

УДК 537.8

СКАЛЯРНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ И ВЕКТОРНЫЙ МАГНИТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛЫ
В ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

А.И.Глухенький, канд.техн.наук, **Ю.М.Гориславец**, докт.техн.наук,
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

Рассмотрены особенности построения электродинамики Максвелла и классической теории электромагнитного поля. Показаны преимущества, следующие из рассмотрения скалярного электрического и векторного магнитного потенциалов в качестве физических величин. Библ. 2.

Ключевые слова: электродинамика Максвелла, классическая теория электромагнитного поля, напряженность электрического поля, скалярный электрический и векторный магнитный потенциалы, напряжение.

Известно, что теория электромагнитного поля Максвелла, изложенная в «Трактате об электричестве и магнетизме» [1], не успев стать канонической, тут же была подвергнута существенной ревизии. И дело здесь не ограничивалось более простым и рациональным изложением теории, как утверждает многими, оно касалось также и физических воззрений на электромагнитные процессы. Основной отличительной от представлений Максвелла особенностью классической теории электромагнитного поля, основоположниками которой считаются О.Хевисайд и Г.Герц, стал отказ от использования в качестве физических величин скалярного электрического и векторного магнитного потенциалов.

Потенциалы изначально входили в представленную Максвеллом в «Трактате» итоговую систему основополагающих уравнений электродинамики, которая, как известно, начиналась уравнением

$$\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A} . \tag{1}$$

С помощью данного уравнения Максвелл устанавливает связь между векторным магнитным потенциалом и индукцией магнитного поля. Тем самым он в математическом виде формулирует физические представления Фарадея об электротоническом состоянии, изменение которого проявляется в наведении в пространстве электродвижущей силы (ЭДС). Новизна данной формулировки заключалась именно в увязке индукции магнитного поля с векторным потенциалом, который был уже ранее известен и рассматривался преимущественно в качестве характеристики силового либо энергетического взаимодействия контуров с токами.

Вторым в «Трактате» дается выражение для определения напряженности электрического поля

$$\mathbf{E} = -\partial\mathbf{A}/\partial t - \text{grad}\varphi + \mathbf{u} \times \mathbf{B} , \tag{2}$$

в котором составляющие напряженности электрического поля в отсутствие движения (первые два члена в правой части уравнения) представлены через векторный магнитный и скалярный электрический потенциалы. Максвелл полагал, что в дифференциальном виде первое слагаемое в этом выражении является ЭДС электромагнитной индукции, а второе представляет собой ЭДС, которая создается локальным распределением электрических зарядов в наэлектризованном состоянии.

Определяя векторный магнитный потенциал как физическую величину (п.617 "Трактата"), Максвелл указывал, что \mathbf{A} так же связан с полным электрическим током, как скалярный электрический потенциал связан с материей (зарядами), потенциалом которой он является, и что этот потенциал находится с помощью аналогичной процедуры интегрирования. При заданном распределении тока существует одно и только одно распределение величины \mathbf{A} , при котором оно всюду конечно, непрерывно, удовлетворяет условию $\text{div}\mathbf{A} = 0$ и исчезает (превращается в ноль) на бесконечном расстоянии от электрической системы. После этого можно только соглашаться либо не соглашаться с представлениями Максвелла о физической сущности потенциалов \mathbf{A} и φ , но утверждать, что Максвелл подразумевал под \mathbf{A} и φ произвольные функции времени и координат, по нашему мнению, не является правильным. Часто приводимый аргумент [2] о том, что Максвелл в ранних работах приписывал потенциалам физический смысл, но затем при построении электромагнитной теории света от них отказался, также не может восприниматься всерьез, поскольку «Трактат» является итоговым трудом Максвелла.

При построении классической теории электромагнитного поля уравнение (2) по сути было преобразовано к виду

$$\mathbf{E}^* = \mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B} , \tag{3}$$

где максвелловской напряженности электрического поля \mathbf{E} уже соответствует т.н. эффективная напряженность \mathbf{E}^* , а под идентификатором напряженности электрического поля \mathbf{E} объединены ЭДС магнитной индукции и зарядов в соответствии с выражением

$$\mathbf{E} = -\partial\mathbf{A}/\partial t - \text{grad}\varphi . \tag{4}$$

В классической теории последнее уравнение появляется как решение основополагающего уравнения $\text{rot}\mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t$, при этом в уравнении (4) физический смысл предполагается только у напряженности электрического поля, а потенциалам в дальнейшем отводится роль сугубо расчетных, лишенных физического смысла вспомогательных функций. При этом допускаются произвольные калибровки векторного магнитного потенциа-

ла (на его дивергенцию накладываются различные условия). В соответствии с калибровочной инвариантностью относительно напряженности электрического поля и вектора магнитной индукции полагают, что потенциалы \mathbf{A} и φ могут принимать различные значения. Тем самым подчеркивается искусственный характер потенциалов \mathbf{A} и φ , так как по отношению к физическим величинам такое попросту недопустимо.

