

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.332:537.8

Н. А. КОСТИН^{1*}

^{1*}Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 37

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ПЕРЕДАЧИ И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В УСТРОЙСТВАХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

Цель. Теоретическое обоснование «полевого» (на основе электромагнитного поля) подхода к передаче и образованию потерь электроэнергии в устройствах систем тягового электроснабжения и электроподвижного состава. **Методика.** Используются методы теории электромагнитного поля и, в частности, теория и практика передачи электромагнитной энергии на основе понятия вектора Пойнтинга и элементов теории распространения, отражения и преломления плоских электромагнитных волн. **Результаты.** Выполнены теоретические исследования передачи электромагнитной энергии от тяговой подстанции до электроподвижного состава по диэлектрику (воздуху), окружающему тяговую сеть (между контактным проводом и рельсом). Предложено стратегически конструировать «приземистые» (невысокие) типы электроподвижного состава. Оценены составляющие потока электроэнергии сквозь крышу электроподвижного состава и его лобовую часть кузова, что позволило достоверно оценить активные потери мощности в системе электротяги. Для компенсации реактивной мощности, потребляемой электроподвижным составом и обусловленной стоячими волнами, предложено (для гашения последних) создавать и помещать перед электроподвижным составом слой определённой среды с необходимыми параметрами. **Научная новизна.** Впервые предложен «полевой» принцип анализа передачи электроэнергии и возникновения её потерь в системах электрической тяги. Установлены закономерности движения потоков электромагнитной энергии через крышу и лобовую часть кузова электроподвижного состава. **Практическая значимость.** Получено выражение абсолютной величины вектора Пойнтинга в точках диэлектрика (воздуха) между контактным проводом и рельсом, позволяющее оценить наибольшую плотность энергии, передаваемой в единицу времени, и спрогнозировать основные габаритные размеры единицы электроподвижного состава. Численно оценены энергетические показатели крыши кузова электроподвижного состава, через которую проникают электромагнитные волны при переносе электроэнергии.

Ключевые слова: электроэнергия; передача; потери; вектор Пойнтинга; контактные провода; рельсы; электроподвижной состав; электромагнитные волны

Введение

Существующие научные публикации, в которых излагаются результаты исследований электроэнергетических процессов в системах электрической тяги, базируются на «цепном подходе», т.е. на теории линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей, хотя, по существу, все электромагнитные и электроэнергетические процессы при их полном и детальном изучении требуют «полевого» подхо-

да, основывающегося на теории электромагнитного поля. По нашему мнению, именно это является едва ли не основной причиной недостаточного объяснения хода ряда процессов или существующих фактов в электроэнергетике. Именно «цепной» подход сужает, ограничивает возможности научного управления энергетическими процессами. В этом плане многое необъяснимо, например, в проблеме «утечки», т.е. потерь электроэнергии в системах электротяги,

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

о чем свидетельствует разница показаний счетчиков электроэнергии тяговых подстанций (ТП) и электроподвижного состава (ЭПС). Этим потерям даже дано название – «условные потери» и они директивно нормируются Главным Управлением локомотивного хозяйства Укрзализныци. И хотя ряд авторов [4] пытаются обосновать причины появления и изменения этих потерь, однако, по нашему мнению, используемые или аргументы являются неубедительными. Не исключено, что и дополнительные (непроизводительные) потери электроэнергии в подсистемах электрической тяги [7, 8] могут получить более убедительное, чем существующее, объяснение.

И, наконец, главное в обосновании вышеизложенного. Согласно основам теоретической электротехники, электромагнитная энергия (электроэнергия) передается от источника (тяговой подстанции) к потребителю (электроподвижному составу) не по проводам (т.е. не по электрической цепи), а по диэлектрику (воздуху) между (и за) проводами и она переносится не током, а электромагнитным полем, т.е. электромагнитными волнами.

В этой связи автор работы излагает свое мнение о ряде электроэнергетических вопросов, касающихся передачи энергии в системах электрической тяги. Для этого вспомним, что, как известно из теоретической электротехники, количественно и по направлению передача электроэнергии (заметим, и информации) по диэлектрику характеризуется вектором Пойнтинга \vec{P} [2, 10, 12]:

$$\vec{P} = [\vec{E} \vec{H}], \quad (1)$$

где \vec{E} и \vec{H} – векторы напряженностей электрического и магнитного полей в точках диэлектрика. Направление вектора \vec{P} , т.е. направление перемещения электроэнергии в данной точке, совпадает с поступательным движением правоходового винта при вращении системы векторов $\vec{E} - \vec{H}$ от вектора \vec{E} к вектору \vec{H} в сторону меньшего угла между ними.

