

ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ СТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЯЗАННЫХ С НИМ ВЕЛИЧИН

Сотников В.В. докт.техн.наук
Юго-Западный государственный университет,
ул. 50 лет Октября, 94, Курск, 305040, Россия.
E-mail: VV_Sotnikov@mail.ru

Рассмотрено стационарное электрическое поле во внутреннем объеме проводников электрической цепи. Показано, что оно создается не постоянными во времени токами, а зарядами, распределенными преимущественно по поверхности проводников. Произведен критический разбор терминов: напряжение и падение напряжения. Показана некорректность их определения в международном электротехническом словаре и ГОСТах. Даны научно обоснованные определения. Библ. 11, рис. 2.

Ключевые слова: стационарное электрическое поле, напряжение, падение напряжения, термин, определение.

Научно обоснованное терминологическое определение электрических величин имеет большое мировоззренческое и дидактическое значение, способствует решению различных задач в области электротехники. В физической литературе и руководствах по электродинамике [3, 8, 10], учебной [9] и нормативно-технической [4, 11] литературе толкования терминов «стационарное электрическое поле», «напряжение» и «падение напряжения» весьма различаются. Это создает определенное неудобство даже при их употреблении в научных работах, так как приходится уточнять, что имеется в виду.

Произведем критический разбор определений указанных величин с позиции макроскопической электродинамики. Для конкретности будем иметь в виду стационарный режим, хотя полученные результаты применимы и в квазистационарном случае.

В электростатике [8] понятие «напряжение» обычно вводится как разность потенциалов U_{12} кулонова поля E_v между рассматриваемыми точками пространства

$$U_{12} = \int_1^2 E_v d\mathbf{l}, \quad (1)$$

где $d\mathbf{l}$ — бесконечно малый векторный элемент пути.

Это поле является безвихревым ($\text{rot}E_v=0$), и напряжение не зависит от выбора пути интегрирования между рассматриваемыми точками. Согласно интерпретации второго закона Кирхгофа в ряде пособий по теории цепей [5, 9] сумма напряжений по замкнутому контуру равна нулю. В этой интерпретации напряжение характеризует потенциальное поле E_n , для которого $\oint E_n d\mathbf{l} = 0$.

В то же время согласно словарю [11] международной электротехнической комиссии (МЭК) электрическое напряжение – скалярная величина, равная линейному интегралу напряженности электрического поля вдоль рассматриваемого пути

$$U_{12} = \int_1^2 E d\mathbf{l}, \quad (2)$$

где E – напряжённость эффективного электрического поля, включающего поля различного происхождения: кулонова, стороннего и индукционного.

Это определение вошло в национальные стандарты, по-видимому, большинства стран, членом МЭК и присутствует во многих учебниках, например, в [9, 10]. Оно противоречит приведенному выше изложению второго закона Кирхгофа, поскольку $\oint E d\mathbf{l} \neq 0$. В общем случае напряжение по определению (2) может быть вычислено и для непотенциального электрического поля.

Напряжение, определяемое выражением (2), неоднозначно, так как результирующее электрическое поле E в общем случае непотенциально. Количественно оно соответствует падению напряжения. По-видимому, вследствие этого термин «падение напряжения» (voltage drop, tension drop) в словаре МЭК [11] отсутствует. В частном случае, когда путь между рассматриваемыми точками про-

ходит вне источников ЭДС, в частности, через диэлектрическую среду, падение напряжения численно равно разности потенциалов между этими точками.

Количественно эквивалентным (1) выражением (но иным) в словаре МЭК [11] определяется разность потенциалов (термин 121-11-26). Таким образом, согласно этому документу «напряжение» и «разность потенциалов» – различающиеся понятия, совпадающие только в случае безвихревого поля.

