UDC 537.8

Fundamentals of potential electrodynamics

Yu.A. Spirichev
Research & Design Institute of Radio-Electronic Engineering
Zarechny, Penza region, Russia

Abstract: Work is devoted to the development of the classical theory of the electromagnetic field (EMF). Of a single axiom of the existence in nature of the electromagnetic field vector potential deductively constructed the foundations of a coherent and consistent potential electrodynamics. New electrodynamics includes new stress tensor and the equations of motion EMF, tensor and 4 kinds of electromagnetic energy, conservation equations of the electromagnetic energy, tensor and the expression for 20 kinds of dynamic and stationary electromagnetic forces, tensors and equations of motion of charged particles, including the equation of plasma turbulence. An expression for the electromagnetic mass and the relation between EMF with the conservation laws of mechanics.

Keywords: electromagnetic field vector-potential, electromagnetic energy, electromagnetic forces, plasma turbulence.

Основы потенциальной электродинамики

Ю.А. Спиричев
Научно-исследовательский и конструкторский институт радиоэлектронной техники,
г. Заречный, Пензенская обл., Россия
yurii.spirichev@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена развитию классической теории электромагнитного поля (ЭМП). Из единственной аксиомы о существовании в природе поля электромагнитного вектор-потенциала дедуктивным методом построены основы последовательной и непротиворечивой потенциальной электродинамики. Новая электродинамика включает новые тензоры напряженностей и уравнения движения ЭМП, в том числе волновое, тензор и 4 вида электромагнитной энергии, уравнения сохранения электромагнитной энергии, тензор и выражения для 20 видов динамических и стационарных электромагнитных сил, тензоры и уравнения движения

заряженных частиц, в том числе уравнение турбулентности плазмы. Получено выражение для электромагнитной массы и показана связь ЭМП с законами сохранения механики.

Ключевые слова: электромагнитное поле, вектор-потенциал, электромагнитная энергия, электромагнитные силы, турбулентность плазмы, уравнение Власова.

Оглавление

1 Введение

Основы современной классической электродинамики построены индуктивным методом путем обобщения экспериментальных данных, различных дополнительных допущений и искусственных теоретических конструкций. В результате этого современная теория ЭМП является не полной, внутренне не достаточно согласованной и содержит ошибки. Например, в существующей теории не соблюдается третий закон Ньютона при взаимодействии непараллельных токов и требуется введение в теорию дополнительных электромагнитных сил, прямо из нее не следующих. Существующее волновое уравнение не может объяснить физику процесса передачи энергии электромагнитной волной, корпускулярных свойств и момент импульса квантов электромагнитного излучения. Уравнение Ампера-Максвелла неправильно предсказывает сдвиг фазы между током и напряжением в последовательной электрической цепи при заряде конденсатора. В существующей электродинамике описывается только антисимметричная часть ЭМП, а его симметричная часть не рассматривается. Таким образом, необходимо дополнение существующей электродинамики и устранение перечисленных недостатков.

В настоящей работе на основе единственной аксиомы о существовании в природе поля электромагнитного вектор-потенциала дедуктивным методом построены основы последовательной и непротиворечивой потенциальной электродинамики, включающей в себя новые тензоры напряженностей, в том числе симметричный тензор четырехмерных деформаций ЭМП и уравнения движения ЭМП, в том числе новое волновое уравнение, тензор и уравнения сохранения электромагнитной энергии, тензор и выражения для полной системы электромагнитных сил, включающей 20 видов динамических и стационарных электромагнитных сил, тензоры и уравнения движения заряженных частиц, в том числе уравнение турбулентности плазмы. Введение в электродинамику описания симметричной части ЭМП и получение новых видов электромагнитных сил, в том числе динамических, потребовало модификации кинетического уравнения Власова с самосогласованным полем, описывающее плазменные процессы. Получено выражение для электромагнитной массы и показано, что из законов сохранения электромагнитной энергии следуют законы сохранения механики. Объяснена физическая сущность калибровки Лоренца.

2 Тензоры электромагнитного поля

В настоящей работе ЭМП понимается как поле вектор-потенциала ЭМП $\mathbf{A}_\mu(\varphi/c,\mathbf{A})$, где φ и **A** скалярный и векторный потенциалы ЭМП.

Тензор напряженностей ЭМП получим ковариантным дифференцированием $\partial_\nu(\partial_t/c,-\nabla)$ вектор-потенциала ЭМП $\mathbf{A}_\mu(\varphi/c,\mathbf{A})$:

$$\mathbf{F}_{\nu\mu}=\partial_\nu\mathbf{A}_\mu$$

В матричном представлении тензор напряженностей ЭМП имеет вид:

$$\mathbf{F}_{\nu\mu}=\partial_\nu\mathbf{A}_\mu=\begin{pmatrix} \frac{1}{c^2}\partial_t\varphi & \frac{1}{c}\partial_t A_x & \frac{1}{c}\partial_t A_y & \frac{1}{c}\partial_t A_z \\ -\frac{1}{c}\partial_x\varphi & -\partial_x A_x & -\partial_x A_y & -\partial_x A_z \\ -\frac{1}{c}\partial_y\varphi & -\partial_y A_x & -\partial_y A_y & -\partial_y A_z \\ -\frac{1}{c}\partial_z\varphi & -\partial_z A_z & -\partial_z A_y & -\partial_z A_z \end{pmatrix} \tag{1}$$