Цель

Теоретическое обоснование процесса передачи и образования потерь электроэнергии в устройствах систем электрического транспор-

та на основе теории электромагнитного поля, с использованием известного понятия вектора Пойнтинга. Численная оценка потоков электроэнергии, поступающей от тяговой подстанции и входящей в электроподвижной состав через металлические части его кузова, что позволит достоверно определить активные потери мощности в устройствах системы электротяги.

Методика оценки отраженных и преломленных электромагнитных волн

Как известно [3, 5], если плоская синусоидально изменяющаяся электромагнитная волна, движущаяся в среде 1 с параметрами ϵ_{a1} , μ_{a1} , γ_1 встречает на своем пути поверхность другой среды 2 с параметрами ϵ_{a2} , μ_{a2} , γ_2 и эта волна падает (падающая волна, имеющая напряженности $\vec{E}_{\text{пад}}$, $\vec{H}_{\text{пад}}$) перпендикулярно границе сред, то она частично отражается $\vec{E}_{\text{от}}$, $\vec{H}_{\text{от}}$ с коэффициентом отражения $\rho_{\text{от}}$

$$\rho_{\text{от}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (2)$$

и при этом

$$\vec{E}_{4\tau}, \quad (3)$$

$$\vec{H}_{\text{от}} = -\rho_{\text{от}} \vec{H}_{\text{пад}}, \quad (4)$$

а частично проникает (проходит, преломляется) $\vec{E}_{\text{пр}}$, $H_{\text{пр}4} = 1,42 H_{\text{пад}1}$ в другую среду 2 с коэффициентом прохождения (преломления) $\bar{P}_{\text{кр}}$, определяемым:

– для волн напряженности электрического поля по выражению

$$\rho_{\text{пр}}^E = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \quad (5)$$

при этом

$$\vec{E}_{\text{пр}} = \rho_{\text{пр}}^E \vec{E}_{\text{пад}}; \quad (6)$$

а для волн напряженности магнитного поля по формуле

$$\rho_{\text{пр}}^H = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (7)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

при этом

$$\vec{H}_{\text{пр}} = \rho_{\text{пр}}^H \cdot \vec{H}_{\text{пад}}, \quad (8)$$

где Z_1, Z_2 – в общем случае комплексные волновые сопротивления сред 1 и 2, определяемые:

– для диэлектриков как

$$Z_{\text{диэл}} = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}}, \quad (9)$$

являющейся величиной вещественной;

– для проводящей среды по выражению

$$Z_{\text{пров.ср.}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_a}{\gamma}} e^{j45^\circ}, \quad (10)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота синусоидально изменяющихся напряжения и тока, создающих электромагнитное поле (волны).

Из выражений (2), (9) и (10) вытекает, что, если среды 1 и 2 имеют одинаковые параметры, то отраженная волна отсутствует и в среде 1 имеет место только падающая волна, а в среде 2 – только преломленная.

Независимо от угла падения падающей волны на границу раздела сред 1 и 2, преломленная

волна распространяется в проводящей среде, во-первых, всегда в направлении нормали к границе раздела сред и, во-вторых, эта волна затухает на глубине δ , определяемой по выражению

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma_2\mu_{a2}}}. \quad (11)$$

И, наконец, последнее замечание: так как волны, отражаясь, не изменяют осей векторов, а только могут изменять их знак, то вместо соответствующих векторов \vec{E} и \vec{H} можно рассматривать их векторные модули.

Результаты

Поток энергии в воздухе между контактной сетью и рельсом.

Рассмотрим передачу электроэнергии от тяговой подстанции до ЭПС по фидерной зоне с односторонним питанием постоянным током I , с наиболее распространенной контактной подвеской 2МФ – 100 + А185 и рельсом Р65 (рис. 1).