По видимому, определение (2) возникло как измененный термин из «Трактата» Д. Максвелла [3, часть I «Электростатика», п. 45], где аналогичная по смыслу величина названа «полной электродвижущей силой». В электростатическом случае, когда точка «2» принимается за начало отсчета для всех других точек, то «полная электродвижущая сила» является «потенциалом» точки «1». Таким образом, если считать, что напряжение – это разность потенциалов кулонова поля соответствующих точек цепи, то определение (1) полностью соответствует «Трактату».

Представляется целесообразным, чтобы терминологическое определение рассматриваемых электрических величин однозначно отражало их физическую сущность.

В общем случае источниками электрического поля могут быть заряды, электромагнитная индукция и сторонние силы электрохимического, контактного и иного происхождения. Понятие «стационарное» обычно означает неизменность процесса во времени, а применительно к полю указывает также на причинную связь с источниками [8], так как протекание тока требует компенсации затрат энергии. Поле электромагнитной индукции и сторонних сил обычно не относят к «стационарному».

В действующих ГОСТ и в проекте межгосударственного стандарта [4] стационарное электрическое поле определяется как «электрическое поле не изменяющихся во времени электрических токов при условии неподвижности проводников с электрическими токами». Это определение представляется неправильным, так как токи, сами по себе, никакого электрического поля создавать не могут. Неподвижность проводников принципиального значения не имеет. Стационарным является, например, электрическое поле (не индуцированное непосредственно магнитным полем) внутри токопроводящей части вращающегося якоря униполярной машины постоянного тока.

В терминологическом словаре МЭК [11] по электромагнетизму термин «стационарное электрическое поле» отсутствует, но ему соответствует приведенное там определение электростатического поля (термин 121-11-70) как электрического поля, изменением которого во времени можно пренебречь. По нашему мнению, источниками стационарного электрического поля являются электрические заряды, которые в общем случае могут быть распределены по всему объему электрической цепи. Других его источников не существует. В известном пособии [8] стационарное поле постоянных токов также понимается как поле зарядов, так как в §39 совершаемая им работа связывается с кулоновыми силами стационарного поля постоянных токов.

Ниже с целью упрощения (путем исключения неосновных факторов) мы не будем учитывать явления, не оказывающие влияния на силу тока, в частности, контактные ЭДС, которые по контуру цепи при одинаковой температуре проводников взаимно компенсируются.

Рассмотрим стационарное электрическое поле на примере неразветвленной электрической цепи, представляющей из себя однородный изотропный тонкий металлический проводник неизменного сечения (рис. 1). В однородном проводнике объемный электрический заряд существовать не может [8]. На участке 1-2-3 цепи действует индуцированное электрическое поле с напряженностью E_n (в частности, оно может возбуждаться за счет движения проводника в постоянном магнитном поле), которое в рассматриваемый промежуток времени неизменно во времени (стационарно). В такой идеализированной постановке напряженность E_n в точках 1 и 3 изменяется скачкообразно. Реально всегда имеется постепенный переход от одного значения E_n к другому на некотором участке. Для рассматриваемой проблемы принятая идеализация вполне допустима и не меняет физическую картину явлений.

Векторные величины, описывающие поля внутри проводника, можно считать направленными вдоль его оси. Когда это не влияет на строгость изложения, будем записывать их по тексту статьи в скалярной форме.

В руководствах по электродинамике индуцирование зарядов на поверхности однородных проводников обычно связывается только с внешним по отношению к ним источником электрического поля. В работах [6, 7] нами впервые показано, что указанные заряды, являющиеся основным источником стационарного электрического поля, индуцируются также индукционным путем и сторонними силами «изнутри» электрической цепи. «Разделение зарядов» (показаны на рис. 1 знаками «+» и «-») приводит к их сосредоточению не исключительно на полюсах источника, как обычно пишут в учеб-

никах, а к распределению по всей поверхности проводников, составляющих электрическую цепь тока. Это является физической причиной возникновения распределенной емкости в электрической цепи.

