

# ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ В ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ МАКСВЕЛЛА. ЧАСТЬ 1

Н.Щитов, к.т.н.,  
ВНИИА им. Н.Л. Духова.

В работе обсуждается проблема выполнимости принципа относительности в электродинамике Максвелла, которая часто формулируется как проблема инвариантности (ковариантности) уравнений Максвелла относительно тех или иных преобразований координат.

Не всякая критика – есть мысль, но всякая мысль – есть критика.  
Мысль не имеет другой формы существования.

Фазиль Искандер

Ричард Фейнман в своих лекциях по физике [1] формулирует проблему так: "Однако уравнения Максвелла, по-видимому, не подчиняются принципу относительности: если преобразовать их подстановкой (15.2) (преобразования Галилея – автор), то их вид не останется прежним. Значит, в движущемся межпланетном корабле оптические и электрические явления не такие, как в неподвижном; их можно использовать для определения его скорости, в частности определить и абсолютную скорость корабля, сделав подходящие электрические или оптические измерения". Однако, что означает "их вид не останется прежним", "явления не такие" нигде не расшифровывается. О каких собственно "подходящих измерениях" идет речь, не вполне понятно. Таким образом, проблема выполнимости принципа относительности (причем в довольно узкой, специфической трактовке) формулируется как проблема инвариантности (ковариантности) уравнений Максвелла относительно тех или иных преобразований координат.

Несколько лет назад в Интернете проходила дискуссия под общим заголовком "Special Relativity Invalid?". В ходе дискуссии высказывались полярные мнения. Например, В.Петков пишет (все цитаты приводятся с со-

кращениями): "Теория относительности – наиболее глубокая теория, известная человечеству (квантовая механика – все еще неполная теория). Она не просто верна – для кого-то покажется удивительным, но теория относительности могла и должна была быть создана намного ранее... Верно, однако, что главный источник недоразумений – это собственно относительность. Ей недостает концептуальной ясности. С математикой все в порядке, но об остальном (да, есть "остальное" в относительности; физическая теория – это не только математика) либо умалчивается, либо является почти полным недоразумением".

С другой стороны, в реплике К.Томсон утверждается прямо противоположное (Special Relativity Invalid? Response to V. Petkov from C. Thompson):

"3-х мерный эфир СУЩЕСТВУЕТ. Единственное, что нужно сделать, чтобы придать смысл вселенной, – это осознать его существование и осознать, что он определяет выделенную систему координат. Не так просто сказать, что это за система, но на самом деле это едва ли имеет значение. ... Эфир определяет скорость излучения и распространения всех взаимодействий, но в большинстве реальных ситуаций это не критично. Что имеет значение, так это положения масс, вызыва-

ющих эти силы. Вот что делает идеи Общей теории относительности Эйнштейна так близкими к истине. Тем не менее, его специальная теория относительности является ерундой от начала до конца. Все проблемы теории относительности просто исчезают, стоит только постулировать существование эфира! Верните также абсолютное время. Не имеет значения, что существуют трудности с определением одновременности. Тот факт, что люди не могут измерить что-то, вовсе не означает, что следует выбросить это что-то из наших фундаментальных моделей. Разве мы отступаем просто потому, что мы не можем измерить массы планет? Разве мы отказываемся от моделирования производства энергии на солнце? Мы также не можем измерить эти вещи".

Более взвешенная позиция изложена в ответе Б. Гамильтона (Special Relativity Invalid? Response to V. Petkov from B. Hamilton):

"Это удивительно, что после того, как публикация в "Speculations in Science and Technology" пригласила специалистов высказаться за и против теории относительности в двух специальных выпусках, результаты оказались пятьдесят на пятьдесят. Представляется, что главным "оппонентом" теории относительности является лоренцева интерпретация. Почему так мно-

го противоречий в столь глубокой теории?

1) В последние годы Эйнштейн признавал, что эфир не является чем-то излишним, как он первоначально предполагал, а также признавал, что идеи Маха оказали неправильное влияние на его рассуждения.

2) Специальная теория относительности (СТО) ограничивается двумя системами координат при рассмотрении Принципа Относительности, хотя все проверки этого принципа подразумевают наличие третьей системы, используемой для калибровки того, что происходит в первых двух. Как только вы вводите третью систему (трое часов, одни движутся на восток, другие на запад, а эталонные часы находятся в некоторой фиксированной позиции, которая эквивалентна абсолютной системе), так теория превращается в абсурд.