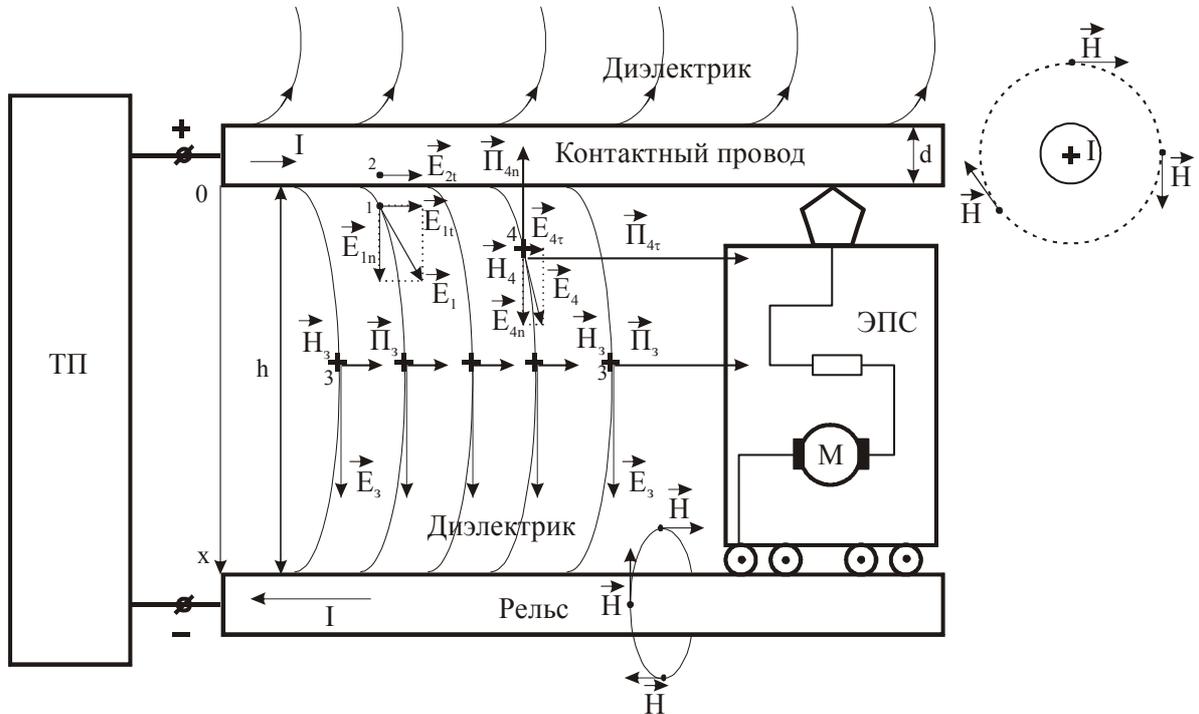


Рис. 1

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Електромагнитное поле в диэлектрике (воздухе), окружающем контактную сеть, описывается системой уравнений [2]:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = 0, \quad (12)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0, \quad (13)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (14)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \operatorname{div} \varepsilon_a \vec{E} = 0, \quad (15)$$

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H}, \quad (16)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_a \vec{E}, \quad (17)$$

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} V. \quad (18)$$

Уравнение (13) свидетельствует о том, что электрическое поле в воздухе безвихревое, т.е. потенциальное, и поэтому справедливо уравнение (18). Приняв, что диэлектрическая среда однородная, т.е. $\varepsilon_a = \text{const}$, и подставив (18) в (15), получим уравнение Лапласа

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0, \quad (19)$$

которому подчиняется потенциал $V(x, y, z)$ в каждой точке диэлектрика тяговой сети системы. В первом приближении будем считать, что потенциал V изменяется только в зависимости от координаты x , т.е. от контактной подвески до рельса (рис. 1), тогда (19) упростится:

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = 0. \quad (20)$$

Решение уравнения (20) возможно при заданных граничных условиях. Таким условием является равенство касательных составляющих напряженности электрического поля (рис. 1): $\vec{E}_{1t} = \vec{E}_{2t}$. Составляющая \vec{E}_{2t} в проводнике может быть определена из известного выражения:

$$E_{2t} = \frac{J}{\gamma},$$

где J – плотность тока в контактной сети; γ – удельная электропроводность материала сети.

Например, фидерный ток при одном поезде, ведомым электровозом ДЭ1, не превышает $I = 2000$ А, а поперечное сечение эквивалент-

ной контактной подвески 2МФ – 100 + А185 может быть найдено согласно [6] как

$$S_{\text{эк}} = 2 \cdot 100 + \frac{185}{1,7} = 308,82 \text{ мм}^2 = 308,82 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

$$\text{Тогда: } J = \frac{I}{S_{\text{эк}}} = \frac{2000}{308,82 \cdot 10^{-6}} = 6,48 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Приняв величину γ для меди равную $5,8 \cdot 10^7 \text{ См/м}$, находим, что