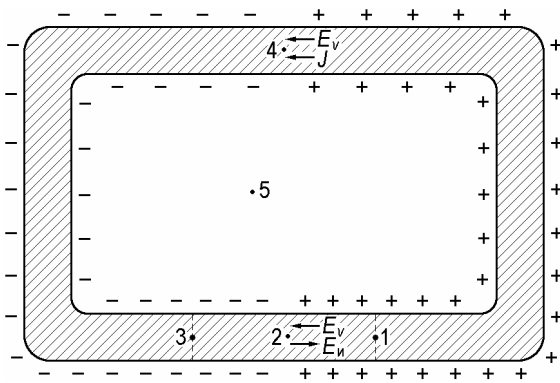


Рис. 1

Физической причиной индуцирования поверхностных зарядов является действие первичного индуцированного электрического поля E_i внутри проводника. Это поле вызывает в цепи ток с постоянной по длине проводника плотностью J (по условию сечение проводника неизменно). Поскольку индуцированное поле сосредоточено только на участке 1-2-3, его действие не уравнивается сопротивлением среды: $E_i \neq \rho J$ (ρ – удельное сопротивление металла, из которого выполнен проводник). Это создает тенденцию к накоплению зарядов в направлении действия E_i и к недостатку – с обратной стороны участка 1-2-3, приводящее в результате к его распределению по поверхности.

Изложенной выше физической сущности можно дать соответствующее математическое обоснование.

Индуцированное на участке 1-2-3 электрическое поле можно разложить во внутреннем объеме проводников цепи на составляющие

$$E_i = E + E_n, \quad (3)$$

где E – соленоидальная составляющая, циркуляция которой вдоль линий тока равна ЭДС \mathcal{E} , E_n – потенциальная составляющая индуцированного электрического поля.

Выражение (3) аналогично теореме разложения Гельмгольца [2]. Для рассматриваемого примера результат разложения показан на рис. 2 (распределение напряженностей электрического поля по контуру тока во внутреннем объеме проводников цепи: E , E_n – составляющие математического разложения; E_i , E_v – индуцированная и кулонова составляющие) в виде графиков зависимостей продольных (направленных вдоль замкнутой линии, соединяющей точки 4-3-2-1-4) компонент напряженностей.

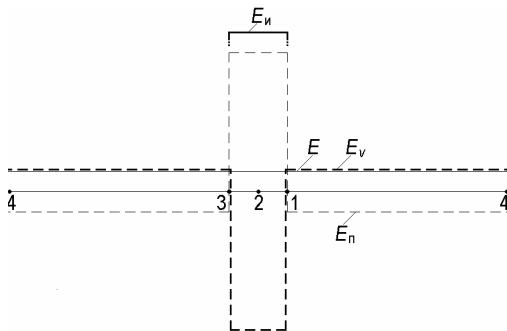


Рис. 2

Линии поля потенциальной составляющей E_n заканчиваются на поверхности проводников цепи. Выполнение граничных условий требует соответствующего распределения по поверхности его источников (зарядов). При переходном процессе после возникновения индуцированного поля его потенциальная часть вызывает движение реальных зарядов к поверхности до тех пор, пока создаваемое реальными зарядами кулоново поле не уравнивает потенциальную составляющую ($E_v = -E_n$).

Наличие потенциальной составляющей ($E_n \neq 0$) в разложении индуцированного поля по объему рассматриваемой цепи в виде однородного проводника является, таким образом, математическим условием индуцирования поверхностных зарядов и возникновения кулонова поля.

При этом внешнее поле зарядов одной части поверхности проводника пересекает другую ее часть, приводя к дополнительному индуцированию зарядов на поверхности уже за счет электростатической индукции. Суммарный заряд всей поверхности проводника равен нулю.

Физически результирующая напряженность электрического поля E внутри проводников цепи создается совокупным действием индуцированного поля E_i (или сторонних сил) и кулонова поля E_v ,

$$E = E_i + E_v. \quad (4)$$

Аналогично (4) результирующая напряженность выражается в квазистационарном режиме, когда на участке цепи, в частности, в обмотке трансформатора, индуцированная напряженность E_i создается изменением во времени векторного потенциала A : $E = -\partial A / \partial t - \text{grad} V$.