Профессор Ларо Шэтцер привел бесспорное замечание относительно системы эфира: "... С момента создания СТО стало крайне

непопулярным среди ученых говорить об "эфире". Тем не менее, сегодня мы знаем, что электромагнитные волны действительно представляют собой возмущения в некоторой "среде". Однако эта среда не является твердым телом или жидкостью в классическом смысле, но подчиняется законам квантовой механики. Теоретики квантовых полей назвали ее вакуумом. Некоторые интерпретируют вакуум как само пространство-время, но это не отрицает тот факт, что сама его истинная природа остается загадкой. Как бы то ни было, термин квантовый эфир мог бы быть использован для обозначения возможного современного синтеза обеих концепций".

Эйнштейн не рассматривал эту логику, но он понимал, что кривизна пространства не могла быть отнесена к пространству без физических свойств. Именно эти свойства остаются до сих пор неизвестными, хотя мы и узнаем все больше о его природе.

Некоторые также оспаривают математику, хотя большая часть

математики СТО была разработана Пуанкаре и Лоренцем до Эйнштейна, а Лоренц основывал свою математику на существовании эфира!"

Оставляя пока в стороне концептуальные аспекты дискуссии, отметим, что для экспериментальной физики основным вопросом является вопрос о формулах, которые следует использовать при решении конкретных задач электродинамики, в частности оптических или задач о взаимодействии движущихся зарядов. В представлении многих физиков главным аргументом в пользу СТО является не ее, так сказать, философское обоснование и даже не эксперименты, послужившие толчком к ее возникновению, но сам математический аппарат, позволивший решить ряд конкретных задач электродинамики движущихся тел и подтвержденных экспериментом.

Тем не менее, СТО все же не устранила некоторых внутренних противоречий, собственных электродинамике

Максвелла, в частности все ту же невыполнимость принципа относительности при описании взаимодействия движущихся рядов. Это нашло отражение в обзоре П. Корнийя [2], который, собственно, и послужил еще одним стимулом для написания данной работы. В частности, Корний пишет: "На самом деле, как отмечено в книге Ассиса, Веберова электродинамика является единственной теорией относительности. Напротив, СТО с ее бесконечным множеством инерциальных систем и изменяющимися величинами находится почти в согласии с существованием эфира – точка зрения, защищаемая Бильдером". Корний цитирует высказывание Бильдера о возможности преодоления противоречия между асимметрией Лоренцевых сил в различных инерциальных системах отсчета и принципом относительности: "Необходимо только постулировать, что эти явления вызваны движением частиц и тел относительно абсолютной инерциальной системы в соответствии с уравнениями Максвелла-Лоренца". И еще: "Различные эксперименты, описанные многими физиками по всему миру, показывают, что можно обнаружить наше движение относительно эфира с помощью внутренних экспериментов вопреки утверждениям СТО. Сегодня существует так много экспериментов, доказывающих этот факт, причем более десяти из них описаны в этой работе, что отрицать их было бы позицией, соответствующей скорее религиозной вере, нежели науке". Впрочем, данная работа отнюдь не представляет собой критический анализ данного обзора, со многими утверждениями которого автор не согласен. В чем автор безусловно согласен с П. Корнийем, так это с его заключительным замечанием: "В настоящее время серьезная ревизия нашего понимания законов, которые управляют вселенной, кажется неизбежной".

\* Ссылка дана просто в виде примера использования физиками понятия "инвариантность".

Наконец, последний "источник вдохновения" при написании данной работы, о котором следует упомянуть, это статья [3]. В ней анализируется связь между принципом относительности и принципом Лоренцевой ковариантности. Приведем опять довольно пространные цитаты из статьи:

"...когда Эйнштейн представил свою общую теорию относительности в 1915, он имел в виду, что явно ковариантная формулировка физической теории, т.е. формулировка теории в виде соотношений между тензорными компонентами, обеспечивает выполнение принципа относительности. Тем не менее, в 1917 Кречман указал, что почти каждой физической теории может быть дана явно ковариантная формулировка. Таким образом, это заключение казалось ясным уже в 1918: ковариантная формулировка физической теории не обеспечивает выполнение принципа относительности.