$$E_{2t} = \frac{6,48 \cdot 10^6}{5,8 \cdot 10^7} = 0,112 \text{ В/м}.$$

В тоже время нормальная составляющая напряженности \vec{E}_{1n} в диэлектрике $E_{1n} \gg \frac{U}{h}$ (рис. 1), т.к. поле в диэлектрике неоднородное и наиболее сильное около проводов подвески. Приняв h максимальным (согласно ПТЭ), находим:

$$E_{1n} \gg \frac{3300}{6,8} = 485,3 \text{ В/м}.$$

Следовательно, E_{1t} , равное E_{2t} и равное $0,112 \text{ В/м}$, меньше E_{1n} в $4,3 \cdot 10^3$ раза. Следовательно, при расчете электрического поля в воздухе вокруг подвески составляющей \vec{E}_{1t} можно пренебречь и пользоваться граничным условием электростатики, т.е. условием эквипотенциальности поверхности проводника. При этом условии выполним решение уравнения (20):

$$\frac{dV(x)}{dx} = C_1;$$

$$V(x) = C_1 x + C_2, \quad (21)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования.

Согласно рис. 1, при $x=0$ $V=U$, а при $x=h$; $V=0$. Тогда из (21) имеем:

$$V(x=0) = U = C_1 \cdot 0 + C_2, \text{ т.е. } C_2 = U.$$

$$\text{Одновременно: } V(x=h) = 0 = C_1 h + U,$$

$$\text{откуда } C_1 = -\frac{U}{h}.$$

Тогда окончательно имеем:

$$V(x) = -\frac{U}{h} x + U, \quad (22)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

а напряженность в воздухе между контактной подвеской и рельсом

$$E(x) = -gradV(x) = -\frac{dV}{dx} = \frac{U}{h}. \quad (23)$$

Напряженность магнитного поля найдем, пользуясь законом полного тока (рис. 1) $H \cdot 2\pi r_0 = I$ с учетом того, что $r_0 = x + d/2$, имеем

$$H(x) = \frac{I}{2\pi(x + d/2)}, \quad (24)$$

где d – диаметр эквивалентного провода подвески.

При дальнейшем энергетическом анализе учтем, что к напряженности $H(x)$, определяемой по формуле (24) и созданной эквивалентным проводом контактной подвески, следует прибавить составляющую, созданную током в рельсах; выражения для результирующей напряженности в любой точке (двухпроводной линии электропередач) можно найти, например, в [1].

Подставив (23) и (24) в (1), получаем в первом приближении (без учета \vec{H} , создаваемом током в рельсе) выражение абсолютной величины вектора Пойнтинга \vec{P} в точках диэлектрика (воздуха) между контактной подвеской и рельсом:

$$|P| = \frac{U I}{2\pi h(x + d/2)}. \quad (25)$$

В точках 1, 2, 3 и 4 (рис. 1) вектор \vec{H} направлен за плоскость листа, а направление вектора \vec{E} такое, как показано на рис. 1; при этом \vec{E}_4 раскладывается на две составляющие: касательную \vec{E}_{4t} и нормальную \vec{E}_{4n} к поверхности провода. Тогда, учитывая изложенное выше правило направления вектора Пойнтинга \vec{P} , можно сделать следующие выводы (рис. 1).

1. В точке 3, т.е. в средней части пространства тяговой сети вектор \vec{P}_3 , т.е. поток энергии, полностью направлен от ТП до ЭПС.

2. В точке 4 составляющая \vec{E}_{4n} и вектор \vec{H}_4 , согласно (1), обуславливают образование

составляющей вектора Пойнтинга \vec{P}_{4t} , который также имеет направление к нагрузке (ЭПС).

3. Также в т. 4 составляющая \vec{E}_{4t} и \vec{H}_4 образуют нормальную составляющую \vec{P}_{4n} , направленную из диэлектрика (воздуха) в проводник. На границе с проводником падающая из воздуха электромагнитная волна (\vec{E}_{4t}, \vec{H}_4) частично отражается от поверхности провода, а частично проходит (преломляется) в него; определим отраженную волну.