Если векторный потенциал удовлетворяет условию $\text{div}\mathbf{A}=0$ (калибровка Кулона), которое справедливо для замкнутых токов, то, как указано в [1], вторая составляющая, выраженная через скалярный электрический потенциал V , обусловлена наличием электрических зарядов, то есть $\mathbf{E}_v = -\text{grad}V$.

Внутреннее кулоново поле E_v как потенциальное не может самостоятельно непрерывно вызывать ток в проводнике, но участвует в его поддержании на отдельных участках. На активном участке 1-2-3 это поле направлено противоположно индуцированному E_n (см. рис. 1 и рис. 2), ослабляя его токовозбуждающее действие, а на участке 1-4-3 оно одно поддерживает электрический ток. В любой точке сопротивление среды $\rho\mathbf{J}$ уравнивается действием результирующей напряженности электрического поля \mathbf{E} (за счет соответствующего распределения зарядов по поверхности проводника), что математически выражается законом Ома в дифференциальной форме

$$\rho\mathbf{J}=\mathbf{E}. \quad (5)$$

Таким образом, стационарное электрическое и электростатическое поле по происхождению аналогичны, так как их источниками и в режиме протекания тока, и в электростатическом режиме являются заряды. Заметим здесь, что в словаре МЭК [11] при определении термина 121-11-70 источника электростатического поля не указываются, и оно прямо не связывается с зарядами.

Электростатический режим можно рассматривать как частный случай стационарного при отсутствии тока. Например, если разорвать изображенную на рис. 1 электрическую цепь (в электротехнике это соответствует, так называемому, режиму холостого хода), то ток прекратится. Заряды перераспределятся по поверхности проводника таким образом, что в его внутреннем объеме результирующее электрическое поле \mathbf{E} станет равным нулю: на активном участке кулоново поле скомпенсирует индуцированное ($\mathbf{E}=\mathbf{E}_n+\mathbf{E}_v=0$), на пассивном установится $\mathbf{E}=\mathbf{E}_v=0$. Таким образом, внутри проводника в режиме холостого хода стационарное электрическое поле существует только на активном участке ($\mathbf{E}_v=-\mathbf{E}_n$). По сути режим холостого хода отличается от «классического» электростатического режима наличием в цепи ЭДС.

По нашему мнению, термином «напряжение» (или «разность потенциалов») должно характеризоваться действие стационарного (электростатического) поля между точками цепи или внешнего пространства. На основе изложенного выше применительно к цепи проводников ему можно дать следующее определение: напряжение U_{12} между произвольными точками 1 и 2 электрической цепи – это скалярная величина, равная линейному интегралу (1) напряженности \mathbf{E}_v поля электрических зарядов вдоль произвольного рассматриваемого пути.

В электрической цепи из проводников ток сопровождается диссипативными потерями, которые компенсируются за счет энергии первичных источников. В макроскопической электродинамике эти потери учитываются введением удельного сопротивления ρ , и, если путь 1-2 проходит через неразветвленный участок цепи, в соответствии с законом Ома (5) выражение (2) преобразуется к эквивалентному виду

$$U_{\rho 12} = \int_1^2 \rho\mathbf{J}d\mathbf{l} = RI, \quad (6)$$

где I – сила тока, R – сопротивление участка.

Падение напряжения $U_{\rho 12}$ на участке цепи логично определять этим выражением, так как оно прямо характеризует его физическую сущность.