Этот тензор можно представить в виде суммы симметричного и антисимметричного тензоров напряженностей ЭМП [1]:

$$\mathbf{F}_{\nu\mu}=\partial_\nu\mathbf{A}_\mu=\mathbf{F}_{(\nu\mu)}+\mathbf{F}_{[\nu\mu]}=\frac{1}{2}(\partial_\nu\mathbf{A}_\mu+\partial_\mu\mathbf{A}_\nu)+\frac{1}{2}(\partial_\nu\mathbf{A}_\mu-\partial_\mu\mathbf{A}_\nu) \tag{2}$$

Симметричный тензор напряженностей ЭМП в матричном представлении имеет вид:

$$\mathbf{F}_{(\nu\mu)} = \frac{1}{2}(\partial_\nu \mathbf{A}_\mu + \partial_\mu \mathbf{A}_\nu) = \frac{1}{2}\cdot\begin{pmatrix} 2\frac{1}{c^2}\partial_t\varphi & \frac{1}{c}(\partial_t A_x - \partial_x\varphi) & \frac{1}{c}(\partial_t A_y - \partial_y\varphi) & \frac{1}{c}(\partial_t A_z - \partial_z\varphi) \\ \frac{1}{c}(\partial_t A_x - \partial_x\varphi) & -2\partial_x A_x & -(\partial_x A_y + \partial_y A_x) & -(\partial_x A_z + \partial_z A_x) \\ \frac{1}{c}(\partial_t A_y - \partial_y\varphi) & -(\partial_x A_y + \partial_y A_x) & -2\partial_y A_y & -(\partial_y A_z + \partial_z A_y) \\ \frac{1}{c}(\partial_t A_z - \partial_z\varphi) & -(\partial_x A_z + \partial_z A_x) & -(\partial_y A_z + \partial_z A_y) & -2\partial_z A_z \end{pmatrix} \tag{3}$$

Этот симметричный тензор можно представить в виде суммы шарового 4-тензора и тензора-девиатора:

$$\mathbf{F}_{(\nu\mu)} = \begin{pmatrix} \frac{1}{c^2}\partial_t\varphi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\partial_x A_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\partial_y A_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\partial_z A_z \end{pmatrix} + \frac{1}{2}\cdot\begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{c}(\partial_t A_x - \partial_x\varphi) & \frac{1}{c}(\partial_t A_y - \partial_y\varphi) & \frac{1}{c}(\partial_t A_z - \partial_z\varphi) \\ \frac{1}{c}(\partial_t A_x - \partial_x\varphi) & 0 & -(\partial_x A_y + \partial_y A_x) & -(\partial_x A_z + \partial_z A_x) \\ \frac{1}{c}(\partial_t A_y - \partial_y\varphi) & -(\partial_x A_y + \partial_y A_x) & 0 & -(\partial_y A_z + \partial_z A_y) \\ \frac{1}{c}(\partial_t A_z - \partial_z\varphi) & -(\partial_x A_z + \partial_z A_x) & -(\partial_y A_z + \partial_z A_y) & 0 \end{pmatrix} \tag{4}$$

В существующей электродинамике симметричная часть ЭМП, описывающая его четырехмерные деформации не рассматривается и теория четырехмерных деформаций ЭМП отсутствует. Это приводит к ограничению и неполноте существующей электродинамики. Это связано с тем, что деформациям ЭМП соответствуют свои электромагнитные силы и энергия деформации, которые не учитываются в существующей теории ЭМП.

В тензоре (4) шаровой тензор ЭМП описывает объемные четырехмерные деформации расширения/сжатия ЭМП, а тензор-девиатор описывает четырехмерные деформации сдвига ЭМП. Шаровой тензор ЭМП можно представить в виде произведения его следа на четырехмерный метрический тензор.

$$\mathbf{F}^{Ш}_{(\nu\mu)} = \begin{pmatrix} \frac{1}{c^2}\partial_t\varphi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\partial_x A_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\partial_y A_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\partial_z A_z \end{pmatrix} = S\cdot\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Этот метрический тензор соответствует метрическому тензору пространства/времени Минковского. Тогда шаровой тензор ЭМП можно рассматривать, как описание объемной деформации пространства/времени Минковского, вызываемой ЭМП и численно определяемой следом шарового тензора ЭМП $S = \frac{1}{c^2}\partial_t\varphi - \nabla\cdot\mathbf{A}$. Это выражение для следа S соответствует выражению для калибровки Лоренца. Из этого следует, что применение калибровки Лоренца к уравнениям ЭМП физически означает исключение из рассмотрения объемной деформации ЭМП.

Антисимметричный тензор напряженностей ЭМП, в матричном представлении имеет вид:

$$\mathbf{F}_{[\nu\mu]} = \frac{1}{2}(\partial_\nu \mathbf{A}_\mu - \partial_\mu \mathbf{A}_\nu) = \frac{1}{2}\cdot \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{c}(\partial_t A_x + \partial_x \varphi) & \frac{1}{c}(\partial_t A_y + \partial_y \varphi) & \frac{1}{c}(\partial_t A_z + \partial_z \varphi) \\ -\frac{1}{c}(\partial_t A_x + \partial_x \varphi) & 0 & (-\partial_x A_y + \partial_y A_x) & (-\partial_x A_z + \partial_z A_x) \\ -\frac{1}{c}(\partial_t A_y + \partial_y \varphi) & -(-\partial_x A_y + \partial_y A_x) & 0 & (-\partial_y A_z + \partial_z A_y) \\ -\frac{1}{c}(\partial_t A_z + \partial_z \varphi) & -(-\partial_x A_z + \partial_z A_x) & -(-\partial_y A_z + \partial_z A_y) & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Антисимметричный тензор (5) напряженностей ЭМП описывает чистое вращение ЭМП без его деформации в пространстве Минковского. Антисимметричный тензор (5) можно записать используя обозначения напряженности электрического поля $\mathbf{E}$ и индукции магнитного поля $\mathbf{B}$ [2]:

$$\mathbf{F}_{[\nu\mu]} = \frac{1}{2}(\partial_\nu \mathbf{A}_\mu - \partial_\mu \mathbf{A}_\nu) = \frac{1}{2}\cdot \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{c}E_x & -\frac{1}{c}E_y & -\frac{1}{c}E_z \\ \frac{1}{c}E_x & 0 & -B_z & B_y \\ \frac{1}{c}E_y & B_z & 0 & -B_x \\ \frac{1}{c}E_z & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}$$

3 Уравнения движения электромагнитного поля

Уравнения движения ЭМП найдем из тензоров напряженностей ЭМП (1), (3) и (5), как уравнения связей между компонентами тензоров.

Из тензора (1) следуют уравнения движения ЭМП:

$$\partial_t\left(\frac{1}{c^2}\partial_t \varphi - \nabla\cdot\mathbf{A}\right) = 0 \quad (6)$$

$$\nabla\left(\frac{1}{c^2}\partial_t \varphi - \nabla\cdot\mathbf{A}\right) = 0 \quad (7)$$

Из симметричного тензора (3) следуют уравнения движения ЭМП, описывающие его чистую деформацию в пространстве Минковского:

$$2\frac{1}{c^2}\partial_{tt}\varphi - \partial_t \nabla\cdot\mathbf{A} + \Delta\varphi = 0 \quad (8)$$

$$-\frac{1}{c^2}\partial_t \nabla\varphi + \frac{1}{c^2}\partial_{tt}\mathbf{A} + \nabla(\nabla\cdot\mathbf{A}) + \Delta\mathbf{A} = 0 \quad (9)$$

Из антисимметричного тензора (5) следуют уравнения движения ЭМП, описывающие его чистое вращение в пространстве Минковского:

$$\partial_t \nabla\cdot\mathbf{A} + \Delta\varphi = 0 \quad (10)$$

$$-\frac{1}{c^2}\partial_t \nabla\varphi - \frac{1}{c^2}\partial_{tt}\mathbf{A} + \nabla\times\nabla\times\mathbf{A} = 0 \quad (11)$$

Уравнение (10), записанное через напряженность электрического поля $\mathbf{E}$, имеет классический вид:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

Уравнение (11) является волновым уравнением, описывающим поперечные электромагнитные волны векторного потенциала. Это уравнение можно представить через напряженность электрического поля $\mathbf{E}$ и индукцию магнитного поля $\mathbf{B}$:

$$\frac{1}{c^2}\partial_t(-\nabla\varphi - \partial_t \mathbf{A}) + \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \frac{1}{c^2}\partial_t \mathbf{E} + \nabla \times \mathbf{B} = 0$$

Можно показать, что полученное волновое уравнение тождественно равно плотности тока проводимости и соответствует модифицированному уравнению Ампера-Максвелла [3]:

$$\frac{1}{c^2}\partial_t \mathbf{E} + \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \qquad (12)$$

В работе [4] показано, что существующее в электродинамике уравнение Ампера-Максвелла неправильно предсказывает сдвиг фазы между током проводимости и напряжением в последовательной электрической цепи с конденсатором. Это связано с тем, что исторически, при создании этого уравнения, знак тока смещения был выбран без должного теоретического обоснования. Полученное модифицированное уравнение Ампера-Максвелла (12) предсказывает сдвиг фазы соответствующий эксперименту.

Полученное волновое уравнение отличается от классического волнового уравнения существующей электродинамики своей более сложной вихревой пространственной частью. В этом волновом уравнении векторы электрического и магнитного поля сдвинуты по фазе относительно друг друга на $\frac{\pi}{2}$, что показывает механизм передачи энергии в электромагнитной волне. Пространственная часть нового волнового уравнения представляет собой двойной ротор векторного потенциала, объясняющий наличие корпускулярных свойств и момента количества движения у электромагнитного излучения.

Уравнения (6) – (11) представляют собой полную систему уравнений ЭМП, в потенциалах ЭМП включающую описание его четырехмерной деформации и вращения.

4 Тензоры и уравнения сохранения электромагнитной энергии

Электромагнитные заряды и токи взаимодействуют между собой посредством ЭМП, при этом между ними существует энергия связи этих взаимодействий. Плотность электромагнитной энергии связи в системе «4-плотность тока – ЭМП» получим в виде компонентов тензорного произведения ковариантного вектор-потенциала $\mathbf{A}_\mu = (\varphi / c, -\mathbf{A})$ на ковариантный вектор 4-плотности тока $\mathbf{I}_\nu = (c \cdot \rho, -\mathbf{J})$, где ρ и $\mathbf{J}$ плотности зарядов и тока проводимости. Результатом такого умножения будет 4-тензор второго ранга $\mathbf{W}_{\mu\nu}$, компоненты которого представляют собой плотность всех возможных видов энергии связи в системе «4-плотность тока – ЭМП»:

$$\mathbf{W}_{\mu\nu} = \mathbf{A}_\mu * \mathbf{I}_\nu = \begin{pmatrix} \rho \cdot \varphi & -\frac{1}{c}\varphi \cdot J_x & -\frac{1}{c}\varphi \cdot J_y & -\frac{1}{c}\varphi \cdot J_z \\ -c \cdot \rho \cdot A_x & A_x \cdot J_x & A_x \cdot J_y & A_x \cdot J_z \\ -c \cdot \rho \cdot A_y & A_y \cdot J_x & A_y \cdot J_y & A_y \cdot J_z \\ -c \cdot \rho \cdot A_z & A_z \cdot J_x & A_z \cdot J_z & A_z \cdot J_z \end{pmatrix} \tag{13}$$