Для воздуха, являющегося средой 1, волновое сопротивление равно:

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{8,854 \cdot 10^{-12}}} = 376,7 \text{ Ом}$$

Средой 2 является проводящая среда – эквивалентный провод контактной сети 2МФ – 100 + А185. Сечение этого провода, найденное выше, равно $308,82 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. При этом диаметр провода составит 19,83 мм, удельная электропроводность

$$\gamma_2 = \gamma_{\text{эк.пр.}} = 5,0 \cdot 10^7 \text{ См/м}, \text{ а } \mu_{r2} = 1,0.$$

Фидерный ток является выпрямленным, шести- или двенадцатипульсирующим; в нем преобладают гармоники от 300 до 2 400 Гц. Тогда волновое сопротивление материала эквивалентного провода, согласно (10), будет равно

$$\begin{aligned} Z_2 &= \sqrt{\frac{2\pi \cdot 2000 \cdot 1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{5 \cdot 10^7}} = \\ &= 177,6 \cdot 10^{-7} \cdot e^{j45^\circ} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Определим коэффициент отражения на границе «воздух – поверхность провода» по выражению (2):

$$\rho_{\text{от12}} = \frac{177,6 \cdot 10^{-7} \cdot e^{j45^\circ} - 376,7}{177,6 \cdot 10^{-7} \cdot e^{j45^\circ} + 376,7} \approx -1.$$

Тогда, согласно (3) и (4), напряженности поля отраженной волны:

$$\vec{E}_{\text{от1}} \approx -\vec{E}_{\text{пад1}};$$

$$\vec{H}_{\text{от1}} \approx \vec{H}_{\text{пад1}}.$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

То есть, отраженная волна почти полностью отражаясь, меняет знак у вектора \vec{E} .

Коэффициенты преломления, согласно (5) и (7), составят:

$$\rho_{\text{пр}2}^E = \frac{2 \cdot 177,6 \cdot 10^{-7} \cdot e^{j45^\circ}}{177,6 \cdot 10^{-7} \cdot e^{j45^\circ} + 376,7} \approx 0,94 \cdot 10^{-7} e^{j45^\circ},$$

$$\rho_{\text{пр}2}^H = \frac{2 \cdot 376,7}{177,6 \cdot 10^{-7} \cdot e^{j45^\circ} + 376,7} \approx 20.$$

Несмотря на полученные значения коэффициента $\rho_{\text{пр}}$, часть падающей волны преломляется и проходит согласно (11) в провод на глубину δ :

4,11 мм – синусоидальная волна частоты 300 Гц;

1,45 мм – синусоидальная волна частоты 2 400 Гц.

Таким образом, эквивалентный провод диаметром $d = 19,83$ мм контактной подвески является «непроницаемым» для волны; она затухает на глубине 1,45...4,11 мм. Энергия этой волны расходуется на тепловые потери в проводе, возникающие при протекании в нем фидерного тока.

4. Согласно (25), наибольшая плотность электроэнергии в единицу времени передается в пространстве малых значений x (см. рис. 1), то есть в пространстве вокруг проводов контактной сети и рельса.

Можно показать, что такое же состояние по направлению электроэнергии наблюдается и в пространстве выше контактной сети, и в подрельсовом основании с землей; только значения вектора \vec{P} будут другие, учитывая неоднородность всей тяговой сети.

Учитывая вышеизложенное и выражение (25), можно высказать следующие стратегические предложения относительно устройств систем электрической тяги. Согласно (25), с уменьшением величины h , т.е. с уменьшением расстояния между контактными проводами и головкой рельса, возрастает плотность электроэнергии, передаваемой от ТП к ЭПС. Согласно ПТЭ, $h_{\text{max}} = 6,8$ м, а $h_{\text{min}} = 5,75$ м. Следовательно, в проектируемых системах электротяги целесообразно уменьшать h , а соответственно конструировать невысокие «приземистые» (но,

вероятно, удлиненные) типы ЭПС. В этом предложении нет ничего необычного, если учесть, что одним из важнейших показателей технического прогресса в настоящее время является уменьшение пространства, занимаемого электромагнитным устройством [9, 13], ведь недаром создаются микроЭВМ, микромашины (электрические), различного рода микроаппараты и пр. В энергетическом плане для решения указанных устройств целесообразно ввести коэффициент использования конструкционного пространства η :

$$\eta = \frac{P_{\text{min}}}{P_{\text{max}}}, \quad (26)$$

$$0 \leq \eta \leq 1.$$

Поток электроэнергии сквозь ввод в крыше и собственно крышу ЭПС.