В отличие от напряжения U_{12} (1), создаваемого действием потенциального электрического поля зарядов, падение напряжения $U_{\rho 12}$ (6) отражает действие диссипативных непотенциальных сил. Векторное поле $\rho\mathbf{J}$ как непотенциальное в определенном смысле является сторонним полем (неэлектростатическим), отражающим сопротивление проводящей среды току. Поэтому падение напряжения (6) на участке между произвольными точками 1 и 2 электрической цепи из проводников с распределенными параметрами – не напряжение, а имеющая такую же размерность скалярная величина, равная линейному интегралу векторного поля $\rho\mathbf{J}$ сопротивления среды току вдоль рассматриваемого пути. Падение напряжения на участке между точками электрической цепи с сосредоточенными параметрами – это произведение сопротивления участка на силу тока в нем.

Из выражений (1), (2), (6) с учетом (4) и (5) видно, что на пассивных участках цепи, где $\mathbf{E}_n=0$, напряжение численно равно падению напряжения, например, $U_{14}=U_{\rho 14}$. В связи с этим можно считать, что в рассматриваемом термине слово «падение» отражает сопутствующее уменьшение вдоль линий

тока скалярного электрического потенциала V на пассивных участках электрической цепи (рис. 1): $V_4 < V_1$. На активных участках напряжение (1) и падение напряжения (6) отличаются друг от друга по величине, например, $U_{12} \neq U_{\rho 12}$.

В сложной разветвленной электрической цепи путь 1-2 может проходить через различные неразветвленные участки цепи. При наличии активных участков напряжения, рассчитанные по выражению (2) по различным путям интегрирования, будут отличаться на разницу значений результирующих ЭДС по соответствующим путям.

Если некоторый неразветвленный участок (активный или пассивный) находится в режиме холостого хода (ток через него не протекает), то напряжение на нем, вычисленное в соответствии с (2) или (6) по пути, проходящему внутри проводников участка, равно нулю. Этот характерный режим наиболее выпукло отражает некорректность определения напряжения выражением (2).

Напряжение U_{12} , определяемое выражением (1), во всех рассмотренных случаях даст одинаковый результат, так как поле \mathbf{E}_v электрических зарядов потенциально.

Если допустить, что на рис. 1 по всей длине однородного проводника с неизменным сечением напряженность электрического поля E_n одинакова и направлена вдоль его оси, то по всей длине эта напряженность будет уравновешена сопротивлением среды ($E_n = \rho J$). В таком частном случае в соответствии с полученным в [5] критерием поверхностные заряды и создаваемое ими кулоново стационарное электрическое поле будут отсутствовать (этому соответствует $E_n = 0$ в разложении (3)). Как следствие, внутренний объем проводника станет квазиэквипотенциальным, и напряжение между любыми его точками в соответствии с (1) будет равно нулю. В то же время в соответствии с (2) оно будет равно ЭДС, индуцируемой между рассматриваемыми точками.

В обычном электростатическом режиме, когда заряды на поверхности проводника индуцированы внешним потенциальным электрическим полем, напряжения между любыми точками проводника тоже будут равны нулю вследствие эквипотенциальности. Но в этом случае она достигается иным путем: поля внешних источников и поверхностных зарядов внутри проводника взаимно компенсируются.

В проекте межгосударственного стандарта [4] давались более правильные определения понятий «напряжение» и «падение напряжения»: «Напряжение – скалярная алгебраическая величина, равная линейному интегралу алгебраической суммы напряженности электродвижущих сил и удельного падения напряжения на рассматриваемом отрезке пути электрического тока или диэлектрического потока, а также их плотности, однозначно связанная с их численными значениями». Из этого определения видно, что при вычислениях в электрической цепи из проводников в подынтегральное выражение следует подставлять $-\mathbf{E}_n + \rho \mathbf{J} = \mathbf{E}_v$ (см. выражения (4)-(5)), и оно даст тот же количественный результат, что и (1), в отличие от формулы (2) из словаря МЭК [11].

«Падение напряжения – напряжение на участке или элементе электрической или диэлектрической цепи, обусловленное прохождением через его сопротивление соответственно электрического тока или потока, равное линейному интегралу удельного падения напряжения, взятому вдоль рассматриваемого пути». Удельное падение напряжения определяется в [4] как напряжение на единице длины пути прохождения электрического тока или потока электрической индукции и связывается с электрическим сопротивлением току (потоку) или его плотности. То есть, применительно к току проводимости под ним понимается величина, аналогичная $\rho \mathbf{J}$ в настоящей статье.