Следовательно, принцип ковариантности не накладывает никаких ограничений на содержание физических законов, но только на форму, в которой они записаны. Литература, посвященная взаимоотношению принципа ковариантности и принципа относительности, была недавно пересмотрена Нортоном, который пишет: "Эйнштейн предложил принцип общей ковариантности в качестве фундаментального физического принципа в своей общей теории относительности, а также в качестве обеспечивающего обобщение принципа относительности на ускоренное движение. Эта точка зрения была оспорена практически немедленно противоположным утверждением, состоящим в том, что этот принцип не является принципом относительности и физически пуст. Несогласие существует и поныне".

#### ИНВАРИАНТНОСТЬ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА ОТНОСИТЕЛЬНО ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ГАЛИЛЕЯ

Утверждение о том, что ньютоновская механика инвари-

антна, а электродинамика Максвелла не инвариантна относительно преобразований Галилея (ПГ), общеизвестно и вошло в учебники. (См., например, [4], с. 124: "В то время как уравнения Ньютона инвариантны относительно преобразований Галилея, уравнения Максвелла, как легко убедиться непосредственной проверкой, по отношению к этим преобразованиям оказываются неинвариантными"). При этом понятие инвариантности уравнений трактуется в том смысле, что "...они имеют одинаковый вид во всех инерциальных системах отсчета" [5]\*. Конечно же, приведенная цитата неявно отражает факт противоречия электродинамики Максвелла принципу относительности, с констатацией которого (противоречия) и начинает свою знаменитую работу А. Эйнштейн: "Известно, что электродинамика Максвелла в современном ее виде приводит в применении к движущимся телам к асимметрии, которая несвойственна, по-видимому, самим явлениям" [6]. (Заметим сразу, что электродинамика Максвелла – это не только система уравнений Максвелла, но и выражения для сил.)

В формулировке Пуанкаре принцип звучит так: "Согласно принципу относительности, законы физических явлений обязаны быть одинаковыми для неподвижного наблюдателя и наблюдателя, который относительно него переносится равномерным движением, так что у нас нет и не может быть никаких способов отличить, уносит ли нас такое движение или не уносит". (Таким образом, речь идет о преобразованиях *alias* [7, с. 414], т.е. *пассивных преобразований*, вводящих новое представление каждой точки посредством новых координат.) Для начала проверим справедливость второй части утверждения из [4], т.е. попробуем "легко убедиться непосредственной проверкой" в неинвариантности системы уравнений Максвелла (УМ) (для простоты рассматривается вакуум):

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j} = [\vec{\nabla}, \vec{H}], \quad (\vec{\nabla}, \vec{E}) = 4\pi\rho,$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -[\vec{\nabla}, \vec{E}], \quad (\vec{\nabla}, \vec{H}) = 0, \quad (1.1)$$

(Обозначаем:  $[\vec{\nabla}, \vec{F}] = \text{rot} \vec{F}$ ;  
 $(\vec{\nabla}, \vec{F}) = \text{div} \vec{F}$ .)

при замене переменных, соответствующих ПГ alias  $\vec{r}' = \vec{r} + \vec{v}t$  :

$$\begin{aligned} \xi &= x + v_x t, \eta = y + v_y t, \zeta = \\ &= z + v_z t, \tau = t \end{aligned} \quad (1.2)$$

Якобиан перехода равен 1. Тогда:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} &= \\ = \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial x} &= \\ = \frac{\partial}{\partial \xi} & \end{aligned}$$

Аналогично:  $\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial \eta}$ , так что

$\nabla' = \nabla$  и только  $\frac{\partial}{\partial t}$  изменится:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} = \\ &= v_x \frac{\partial}{\partial \xi} + v_y \frac{\partial}{\partial \eta} + v_z \frac{\partial}{\partial \zeta} + \frac{\partial}{\partial \tau} = \quad (1.3) \\ &= \frac{\partial}{\partial \tau} + (\vec{v}, \vec{\nabla}) \end{aligned}$$

Выражение (1.3) имеет совершенно понятный смысл – это полная или "материальная" производная по времени в новой системе координат. В то же время оно несколько неожиданно на первый

взгляд – равенство  $\tau = t$  вроде бы подразумевает и равенство  $\frac{\partial}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial t}$ ,