В конечном итоге введенное упрощение не облегчило изложение теории, поскольку потребовало объяснений “нефизичности” потенциалов. Наоборот, исключение из рассмотрения причин возникновения напряженности электрического поля повлекло за собой сложности восприятия теории поля как физической теории.

Такое построение классической теории привело к невозможности установления зависимости между дифференциальными параметрами электромагнитного поля с такой интегральной величиной как электрическое напряжение, что стало одним из наиболее существенных ее недостатков. На основе скалярного электрического потенциала такая связь может быть установлена с помощью выражения

$$U_{12} \equiv \varphi_1 - \varphi_2 = -\int_1^2 \text{grad}\varphi d\mathbf{l}. \quad (5)$$

Попытку увязать в теории поля вектор напряженности электрического поля \mathbf{E} с явлением электромагнитной индукции нельзя признать удачной. В соответствии с уравнением (4) в общем случае при наличии ЭДС зарядов ($-\text{grad}\varphi \neq 0$) с помощью \mathbf{E} явление электромагнитной индукции выражено быть не может ($\mathbf{E} \neq -\partial\mathbf{A}/\partial t$). С учетом $\oint \text{grad}\varphi d\mathbf{l} = 0$ это возможно только в целом для замкнутого контура

$$-\frac{\partial\Phi}{\partial t} = -\int_s \frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} ds = -\int_s \frac{\partial(\text{rot}\mathbf{A})}{\partial t} ds = -\oint \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} d\mathbf{l} = \oint (\mathbf{E} + \text{grad}\varphi) d\mathbf{l} = \oint \mathbf{E} d\mathbf{l}. \quad (6)$$

Представление явления электромагнитной индукции через $-\partial\mathbf{A}/\partial t$ позволяет правильно отображать это явление как в дифференциальном (в точке), так и интегральном (для контура) видах. Физическое же содержание напряженности электрического поля \mathbf{E} должно определяться эффектами проводимости и электрического смещения под воздействием результирующей ЭДС в соответствии уравнениями материальной связи $\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}$ и $\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E}$, чем, собственно, только и был обусловлен ввод этого понятия у Максвелла.

Использование потенциалов позволяет сформулировать альтернативный вектору Пойнтинга вектор плотности переносимой энергии

$$\mathbf{S}_{\text{pot}} = \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} \times \mathbf{H} - \varphi \left(\mathbf{J} + \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} \right). \quad (7)$$

В отличие от вектора Пойнтинга, который, как известно, описывает поток энергии в любой точке пространства только в случае передачи энергии электромагнитными волнами, представленный уравнением (7) вектор универсален и применительно к электротехническим задачам ведет к тем же физическим представлениям о движении энергии, что и теория цепей.

1. Максвелл Дж. К. Трактат об электричестве и магнетизме. В двух томах. – М.: Наука, 1989. – 431 с.
2. Уиттекер Е. История теории эфира и электричества. – Ижевск: НИЦ РХД, 2001. – 512 с.

УДК 537.8

СКАЛЯРНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ І ВЕКТОРНИЙ МАГНІТНИЙ ПОТЕНЦІАЛИ В ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

О.І.Глухенький, канд.техн.наук, **Ю.М.Гориславец**, докт.техн.наук,

Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Розглянуто особливості побудови електродинаміки Максвелла і класичної теорії електромагнітного поля. Показано переваги, що слідує з розгляду скалярного електричного і векторного магнітного потенціалів як фізичних величин. Бібл. 2.

Ключові слова: електродинаміка Максвелла, класична теорія електромагнітного поля, напруженість електричного поля, скалярний електричний і векторний магнітний потенціали, напруга.

Scalar electric and vector magnetic potentials in theory of electromagnetic field

O.I.Glukhenkyi, Yu.M.Goryslavets,

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

The special features in formation of Maxwell's electrodynamics and classic theory of electromagnetic field are examined. The advantages that follow from consideration of scalar electric and vector magnetic potentials as physical quantities are demonstrated.

References 2.

Keywords: Maxwell's electrodynamics, classic theory of electromagnetic field, electric intensity, scalar electric and vector magnetic potentials, voltage.

1. Maxwell J.C. A treatise on Electricity and Magnetism. – Moskva: Nauka, 1989. – 431 p. (Rus)
2. Whittaker E. A history of the theories of Aether and Electricity. – Izhevsk: NITS RHD, 2001. – 512 p. (Rus)

Надійшла 23.01.2012
Received 23.01.2012