Из общего потока электроэнергии, поступающей (несущий волнами) к ЭПС из воздушного пространства тяговой сети можно выделить два потока: основной и второстепенный. Основной – поток энергии, представляющий существенно наибольшую часть энергии, получаемой ЭПС. Он концентрируется вокруг проводов тяговой сети и поступает в электрооборудование высоковольтной камеры через крышевой проходной изолятор, т.е. поверхность крыши (рис. 2), и через нижнюю часть камеры из пространства вокруг рельса. Второстепенный – это поток электроэнергии, несущий волнами, которые падают на лобовую часть кузова ЭПС, состоящую, в свою очередь, из металлической и диэлектрической (стекло кабины) частей (рис. 2). Для дальнейшего анализа (согласно рис. 2) дадим следующую нумерацию сред, в которых распространяются волны, неся электроэнергию:

1 – воздух вокруг проводов (и рельса) тяговой сети;

2 – эквивалентный провод к.с.;

3 – рельс;

4 – изолятор крышевой проходной;

5 – металл крыши;

6 – воздух в высоковольтной камере;

7 – стекло кабины;

8 – металлическая часть.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

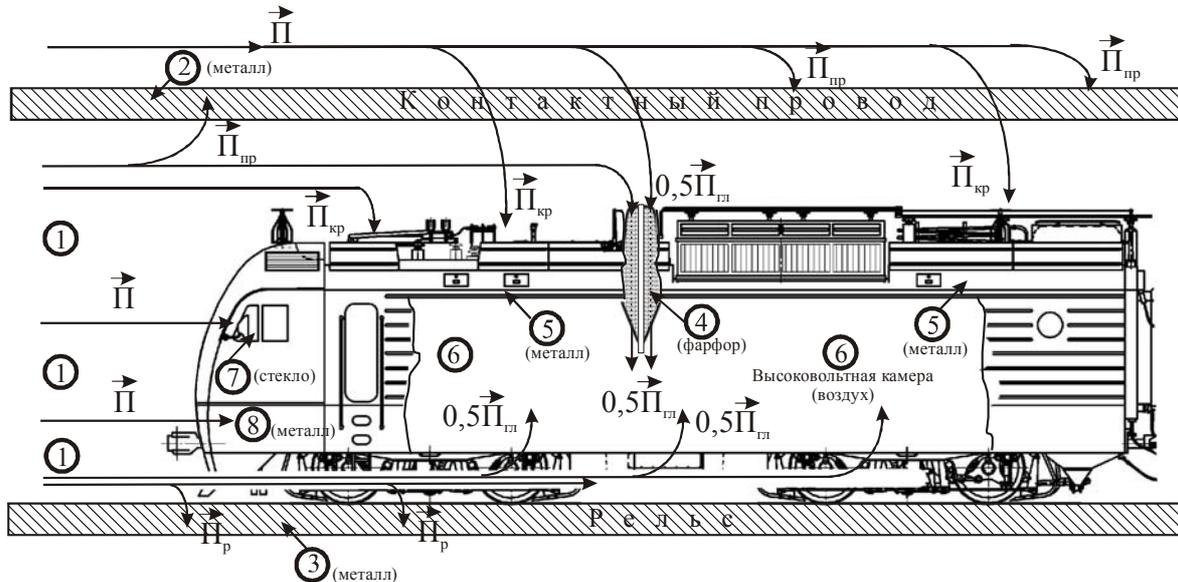


Рис. 2

Вначале рассмотрим основной поток, в котором можно выделить следующие составляющие вектора Пойнтинга, несущие этот поток (рис. 2).

1. Главный вектор $(0,5 \vec{P}_{гл})$, соответствующий плотности потока энергии, поступающей в элементы силовой тяговой цепи ЭПС (в высоковольтную камеру) через проходной крышевой фарфоровый изолятор. Для анализа электромагнитных волн, несущих $\vec{P}_{гл}$, определим коэффициенты отражения $\rho_{от14}$ и преломления $\rho_{пр14}$ на границе «воздух 1 – фарфор 4». Для идеальных диэлектриков, какими принимаем воздух ($\epsilon_{r1}=1,0$) и фарфор ($\epsilon_{r4}=6,0$), формулы (2) и (5) для $\rho_{от}$ и $\rho_{пр}$ упрощаются:

$$\rho_{от14} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r4}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r4}}} = \frac{\sqrt{1} - \sqrt{6}}{\sqrt{1} + \sqrt{6}} = -0,42,$$

$$\rho_{пр4}^E = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r4}}} = \frac{2\sqrt{1}}{\sqrt{1} + \sqrt{6}} = 0,58.$$

Следовательно: $E_{от14} = -0,42E_{пл1}$;

$$\rho_{пр4}^H = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r4}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r4}}} = 1,42.$$

$$H_{от14} = -(0,42 H_{пл1}) = 0,42 H_{пл1}$$

$$E_{пр4} = 0,58 E_{пл1};$$

$$H_{пр4} = 1,42 H_{пл1}.$$

Как видим, часть энергии отражается от изолятора. Чтобы эта часть была минимальной, необходимо этот изолятор подбирать с ϵ_r , близкой к $\epsilon_r = 1,0$.