чего на самом деле нет. Таким образом, УМ преобразуются при переходе от одной инерциальной системы к другой в соответствии с ПГ следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \underbrace{x, y, z, t} & \quad \underbrace{\xi, \eta, \zeta, \tau} \\ \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial \tau} + c^{-1}(\vec{v}, \vec{\nabla}) \vec{E} + \\ &= [\vec{\nabla}, \vec{H}] + \frac{4\pi}{c} \vec{j} = [\vec{\nabla}, \vec{H}] \\ (\vec{\nabla}, \vec{E}) = 4\pi\rho & \rightarrow (\vec{\nabla}, \vec{E}) = 4\pi\rho \\ \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial \tau} + \\ &= -[\vec{\nabla}, \vec{E}] = -[\vec{\nabla}, \vec{E}] \\ (\vec{\nabla}, \vec{H}) = 0 & \rightarrow (\vec{\nabla}, \vec{H}) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

Но, для  $\vec{v} = \text{Const}$  (см. [7])

$$\begin{aligned} (\vec{v}, \vec{\nabla}) \vec{F} &= \vec{v}(\vec{\nabla}, \vec{F}) - [\vec{\nabla}, [\vec{v}, \vec{F}]] \Rightarrow \\ c^{-1}(\vec{v}, \vec{\nabla}) \vec{E} &= \\ &= c^{-1} \{ \vec{v}(\vec{\nabla}, \vec{E}) - [\vec{\nabla}, [\vec{v}, \vec{E}]] \}, \quad (1.5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c^{-1}(\vec{v}, \vec{\nabla}) \vec{H} &= \\ &= c^{-1} \{ \vec{v}(\vec{\nabla}, \vec{H}) - [\vec{\nabla}, [\vec{v}, \vec{H}]] \} \end{aligned}$$

Используя уравнения для дивергенций полей, получаем:

$$\begin{aligned} c^{-1}(\vec{v}, \vec{\nabla}) \vec{E} &= \frac{4\pi}{c} \rho \vec{v} - [\vec{\nabla}, [\vec{v}, \vec{E}]] \\ c^{-1}(\vec{v}, \vec{\nabla}) \vec{H} &= -[\vec{\nabla}, [\vec{v}, \vec{H}]] \end{aligned} \quad (1.6)$$

Тогда 1-е и 3-е уравнения из (1.12) будут иметь вид:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial \tau} + \frac{4\pi}{c} (\vec{j} + \rho \vec{v}) = [\vec{\nabla}, \vec{H} + [\vec{v}, \vec{E}]], \quad (1.7)$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial \tau} = -[\vec{\nabla}, \vec{E} - [\vec{v}, \vec{H}]]$$

Уравнения 2 и 4 из (1.1, 1.4) остаются неизменными. Приняв теперь "естественные определения"

$$\begin{aligned} \vec{j}' &= \vec{j} + \rho \vec{v}, \vec{H}' = \vec{H} + [\vec{v}, \vec{E}], \\ \vec{E}' &= \vec{E} - [\vec{v}, \vec{H}] \end{aligned} \quad (1.8)$$

убеждаемся в полной ПГ инвариантности УМ (в смысле [4]) в форме (1.7) – все изменения при переходе от одной инерциальной системы к другой сводятся к замене в уравнениях  $\vec{v}$  на  $\vec{v}' = \vec{v} + \vec{V}$ . Уравнения принимают привычный вид (1.1) при  $\vec{V} = -\vec{v}$  или  $\vec{v} = 0$ .

Обратим внимание еще и на следующее важное обстоятельство: постоянная  $c$ , фигурирующая в УМ, при ПГ не изменяется, т.к. является константой:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}, \quad \epsilon_0, \mu_0 = \text{Const}$$

Тот факт, что она имеет размерность скорости, вовсе не означает, что при ПГ ее следует складывать с параметром преобразования. Только в случае такого некорректного применения

ПГ УМ действительно радикально изменятся, и можно было бы говорить о неинвариантности УМ относительно ПГ.

При корректном применении ПГ мы получили соотношения (1.8), которые не нуждаются ни в каких ссылках на СТО, а между тем их вывод считается одной из заслуг СТО. Например, в [8] И.Е.Тамм пишет: "Вывод формул (115.5) (аналогичных с точностью до лоренцева множителя (1.8). – Автор) можно найти в учебниках по теории относительности; наглядное обоснование их без прямого обращения к представлениям теории относительности возможно лишь в рассмотренном выше частном случае  $\vec{E}=0$ ". (Ссылка на частный случай означает использование выражения для силы Лоренца и принципа относительности.) Более того, можно говорить о том, что сами УМ – есть не более чем формулы преобразования полей покоящихся зарядов при ПГ.

