОНЯТТЯ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ, ЩО МІСТЯТЬСЯ У СТАТТІ В.В. СОТНІКОВА ("Технічна електродинаміка". 2017. № 3. С. 22-28)

Ю.М. Васецький, докт.техн.наук

**Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,**

e-mail: yuriy.vasetsky@gmail.com

У статті у зв'язку з різними термінологічними визначеннями у літературі розглядаються поняття "різниця потенціалів", "напруга", "падіння напруги". Проаналізовано два підходи до визначення поняття "напруга": як різниця потенціалів та як робота сил електричного поля по переміщенню одиничного заряду. Відзначено помилкові та необґрунтовані положення у статті В.В. Сотнікова. Бібл. 10.

Ключові слова: електричне поле, різниця потенціалів, напруга, падіння напруги, визначення.

ON SOME CONCEPTS IN ELECTRICAL ENGINEERING CONTAINED IN PAPER BY V.V. SOTNIKOV ("Tekhnichna Elektrodynamika". 2017. No 3. Pp. 22–28)

Yu.M. Vasetsky

**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,**

e-mail: yuriy.vasetsky@gmail.com

In this paper, in connection with various definitions in the literature, the concepts of "potential", "voltage", "voltage drop" are considered. Two approaches to the definition of the concept of "voltage" are analyzed: as the potential and as the work of the electric field forces on the displacement of a unit charge. Wrong and unreasonable positions in the paper by V.V. Sotnikov were noted. References 10.

Key words: electrical field, potential, voltage, voltage drop, definition.

1. Vasetsky Yu.M. Asymptotic methods for solving electrodynamics problems in systems with bulky curvilinear conductors. Kyiv: Naukova dumka, 2010. 271 p. (Rus)
2. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. Bases of the theory of electrical circuits. Moskva: Energiia, 1975. 752 p. (Rus)
3. Polivanov K.M. Theoretical bases of electrical engineers. Vol. 3. The theory of electromagnetic field. Moskva: Energiia, 1969. 352 p. (Rus)
4. Polivanov K.M. Theoretical bases of electrical engineers. Vol. 1. Linear electrical circuits with lumped parameters. Moskva-Leningrad: Energiia, 1965. 360 p. (Rus)
5. Savelev I.V. Fundamentals of theoretical physics. Vol. 1. Mechanics and Elektrodynamiks. Moskva: Nauka, 1991. 496 p. (Rus)
6. Sotnikov V.V. Physical nature of stationary electric field and terminological definition of related quantities. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 3. Pp. 22–28. (Rus)
7. Tamm I.E. Bases of the theory of electricity. Moskva: GITTL, 1956. 620 p. (Rus)
8. Tozoni O.V. Method of secondary sources in the electrical engineer. Moskva: Energiia, 1975. 296 p. (Rus)
9. Fedorchenko A.M. The theoretical physics. Classical electrodynamics. Kyiv: Vyshcha shkola, 1988. 280 p. (Rus)
10. Shimoni K. Theoretical electrical engineer. Moskva: Mir, 1964. 775 p. (Rus)

Надійшла 23.08.2017