В сравнении с предложенными в настоящей статье, определения, процитированные из проекта межгосударственного стандарта [4], имеют, по нашему мнению, недостатки. Первое не отражает физическую сущность напряжения. Второе определяет падение напряжения как напряжение, то есть, подразумевает их физическую сущность одинаковой.

Наука не должна принимать закрепленные в нормативных документах определения как наилучшие. Определение «напряжение», выраженное формулой (2), по нашему мнению, некорректно и неудобно для использования вследствие неоднозначности. Целесообразнее использовать два понятия: «напряжение» как разность потенциалов и «падение напряжения», определяемые, формулами (1) и (6), что соответствует существующей традиции. Именно в этом смысле известным ученым-электротехником К.М. Поливановым отредактирован §1 части III перевода курса теоретической электротехники К. Шимони [10].

Выводы.

«Стационарного электрического поля постоянных токов» (в прямом понимании смысла термина) не существует. С позиции макроскопической электродинамики этому полю и связанным с ним величинам можно дать следующие определения:

1. Стационарное электрическое поле во внутреннем объеме проводников цепи и во внешнем пространстве – это поле в режиме стационарного тока, создаваемое электрическими зарядами, которые индуцируются в цепи сторонними силами, путем электромагнитной индукции и электростатической индукции.

2. Напряжение U_{12} между произвольными точками 1 и 2 электрической цепи из проводников – это скалярная величина, равная линейному интегралу напряженности E_v поля электрических зарядов

вдоль рассматриваемого пути:
$$U_{12} = \int_1^2 E_v dl.$$

3. Падение напряжения $U_{\rho 12}$ между произвольными точками 1 и 2 во внутреннем объеме электрической цепи из проводников с распределенными параметрами – это скалярная величина, равная линейному интегралу векторного поля ρJ сопротивления среды току вдоль рассматриваемого

пути внутри проводников:
$$U_{\rho 12} = \int_1^2 \rho J dl.$$

Падение напряжения (на участке) между точками электрической цепи с сосредоточенными параметрами – это произведение сопротивления участка на силу тока в нем: $U_{\rho 12} = RI$.

1. *Васецкий Ю.М., Мазуренко И.Л., Дзюба К.К.* Асимптотический метод расчета импульсного электромагнитного поля с учетом индуцированных токов в электропроводном теле // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 5-7.

2. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. – М.: Наука, 1977. – 832 с.

3. *Максвелл Дж.К.* Трактат об электричестве и магнетизме. Т. I. – М.: Наука, 1989. – 416 с.

4. Межгосударственный стандарт (проект). Электротехника. Основные понятия. Термины и определения. Взамен ГОСТ 19880-74. – Минск, 2000.

5. *Поливанов К.М.* Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи с сосредоточенными постоянными. – М-Л.: Энергия, 1965. – 360 с.

6. *Сотников В.В.* Анализ условий возникновения и отсутствия кулонова электрического поля в возбуждаемых металлических телах // Известия РАН. Энергетика. – 2001. – № 1. – С. 120-127.

7. *Сотников В.В.* Источники кулонова поля в металлических проводниках и их влияние на электрический ток // Известия РАН. Энергетика. – 2002. – № 1. – С. 104-111.

8. *Гамм И.Е.* Основы теории электричества. – М.: Наука, 1976. – 616 с.

9. *Бойко В.С., Бойко В.В., Видолоб Ю.Ф.* Теоретичні основи електротехніки. – К.: Політехніка, 2004. – 272 с.

10. *Шимони К.* Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. – 774 с.