В самом деле, пусть в лабораторной системе координат покоится заряд  $q$  (для определенности в начале координат; можно рассмотреть и систему зарядов – обобщение очевидно, так что в дальнейшем будем говорить об одном заряде.) Т.к., по определению, заряд  $q$  является источником поля  $\vec{E}$ , то  $(\vec{V}, \vec{E}) = 4\pi q \delta(\vec{r}) = 4\pi r(\vec{r})$ . При переходе к другой системе координат, движущейся равномерно и прямолинейно со скоростью  $\vec{v}$  относительно лабораторной, поле  $\vec{E}$  очевидно изменится, но единственной причиной такого изменения (в предположении сохранения заряда) будет относительное движение наблюдателя (пробного заряда) и движущегося заряда. Формальной констатацией этого факта является уравнение (1.7), по сути представляющее собой переход в систему движущегося со скоростью  $-\vec{v}$  пробного заряда в соответствии с ПГ:

$$\frac{d\vec{E}}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{v}(\vec{V}, \vec{E}) = [\vec{V}, [\vec{v}, \vec{E}]] \quad (1.9)$$

(В общем случае:

$$\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}, \vec{v}, \dots, t), \vec{v} \neq \text{Const}, \frac{d\vec{E}}{dt} =$$

$$= \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{v}(\vec{V}, \vec{E}) + \frac{d\vec{v}}{dt}(\vec{V}_v, \vec{E}) + \dots)$$

Заменяя в соответствии с определением источника поля  $\vec{v}(\vec{V}, \vec{E})$  на  $4\pi r\vec{v} = 4\pi \vec{j}$  и вводя масштабирующий множитель  $c$  (надо же в чем-то измерять  $\vec{v}$ !), получаем:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j} = [\vec{V}, [\vec{\beta}, \vec{E}]], \vec{\beta} = \frac{\vec{v}}{c} \quad (1.10)$$

Если принять естественное определение  $[\vec{\beta}, \vec{E}] = \vec{H}$  в полном соответствии с решением (1.8), то получим первые два уравнения системы Максвелла:

$(\vec{V}, \vec{E}) = 4\pi r$  – определение поля, источником которого является  $r$ ;

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j} = [\vec{V}, \vec{H}] \quad \text{– константа}$$

факта изменения поля вследствие движения заряда. Она равносильна предположению о сохранении заряда. Поэтому применение оператора  $(\vec{V}, \dots)$  – (взятие дивергенции) к этому уравнению приводит к уравнению непрерывности для плотности заряда. Очевидно, что переход в движущуюся систему не приводит к появлению *нового вида зарядов*, так что  $(\vec{V}, \vec{H}) = 0$ .

Точно так же, как и для напряженности электрического поля, для напряженности магнитного справедливо утверждение  $\frac{d\vec{H}}{dt} = 0$ , следствием которого является 4-е УМ в естественном предположении о сохранении потенциальности силы в новой системе координат, т.е.  $[\vec{V}, \vec{E}' + [\vec{\beta}, \vec{H}']] = 0^*$ . Аналогично может быть получена и лоренцева калибровка:

\* Строгий вывод УМ требует значительного большего объема, поэтому изложена лишь идея.

$$\frac{d\phi}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial t} + (\vec{V}, \vec{v}\phi) = 0$$

или

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \phi}{\partial t} + (\vec{V}, \vec{\beta}\phi) = 0,$$

так что, если считать  $\vec{\beta}\phi = \vec{A}$ , что так и есть для равномерно движущегося заряда, то

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \phi}{\partial t} + (\vec{V}, \vec{A}) = 0 \quad (1.11)$$

Таким образом, лоренцева калибровка имеет простой физический смысл сохранения потенциала (или приведенной к заряду энергии – энергии единичного заряда в поле потенциала  $\phi$ , создаваемом действующим зарядом). При этом  $\vec{A}$  – есть приведенный (к скорости  $c$ ) поток потенциала  $\phi$ , обусловленный движением заряда (или приведенный поток удельной энергии).