Вторая половина $\vec{P}_{гл}$ (рис. 2) поступает в высоковольтную камеру ЭПС из пространства вокруг рельса (т.е. «снизу» ЭПС). Распространение волн в этом пространстве и передачу по нему электроэнергии требует более глубокого анализа, который здесь пока что не приводится.

2. Вектор мощности (Пойнтинга) $\vec{P}_{кр}$, проникающий в металлическую крышу ЭПС сквозь ее поверхность (рис. 2). Вектор $\vec{P}_{кр}$ направлен по нормали к поверхности. Материал крыши – листовая конструкционная сталь толщиной 2 мм с параметрами: $\gamma = 7 \cdot 10^6 \text{ См/м}$; $\mu_r = 1000$.

Электромагнитные гармонические волны различных частот, падая из воздуха 1 на границу с поверхностью металлической крыши 5 (рис. 2), частично отражаются, а частично про-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

никают в металл крыши, постепенно затухая и одновременно обуславливая потери электро-энергии в металле крыши.

Волновое сопротивление металла крыши \underline{Z}_5 , найденное по выражению (10) для $f = 2\ 400$ Гц, составляет $164,4 \cdot 10^{-5} e^{j45^\circ}$ Ом, а воздуха $-\underline{Z}_1 = 376,7$ Ом. Подставив \underline{Z}_1 и \underline{Z}_5 в (2), получаем коэффициент отражения волн от поверхности крыши $\rho_{om15} \approx -1$, а подставив в (5) – коэффициент преломления $\rho_{np15} \approx 0,87 \cdot 10^{-5} e^{j45^\circ}$. Глубина δ_5 , на которую проникает волна частотой $2\ 400$ Гц, составляет $0,128$ мм, частотой 600 Гц – $0,246$ мм, а частотой 50 Гц – $0,85$ мм. Следовательно, т.к. толщина стального листа крыши равна 2 мм, а $\delta_{5max} = 0,85$ мм, то металл крыши является «непроницаемым» для волн, т.к. волна затухает полностью, не доходя до противоположной поверхности. Это значит, что металлический лист крыши можно рассматривать как бесконечно толстый лист или как бесконечное электропроводящее полупространство, мощность, рассеиваемая в котором, равна вектору Пойнтинга на поверхности (листа) крыши $\vec{P}_{кр}$, умноженному на эту поверхность $S_{кр}$.

Комплексный вектор Пойнтинга на поверхности листа определяется выражением [9]:

$$\underline{P}_S = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega \mu_a}{2\gamma}} \frac{H_{mS}^2}{2}, \quad (27)$$

его активная составляющая

$$P_P = \alpha_P \sqrt{\frac{\omega \mu_a}{2\gamma}} \frac{H_{mS}^2}{2}, \quad (28)$$

также реактивная составляющая

$$P_Q = \alpha_Q \sqrt{\frac{\omega \mu_a}{2\gamma}} \frac{H_{mS}^2}{2}, \quad (29)$$

где для стали $\alpha_P = 1,4$, $\alpha_Q = 0,85$; H_{mS} – амплитуда гармонической напряженности магнитного поля на рассматриваемой поверхности.

Рассчитаем H_{mS} для одной гармоники частотой $f = 600$ Гц (для 12-пульсирующего тока); величина H_{mS} для одной этой гармоники

составила $955,5 \frac{A}{M}$. Тогда, подставив в (28) и (29) необходимые величины и параметры стального листа крыши, получим:

– потери активной мощности от одной гармоники на единицу поверхности крыши P_P равны $371,6 \frac{Вт}{M^2}$;

– потребление реактивной мощности $P_Q = 225,6 \frac{вар}{M^2}$.

Полная поверхность крыши одной секции ЭПС (электровоза) составляет ~ 50 м², примем за величину «среднеактивной» поверхности $S_{кр} \approx 25$ м². Тогда полные потери: $P = 9,3$ кВт, а $Q = 5,64$ квар, полная мощность $S = 12,25$ кВА. При этом энергетические показатели, согласно известных выражений [3], составили: коэффициент мощности крыши $\lambda = 0,76$, коэффициент реактивной мощности $tg\phi = 0,61$.

Поток энергии, падающей на лобовую часть кузова.

Электромагнитные волны, распространяющиеся в средней части воздушного пространства 1 между контактной сетью и рельсом, падают на лобовую часть кузова, состоящую из стекла и металлической (нижней) части (рис. 2, 7 и 8).