11. International standard IEC 60050-121: 1998. International Electrotechnical Vocabulary. Part 121: Electromagnetism.

ФІЗИЧНА СУТНІСТЬ СТАЦІОНАРНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ТА ТЕРМІНОЛОГІЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПОВ'ЯЗАНИХ ІЗ НИМ ВЕЛИЧИН

Сотніков В.В., докт.техн.наук

Південно-Західний державний університет,
вул. 50 років Жовтня, 94, Курськ, 305040, Росія.
E-mail: VV_Sotnikov@mail.ru

Розглянуто стаціонарне електричне поле у внутрішньому об'ємі провідників електричного ланцюга. Показано, що воно створюється не постійними у часі струмами, а зарядами, розподіленими переважно по поверхні провідників. Виконано критичне тлумачення термінів: напруга та падіння напруги. Показано некоректність їхніх визначень у міжнародному електротехнічному словнику та Держстандартах. Представлено науково обґрунтовані визначення. Бібл. 11, рис. 2.

Ключові слова: стаціонарне електричне поле, напруга, падіння напруги, термін, визначення.

PHYSICAL NATURE OF STATIONARY ELECTRIC FIELD AND TERMINOLOGICAL DEFINITION OF RELATED QUANTITIES

V.V. Sotnikov

Southwest State University,
str. 50 let Oktiabria, 94, 305040, Kursk, Russia.
E-mail: VV.Sotnikov@mail.ru

Stationary electric field of inner conductor volume of electric circuit is considered. It's shown that the field is created not by stationary currents but charges predominantly dispensed on conductor surface. Critical analysis of voltage and voltage drop terms is performed. The incorrectness of their definition by the international electrotechnical vocabulary and GOST is shown. Scientifically justified definitions are given. References 11, figures 2.

Keywords: stationary electric field, voltage, voltage drop, term, definition.

1. Vasetsky Yu., Mazurenko I., Dzyuba K. Asymptotic method of calculation of impulse electromagnetic field taking into account eddy currents in conducting body // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – No 5. – Pp. 5-7. (Rus)
2. Korn G., Korn T. Mathematical Handbook. – Moskva: Nauka, 1977. – 832 p. (Rus)
3. Maxwell J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism. Vol. I. – Moskva: Nauka, 1989. – 416 p. (Rus)
4. Interstate standard (the draft). Electrotechnics. Common concepts. Terms and definitions. Instead of the GOST 19880-74. – Minsk, 2000. (Rus)
5. Polivanov K.M. Theoretical foundations of electrical engineering. Vol. 1. Linear electric chains with the concentrated parameters. – Moskva-Leningrad: Energiia, 1975. – 360 p. (Rus)
6. Sotnikov V.V. The causes of a initiation and absence of the coulomb electric field in excited metallic bodies // Izvestiia Rosiiskoi Akademii Nauk. Energetika. – 2001. – No 1. – Pp. 120-127. (Rus)
7. Sotnikov V.V. The sources of the coulomb electric field in metallic conductors and their effect on current // Izvestiia Rosiiskoi Akademii Nauk. Energetika. – 2002. – No 1. – Pp. 104-111. (Rus)
8. Tamm I.E. Fundamentals of the Theory of Electricity. – Moskva: Nauka, 1976. – 616 p. (Rus)
9. Boyko V.S., Boyko V.V., Vydolob Yu.F. Fundamentals of electrical engineering. – Kyiv: Politekhnik, 2004. – 272 p. (Ukr)
10. Shimony K. Theoretical electrical engineering. – Moskva: Mir, 1964. – 774 p. (Rus)
11. International standard IEC 60050-121: 1998. International Electrotechnical Vocabulary. Part 121: Electromagnetism.

Надійшла 30.11.2015
Остаточний варіант 22.03.2017

Рецензенти й автор цієї статті не знайшли узгодженого взаєморозуміння щодо достатньої обґрунтованості та коректності окремих положень і висновків. Проте було вирішено ознайомити читачів з повним її контентом як свідчення наявності різних підходів до трактування деяких електротехнічних визначень та термінів, що мають дискусійний характер.