Из этого тензора следует четыре вида электромагнитной энергии системы «4-плотность тока – ЭМП»:

Плотность энергии плотности заряда в поле скалярного потенциала $W_1 = \rho \cdot \varphi$

Плотность энергии плотности заряда в поле векторного потенциала $W_2 = -c \cdot \rho \cdot \mathbf{A}$

Плотность энергии плотности тока в поле скалярного потенциала $W_3 = -\frac{1}{c}\mathbf{J} \cdot \varphi$

Плотность энергии плотности тока в поле векторного потенциала $W_4 = \mathbf{A}_m * \mathbf{J}_n$

Плотность энергии W_4 является трехмерным тензором:

$$\mathbf{W}_4 = \mathbf{A}_m * \mathbf{J}_n = \begin{bmatrix} A_x \cdot J_x & A_x \cdot J_y & A_x \cdot J_z \\ A_y \cdot J_x & A_y \cdot J_y & A_y \cdot J_z \\ A_z \cdot J_x & A_z \cdot J_y & A_z \cdot J_z \end{bmatrix}$$

Тензор плотности электромагнитной энергии можно разложить на симметричный и антисимметричный тензоры:

$$\mathbf{W}_{\mu\nu} = \frac{1}{2}(\mathbf{A}_\mu * \mathbf{I}_\nu + \mathbf{A}_\nu * \mathbf{I}_\mu) + \frac{1}{2}(\mathbf{A}_\mu * \mathbf{I}_\nu - \mathbf{A}_\nu * \mathbf{I}_\mu)$$

Уравнения связи между компонентами тензоров плотности электромагнитной энергии являются уравнениями сохранения различных видов электромагнитной энергии.

Из тензора плотности энергии (13) следуют уравнения сохранения электромагнитной энергии:

$$\partial_t(\varphi \cdot \rho) = \nabla(\varphi \cdot \mathbf{J}) \tag{14}$$

$$\partial_t(\rho \cdot \mathbf{A}) = \nabla_n(\mathbf{A}_m * \mathbf{J}_n) \tag{15}$$

Из симметричного тензора плотности энергии:

$$\mathbf{W}_{(\mu\nu)}=\frac{1}{2}(\mathbf{A}_{\mu}*\mathbf{I}_{\nu}+\mathbf{A}_{\nu}*\mathbf{I}_{\mu})=\frac{1}{2}\cdot\begin{pmatrix} 2\rho\cdot\varphi & -\frac{1}{c}\varphi\cdot J_x-c\cdot\rho\cdot A_x & -\frac{1}{c}\varphi\cdot J_y-c\cdot\rho\cdot A_y & -\frac{1}{c}\varphi\cdot J_z-c\cdot\rho\cdot A_z \\ -\frac{1}{c}\varphi\cdot J_x-c\cdot\rho\cdot A_x & 2A_x\cdot J_x & A_x\cdot J_y+A_y\cdot J_x & A_x\cdot J_z+A_z\cdot J_x \\ -\frac{1}{c}\varphi\cdot J_y-c\cdot\rho\cdot A_y & A_x\cdot J_y+A_y\cdot J_x & 2A_y\cdot J_y & A_y\cdot J_z+A_z\cdot J_z \\ -\frac{1}{c}\varphi\cdot J_z-c\cdot\rho\cdot A_z & A_x\cdot J_z+A_z\cdot J_x & A_y\cdot J_z+A_z\cdot J_z & 2A_z\cdot J_z \end{pmatrix} \quad (16)$$

следуют уравнения сохранения электромагнитной энергии:

$$2\frac{1}{c}\partial_t(\rho\cdot\varphi)-\nabla\cdot(\frac{1}{c}\varphi\cdot\mathbf{J}+c\cdot\rho\cdot\mathbf{A})=0 \quad (17)$$

$$-\frac{1}{c}\partial_t(\frac{1}{c}\varphi\cdot\mathbf{J}+c\cdot\rho\cdot\mathbf{A})+2\nabla(\mathbf{A}\cdot\mathbf{J})+\nabla\otimes(\mathbf{A}\otimes\mathbf{J})=0 \quad (18)$$

где $\mathbf{A}\otimes\mathbf{J}=(A_z\cdot J_y+A_y\cdot J_z)_x+(A_x\cdot J_z+A_z\cdot J_x)_y+(A_x\cdot J_y+A_y\cdot J_x)_z$

$$\nabla\otimes\mathbf{D}=(\partial_z\cdot D_y+\partial_y\cdot D_z)_x+(\partial_x\cdot D_z+\partial_z\cdot D_x)_y+(\partial_x\cdot D_y+\partial_y\cdot D_x)_z$$

$$\mathbf{D}=\mathbf{A}\otimes\mathbf{J}$$

Из антисимметричного тензора плотности энергии:

$$\mathbf{W}_{[\mu\nu]}=\frac{1}{2}(\mathbf{A}_{\mu}*\mathbf{I}_{\nu}-\mathbf{A}_{\nu}*\mathbf{I}_{\mu})=\frac{1}{2}\cdot\begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{c}\varphi\cdot J_x+c\cdot\rho\cdot A_x & -\frac{1}{c}\varphi\cdot J_y+c\cdot\rho\cdot A_y & -\frac{1}{c}\varphi\cdot J_z+c\cdot\rho\cdot A_z \\ \frac{1}{c}\varphi\cdot J_x-c\cdot\rho\cdot A_x & 0 & A_x\cdot J_y-A_y\cdot J_x & A_x\cdot J_z-A_z\cdot J_x \\ \frac{1}{c}\varphi\cdot J_y-c\cdot\rho\cdot A_y & -A_x\cdot J_y+A_y\cdot J_x & 0 & A_y\cdot J_z-A_z\cdot J_z \\ \frac{1}{c}\varphi\cdot J_z-c\cdot\rho\cdot A_z & -A_x\cdot J_z+A_z\cdot J_x & -A_y\cdot J_z+A_z\cdot J_z & 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

следуют уравнения сохранения электромагнитной энергии:

$$\nabla\cdot(-\frac{1}{c}\varphi\cdot\mathbf{J}+c\cdot\rho\cdot\mathbf{A})=0 \quad (20)$$

$$\frac{1}{c}\partial_t(\frac{1}{c}\varphi\cdot\mathbf{J}-c\cdot\rho\cdot\mathbf{A})+\nabla\times(\mathbf{A}\times\mathbf{J})=0 \quad (21)$$

Поскольку производными электромагнитной энергии являются электромагнитные силы, то уравнения (14), (15), (17), (18), (20), (21) можно также считать уравнениями баланса плотности электромагнитных сил.

5 Тензор и система электромагнитных сил

Тензор плотности электромагнитных сил, действующих в системе «4-плотность тока – ЭМП», получим в виде ковариантной производной $\partial_\nu(\partial_t/c,-\nabla)$ тензора плотности электромагнитной энергии (13):

$$\mathbf{S}_{\mu\nu\eta}=\partial_\eta\mathbf{W}_{\mu\nu}=\partial_\eta(\mathbf{A}_{\mu}*\mathbf{I}_{\nu})=\partial_\eta\begin{pmatrix} \rho\cdot\varphi & -\frac{1}{c}\varphi\cdot J_x & -\frac{1}{c}\varphi\cdot J_y & -\frac{1}{c}\varphi\cdot J_z \\ -c\cdot\rho\cdot A_x & A_x\cdot J_x & A_x\cdot J_y & A_x\cdot J_z \\ -c\cdot\rho\cdot A_y & A_y\cdot J_x & A_y\cdot J_y & A_y\cdot J_z \\ -c\cdot\rho\cdot A_z & A_z\cdot J_x & A_z\cdot J_z & A_z\cdot J_z \end{pmatrix} \quad (22)$$

Тензор плотности электромагнитных сил (22) является 4-тензором третьего ранга и имеет 64 компонента. Для лучшего представления, запишем эти компоненты в сжатом виде, как суммы $P_1 - P_5$:

$$P_1 = \partial_\eta(\rho \cdot \varphi) = \frac{1}{c}\varphi \cdot \partial_t \rho + \frac{1}{c}\rho \cdot \partial_t \varphi - \varphi \cdot \nabla \rho - \rho \cdot \nabla \varphi$$

$$P_2 = \partial_\eta(-c \cdot \rho \cdot \mathbf{A}) = -\mathbf{A} \cdot \partial_t \rho - \rho \cdot \partial_t \mathbf{A} + c \cdot \mathbf{A} \cdot \nabla \rho + c \cdot \rho \cdot \nabla \cdot \mathbf{A}$$

$$P_3 = \partial_\eta(-\frac{1}{c}\mathbf{J} \cdot \varphi) = -\frac{1}{c^2}\mathbf{J} \cdot \partial_t \varphi - \frac{1}{c^2}\varphi \cdot \partial_t \mathbf{J} + \frac{1}{c}\mathbf{J} \cdot \nabla \varphi + \frac{1}{c}\varphi \cdot \nabla \cdot \mathbf{J}$$

$$P_4 = \partial_\eta(\mathbf{A} \cdot \mathbf{J}) = \frac{1}{c}(\partial_t \mathbf{A}) \cdot \mathbf{J} + \frac{1}{c}\mathbf{A} \cdot \partial_t \mathbf{J} - (\nabla \cdot \mathbf{A}) \cdot \mathbf{J} - \mathbf{A} \cdot \nabla \cdot \mathbf{J}$$

$$P_5 = \partial_\eta(\mathbf{A} \otimes \mathbf{J}) = \frac{1}{c}(\partial_t \mathbf{A}) \otimes \mathbf{J} + \frac{1}{c}\mathbf{A} \otimes (\partial_t \mathbf{J}) - (\nabla \cdot \mathbf{A}) \otimes \mathbf{J} - \mathbf{A} \otimes (\nabla \cdot \mathbf{J})$$

Таким образом, 64 компонента тензора плотности электромагнитных сил $\mathbf{S}_{\mu\nu\eta}$ можно представить в виде 20 видов электромагнитных сил S_1 - S_{20}, приведенных в таблице:

Электромагнитные силы			
Динамические электромагнитные силы		Стационарные электромагнитные силы	
$S_1 = \frac{1}{c}\varphi \cdot \partial_t \rho$	$S_2 = \frac{1}{c}\rho \cdot \partial_t \varphi$	$S_3 = -\varphi \cdot \nabla \rho$	$S_4 = -\rho \cdot \nabla \varphi$
$S_5 = -\mathbf{A} \cdot \partial_t \rho$	$S_6 = -\rho \cdot \partial_t \mathbf{A}$	$S_7 = c \cdot \mathbf{A} \cdot \nabla \rho$	$S_8 = c \cdot \rho \cdot \nabla \cdot \mathbf{A}$
$S_9 = -\frac{1}{c^2}\mathbf{J} \cdot \partial_t \varphi$	$S_{10} = -\frac{1}{c^2}\varphi \cdot \partial_t \mathbf{J}$	$S_{11} = \frac{1}{c}\mathbf{J} \cdot \nabla \varphi$	$S_{12} = \frac{1}{c}\varphi \cdot \nabla \cdot \mathbf{J}$
$S_{13}\frac{1}{c}(\partial_t \mathbf{A}) \cdot \mathbf{J}$	$S_{14} = \frac{1}{c}\mathbf{A} \cdot \partial_t \mathbf{J}$	$S_{15} = -(\nabla \cdot \mathbf{A}) \cdot \mathbf{J}$	$S_{16} = -\mathbf{A} \cdot \nabla \cdot \mathbf{J}$
$S_{17} = \frac{1}{c}(\partial_t \mathbf{A}) \otimes \mathbf{J}$	$S_{18} = \frac{1}{c}\mathbf{A} \otimes (\partial_t \mathbf{J})$	$S_{19} = -(\nabla \cdot \mathbf{A}) \otimes \mathbf{J}$	$S_{20} = -\mathbf{A} \otimes (\nabla \cdot \mathbf{J})$
$\mathbf{A} \otimes \mathbf{J} = (A_z \cdot J_y + A_y \cdot J_z)_x + (A_x \cdot J_z + A_z \cdot J_x)_y + (A_x \cdot J_y + A_y \cdot J_x)_z$			

Электромагнитные силы S_1 - S_{20} представляют собой полную систему плотности электромагнитных сил действующих на заряды и токи. Электромагнитные силы можно разделить на динамические силы, в которых присутствуют производные по времени потенциалов, плотности тока или плотности заряда и стационарные силы, где эти величины постоянны во времени. Также электромагнитные силы можно разделить на полярные и угловые силы. К угловым силам относятся силы S_{17} - S_{20}, а к полярным все остальные. По этой классификации сила S_4, являющаяся силой Кулона, относится к стационарным полярным силам, а сила S_6 является динамической полярной силой Кулона. Сила S_{19}, являющаяся силой Ампера, относится к стационарным угловым силам, сила S_{17} является динамической угловой силой Ампера. Сила S_{15}, являющаяся силой Николаева, относится к стационарным полярным силам, сила S_{13} является динамической полярной силой Николаева. В разделе 5 получены уравнения баланса плотности электромагнитных сил (14), (15), (17), (18), (20), (21).

6 Тензоры движения электрических зарядов

Тензор движения электрических зарядов $\mathbf{T}_{\nu\mu}$ получим ковариантным дифференцированием $\partial_\nu(\partial_t / c, -\nabla)$ 4-вектора плотности тока $\mathbf{I}_\mu = (c \cdot \rho, \mathbf{J})$:

$$\mathbf{T}_{\nu\mu} = \partial_\nu \mathbf{I}_\mu$$

В матричном представлении тензор движения электрических зарядов имеет вид:

$$\mathbf{T}_{\nu\mu} = \partial_\nu \mathbf{I}_\mu = \begin{pmatrix} \partial_t \rho & \frac{1}{c}\partial_t J_x & \frac{1}{c}\partial_t J_y & \frac{1}{c}\partial_t J_z \\ -c \cdot \partial_x \rho & -\partial_x J_x & -\partial_x J_y & -\partial_x J_z \\ -c \cdot \partial_y \rho & -\partial_y J_x & -\partial_y J_y & -\partial_y J_z \\ -c \cdot \partial_z \rho & -\partial_z J_z & -\partial_z J_y & -\partial_z J_z \end{pmatrix} \tag{23}$$

Этот тензор можно представить в виде суммы симметричного и антисимметричного тензоров:

$$\mathbf{T}_{\nu\mu} = \partial_\nu \mathbf{I}_\mu = \mathbf{T}_{(\nu\mu)} + \mathbf{T}_{[\nu\mu]} = \frac{1}{2}(\partial_\nu \mathbf{I}_\mu + \partial_\mu \mathbf{I}_\nu) + \frac{1}{2}(\partial_\nu \mathbf{I}_\mu - \partial_\mu \mathbf{I}_\nu)$$

Симметричный тензор движения электрических зарядов в матричном представлении имеет вид:

$$\mathbf{T}_{(\nu\mu)} = \frac{1}{2}(\partial_\nu \mathbf{J}_\mu + \partial_\mu \mathbf{J}_\nu) = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 2\partial_t \rho & (\frac{1}{c}\partial_t J_x - c \cdot \partial_x \rho) & (\frac{1}{c}\partial_t J_y - c \cdot \partial_y \rho) & (\frac{1}{c}\partial_t J_y - c \cdot \partial_y \rho) \\ (\frac{1}{c}\partial_t J_x - c \cdot \partial_x \rho) & -2\partial_x J_x & -(\partial_x J_y + \partial_y J_x) & -(\partial_x J_z + \partial_z J_x) \\ (\frac{1}{c}\partial_t J_y - c \cdot \partial_y \rho) & -(\partial_x J_y + \partial_y J_x) & -2\partial_y J_y & -(\partial_y J_z + \partial_z J_y) \\ (\frac{1}{c}\partial_t J_z - c \cdot \partial_z \rho) & -(\partial_x J_z + \partial_z J_x) & -(\partial_y J_z + \partial_z J_y) & -2\partial_z J_z \end{pmatrix} \tag{24}$$