В заключение 1-й части остается процитировать Г. Минковского [9], чтобы уточнить, что имеется в виду при утверждении о "ковариантности" системы УМ или пространственно-временного вектора 2-го рода (по терминологии Г.Минковского) при преобразованиях Лоренца (ПЛ). Минковский называет это утверждение теоремой Лоренца об относительности: "Как известно, запись уравнений I – IV в обозначениях векторного анализа делает наглядной инвариантность (или, точнее, ковариантность) системы уравнений A так же, как и системы уравнений B (системы УМ – Н.Шитов) относительно поворота системы координат вокруг начала". На самом деле это утверждение означает лишь сохранение антисимметричности матрицы M тензора электромагнитного поля при ортогональных преобразованиях, так как сами компоненты матрицы (ортогональные движению) изменяются при ПЛ по формулам  $E_{\perp} = \gamma(E_{\perp} + \beta H_{\perp})$ ,  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$  и т.д. Однако, это утверждение тривиально, так как свойства симметричности и антисимметрич-

ности матрицы сохраняются при конгруэнтных преобразованиях, в частности ортогональных, т.е. преобразованиях вида:  $\tilde{M} = T^* M T$  ( $T'$  – транспонированная матрица) [6]. Это означает, что  $M$  "ковариантна" в таком смысле относительно любых конгруэнтных преобразований Галилея, записанных в матричной форме (определение матрицы  $G$  зависит от определения матрицы  $\tilde{M}$ , точнее, вид обеих матриц зависит от последовательности нумерации координат!). При этом поля изменяются в соответствии с формулами (1.8), т.е. без множителя  $\gamma$ . Кроме того, если при ПЛ одновременно изменяются как электрическое, так и магнитное поле, то при ПГ электрическое поле (в соответствии с (1.8)) изменяется при преобразовании  $G^* M G^*$ , а магнитное – при преобразовании  $G^* M G'$ . На самом деле мы видели, что при ПГ меняются как  $\tilde{E}$ , так и  $\tilde{H}$  в соответствии с (1.8). Но это изменение при формальном конгруэнтном преобразовании обеспечивается как матрицей  $M$ , представляющей собой матрицу переменных

двух первых УМ, так и  $K$ , представляющей собой соответствующую матрицу двух последних. Так как  $K$  обратна  $M$  с точностью до мультипликативной константы ( $\tilde{E}, \tilde{H}$ ), то это означает, что система УМ в некотором смысле избыточна – достаточно лишь первых двух уравнений, т.е. поле  $\tilde{H}$  играет вспомогательную роль.

Таким образом, УМ инвариантны (ковариантны) относительно ПГ не только в смысле утверждения из [4], но и в смысле утверждения Минковского. Вместе с тем, применение ПЛ дает при решении конкретных задач определенные, чисто технические, преимущества. В следующих частях данной работы эти преимущества будут частично выявлены. Основное внимание при этом будет уделено трансформации волнового уравнения (или оператора Даламбера) и его решения при ПГ, т.к. именно это, применительно к оптике, и является фактически предметом спора между сторонниками и противниками СТО. Естественно будет приведено и строгое решение для "включающегося в начальный момент" поля равномерно движущегося заряда, дающее однозначный ответ на вопрос о зависимости скорости распространения взаимодействия от состояния движения источника в соответствии

с электродинамикой Максвелла. Следует подчеркнуть, что СТО является самостоятельной, законченной теорией, не нуждающейся при своем обосновании в ссылках на электродинамику Максвелла, но отражающей в определенном смысле ее специфику.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. – М.: Мир, 1976.
2. **Cornille P.** Review of the application of Newton's third law in physics. – Progress in energy and combustion science, 1999, v.25, p.161.
3. **Øyvind Grøn, Kjell Vøyenli.** On the Foundation of the Principle of Relativity. – Foundations of Physics, 1999, v. 29, №11.
4. **Савельев И.** Основы теоретической физики. Т. 1. – М.: Наука, 1975.
5. **Болотовский Б. Столяров С.** Поля источников излучения в движущихся средах. – В кн.: Эйнштейновский сборник 1978–1979. – М.: Наука, 1983.
6. **Einstein A.** Ann.Phys. (Leipzig), 1905, Bd 17, S 891 (v.1 – p.7).
7. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике. – М.: Наука, 1974.
8. **Тамм И.** Основы теории электричества. – М.: Наука, 1976.
9. **Минковский Г.** Основные уравнения электромагнитных процессов в движущихся телах. – В кн.: Эйнштейновский сборник 1978–1979. – М.: Наука, 1983.

\* Читатель сам может легко проделать эти вычисления, чтобы убедиться в справедливости данного утверждения, разъяснение же физического смысла преобразования требует значительного объема и не будет здесь приведено.