Антисимметричный тензор движения электрических зарядов в матричном представлении имеет вид:

$$\mathbf{T}_{[\nu\mu]} = \frac{1}{2}(\partial_\nu \mathbf{J}_\mu - \partial_\mu \mathbf{J}_\nu) = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 0 & (\frac{1}{c}\partial_t J_x + c \cdot \partial_x \rho) & (\frac{1}{c}\partial_t J_y + c \cdot \partial_y \rho) & (\frac{1}{c}\partial_t J_z + c \cdot \partial_z \rho) \\ -(\frac{1}{c}\partial_t J_x + c \cdot \partial_x \rho) & 0 & (\partial_x J_y - \partial_y J_x) & (\partial_x J_z - \partial_z J_x) \\ -(\frac{1}{c}\partial_t J_y + c \cdot \partial_y \rho) & -(\partial_x J_y - \partial_y J_x) & 0 & (\partial_y J_z - \partial_z J_y) \\ -(\frac{1}{c}\partial_t J_z + c \cdot \partial_z \rho) & -(\partial_x J_z - \partial_z J_x) & -(\partial_y J_z - \partial_z J_y) & 0 \end{pmatrix} \tag{25}$$

Тензоры (23) - (25) описывают движение электрических зарядов в пространстве Минковского.

7 Уравнения движения электрических зарядов

Уравнения движения электрических зарядов найдем из тензоров (23) - (25), как уравнения связей между их компонентами.

Из тензора (23) следуют уравнения движения электрических зарядов:

$$\frac{1}{c}\partial_t(\partial_t\rho - \nabla\cdot\mathbf{J}) = 0 \tag{26}$$

$$\nabla(\partial_t\rho - \nabla\cdot\mathbf{J}) = 0 \tag{27}$$

Из симметричного тензора (24) следуют уравнения связи между его компонентами:

$$2\frac{1}{c}\partial_{tt}\rho - \frac{1}{c}\partial_t\nabla\cdot\mathbf{J} + c\cdot\Delta\rho = 0 \tag{28}$$

$$-\partial_t\nabla\rho + \frac{1}{c^2}\partial_{tt}\mathbf{J} + \nabla(\nabla\cdot\mathbf{J}) + \Delta\mathbf{J} = 0 \tag{29}$$

Из антисимметричного тензора (25) следуют уравнения связи между его компонентами:

$$\frac{1}{c^2}\partial_t\nabla\cdot\mathbf{J} + \Delta\rho = 0 \tag{30}$$

$$-\partial_t\nabla\rho - \frac{1}{c^2}\partial_{tt}\mathbf{J} + \nabla\times\nabla\times\mathbf{J} = 0 \tag{31}$$

Уравнения (26) – (31) являются полной системой уравнений движения электрических зарядов. Уравнения (26) и (27) являются уравнениями непрерывности плотности тока проводимости. Уравнение (31) является волновым и описывает волны плотности тока проводимости. Источником этих волн является изменяющийся во времени градиент плотности зарядов. Заменив в этом уравнении плотность тока проводимости через плотность зарядов ρ и скорость их движения $\mathbf{V}$, получим кинематическое уравнение движения зарядов:

$$\frac{1}{c^2}\partial_{tt}\mathbf{J} - \nabla\times\nabla\times\mathbf{J} = -\partial_t\nabla\rho \quad \text{или} \quad \frac{1}{c^2}\partial_{tt}(\rho\cdot\mathbf{V}) - \nabla\times\nabla\times(\rho\cdot\mathbf{V}) = -\partial_t\nabla\rho \tag{32}$$

Это уравнение является фундаментальным уравнением турбулентности плазмы, т.к. из него следует, что изменение во времени градиента плотности зарядов в плазме вызывает возникновение и распространение в ней вихревых волн движущихся заряженных частиц плазмы или плотности тока. В настоящее время в физике плазмы применяется в основном статистический подход к описанию движения заряженных частиц. Полученная система уравнений (26) – (31), включающая уравнение турбулентности плазмы, является детерминированной системой кинематических уравнений самосогласованного движения заряженных частиц.

8 Модифицированное уравнение Власова

В теории плазмы используется кинетическое уравнение с самосогласованным полем – уравнение Власова, которое для разреженной бесстолкновительной плазмы имеет вид [5]:

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \mathbf{V}\cdot\frac{\partial f_\alpha}{\partial \mathbf{r}} + e_\alpha\{\mathbf{E} + \frac{1}{c}[\mathbf{V}\times\mathbf{B}]\}\frac{\partial f_\alpha}{\partial \mathbf{p}_\alpha} = 0 \qquad (34)$$

где $f_\alpha(\mathbf{p},\mathbf{r},t)$ - функция распределения частиц вида α, характеризующая вероятность нахождения частицы с импульсом **p** в заданный момент времени t в точке пространства **r**. В этом уравнении ЭМП считается суммарным полем внешних и внутренних источников. Считается, что уравнение (34) вместе с уравнениями Максвелла образуют систему уравнений, описывающую самосогласованное движение заряженных частиц. Однако уравнения Максвелла описывают только антисимметричную часть ЭМП, а входящая в уравнение (34) сила Лоренца (сумма силы Кулона и Ампера), является стационарной силой и не учитывает все электромагнитные силы, действующие на заряженные частицы, движущиеся в изменяющемся ЭМП. В связи с этим, систему уравнений Власова-Максвелла необходимо дополнить уравнениями, описывающими симметричную часть ЭМП, а силу Лоренца в уравнении (34) необходимо заменить полной системой электромагнитных сил, выражаемой тензором плотности электромагнитных сил $\mathbf{S}_{\mu\nu\eta}$ (22). Уравнение Власова после предлагаемой замены в нем силы Лоренца на тензор $\mathbf{S}_{\mu\nu\eta}$ в трехмерном виде можно записать, как:

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \mathbf{V}\cdot\frac{\partial f_\alpha}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\partial f_\alpha}{\partial \mathbf{p}_\alpha}\cdot\sum_{k=1}^{k=20} S_k = 0 \qquad (35)$$

или

$$(\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{V}\cdot\frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}})\delta_{\mu\nu} + \mathbf{S}_{\mu\nu\eta}\cdot\frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}_\eta} = 0 \qquad (36)$$

Следует иметь ввиду, что поскольку тензор $\mathbf{S}_{\mu\nu\eta}$ выражает плотность электромагнитных сил, то в отличие от уравнения (34), функция распределения

$f_\alpha(\mathbf{p},\mathbf{r},t)$ частиц вида α, характеризует не вероятность, а плотность вероятности частицы с плотностью импульса **p.** Кроме уравнений (26) - (31) в систему уравнений динамики плазмы необходимо включить и уравнения сохранения электромагнитной энергии (14), (15), (17), (18), (20), (21), так как они представляют собой уравнения баланса электромагнитных сил.

9 Механическая интерпретация электромагнитной энергии

Уравнениям сохранения электромагнитной энергии (14) и (15) можно дать механическую интерпретацию. В левой части уравнения (14) стоит выражение $\varphi\cdot\rho$, представляющее собой плотность потенциальной энергии заряда в поле скалярного потенциала. Правую часть уравнения (14) можно записать в виде:

$$\partial_t(\varphi\cdot\rho)=\nabla(\varphi\cdot\mathbf{J})=\nabla(\varphi\cdot\rho\cdot V)$$

Разделив обе части этого уравнения на квадрат скорости света его можно записать в виде:

$$\partial_t(m_э)=\nabla(m_э\cdot V) \qquad (37)$$

где $m_э=\varphi\cdot\rho/c^2$ - плотность электромагнитной массы. Тогда уравнение (37) представляет собой закон сохранения механического импульса объема сплошной среды.

Из выражения для электромагнитной массы следует, что $E=\rho\cdot\varphi=m_э\cdot c^2$, т.е. потенциальная энергия заряженного объема среды в поле скалярного потенциала равна известной энергии покоя этого объема среды.

Сделав в уравнении (15) аналогичные замены, его можно записать в виде уравнения для изменения плотности механического импульса:

$$\partial_t(m_э\cdot\mathbf{V})=\nabla(m_э\cdot\mathbf{V}^2) \qquad (38)$$

Скорость изменения плотности механического импульса объема сплошной среды, равна дивергенции плотности кинетической энергии. Таким образом, из законов потенциальной электродинамики (14) и (15) следуют законы механики (37) и (38).

10 Выводы

Применение дедуктивного метода и единственной аксиомы о существовании в природе поля электромагнитного вектор-потенциала $\mathbf{A}_\mu(\varphi/c,\mathbf{A})$ позволило построить основы последовательной и непротиворечивой потенциальной электродинамики, описывающей все аспекты взаимодействия зарядов и токов с ЭМП.

Из тензора плотности энергии системы «4-плотность тока – ЭМП» следуют выражения новых видов электромагнитной энергии, соответствующих новым электромагнитным силам и законы сохранения электромагнитной энергии. Выражения для этих законов имеют механическую интерпретацию, показывающую неразрывную связь между электродинамикой и механикой.

Из тензора движений электрических зарядов следует детерминированная система уравнений динамики заряженных частиц. Одно из этих уравнений описывает волны плазменной турбулентности, источником которых является изменяющийся во времени градиент плотности зарядов.

Получение полной системы электромагнитных сил, в том числе динамических, позволит объяснить электродинамические плазменные явления, например возникновение и самоудержание плазмы в шаровой молнии, возникновение горячих точек плазменных Z-пинчей, и других явлений, которые до настоящего времени не имеют своего удовлетворительного объяснения в рамках существующей электродинамики и физики плазмы.

Из результатов, полученных в настоящей работе, следует необходимость изменений в классической и квантовой электродинамике, физике плазмы и твердого тела.

Литература

1. Спиричев Ю.А. Деформация электромагнитного поля в пространстве Минковского. Электронный ресурс http://vixra.org/abs/1311.0024 04.11.2013
2. Савельев И. В. Основы теоретической физики : в 3 т. / ---М.: Наука, 1975. ---Т. 1. ---416 с.
3. Спиричев Ю.А. Новый подход к развитию теории электромагнитного поля Электронный ресурс http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/12283.html
4. Спиричев Ю.А. О фазе тока смещения или об экспериментальной проверке уравнения Максвелла. Электронный ресурс http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/11879.html 24.03.2012
5. Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Лекции по электродинамике плазмоподобных сред. --- М.: Издательство Московского университета. Физический факультет МГУ, 1999. ---332 с.