Лобовое стекло имеет толщину 15 мм и $\epsilon_{r7} = 5,5 \dots 10$ (примем $9,0$). На границе «воздух, 1 – стекло, 7» волны частично отражаются с коэффициентом

$$\rho_{от17} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r7}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r7}}} = \frac{\sqrt{1} - \sqrt{9}}{\sqrt{1} + \sqrt{9}} = -0,5,$$

а частично преломляются с коэффициентом

$$\rho_{пр7}^E = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r7}}} = \frac{2\sqrt{1}}{\sqrt{1} + \sqrt{9}} = 0,5.$$

Тогда $E_{от1} = -0,5E_{нд17}$; $E_{пр7} = -0,5E_{нд17}$.

Металлическая часть лобовой (нижней) части кузова ЭПС сконструирована из листов конструкционной стали толщиной 7 мм. И поэтому, подобно металлу крыши, также «непроницаема» для электромагнитных волн. И также, как в крыше, часть волны, проникая в металл,

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

будет создавать потери мощности [10], определяемые по формулам (27)–(29). Для их нахождения необходимо знание амплитуд гармоник напряженности магнитного поля H_{ms} у (на) поверхности металлической части кузова, которые здесь пока что не приводятся.

Научная новизна и практическая значимость

Впервые предложен и теоретически обоснован «полевой» (на основе теории электромагнитного поля) подход объяснения процессов передачи и образования потерь электрической энергии в устройствах систем тягового электроснабжения и электроподвижного состава. Подход базируется на понятиях распространения, отражения и преломления электромагнитных волн, энергетической характеристикой которых является вектор Пойнтинга. Установлены закономерности движения потоков электроэнергии от тяговой подстанции к тяговым электродвигателям электроподвижного состава через крышу и лобовую часть кузова.

Получены численные значения вектора Пойнтинга в различных точках каналов передачи энергий, позволившие оценить потери активной и реактивной энергии в металлических частях крыши и лобовой части. Численные результаты позволяют стратегически рекомендовать разрабатывать и производить новые типы электроподвижного состава – невысокие, «приземистые» (но, вероятно, удлинённые) и при этом несколько уменьшать расстояние от контактного провода до головки рельса.

Выводы

1. «Полевой» (на основе теории электромагнитного поля) подход к обоснованию передачи и образованию потерь электроэнергии в устройствах систем электрической тяги является более фундаментальным, и поэтому более достоверным, чем существующие «цепные» (на основании теории электрических цепей) принципы такого анализа.

2. Потоки электромагнитной энергии поступают от тяговой подстанции до электроподвижного состава, по воздуху между контактным проводом и рельсом, входя в высоковольтную камеру и далее в тяговые двигатели через части крыши и лобовые части кузова.

3. Электромагнитные волны падают из диэлектрика (воздуха) на поверхность проводящей (металлической) среды, поэтому в диэлектрике образуются стоячие волны, обуславливающие реактивную мощность, т.к. последняя является характеристикой стоячих волн. Поэтому для компенсации реактивной мощности необходимо гашение указанных волн путем образования перед электроподвижным составом слоя определенной среды с необходимыми параметрами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гольдштейн, Л. Д. Электромагнитные поля и волны / Л. Д. Гольдштейн. – М. : Советское радио, 1971. – 664 с.
2. Костін, М. О. Теоретичні основи електротехніки. Т. 3, ч. 2. / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна. – Д. : ДНУЗТ, 2011. – 352 с.
3. Костин, Н. А. Реактивная мощность в устройствах систем электрической тяги / Н. А. Костин // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – Д., 2010. – Вип. 34. – С.73–76.
4. Кузнецов, В. Г. Аналіз динаміки зміни «умовних» втрат електричної енергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк, Ю. М. Сергачий // Електрифікація трансп. – Д., 2011. – Вип. 1. – С. 42–45.
5. Лавров, В. М. Теория электромагнитного поля и основы распространения радиоволн / В. М. Лавров. – М. : Связь, 1964. – 368 с.
6. Маквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
7. Петров, А. В. Непродуктивні втрати електроенергії в тяговому електропостачанні системи постійного струму / А. В. Петров, М. О. Костін // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – Д., 2010. – Вип. 31. – С. 106–110.
8. Саблин, О. И. Дополнительные пульсационные потери мощности в силовых тяговых цепях ЭПС постоянного тока / О. И. Саблин // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – Д., 2007. – Вип. 18. – С. 38–41.
9. Туровский, Я. Техническая электродинамика / Я. Туровский. – М. : Энергия, 1974. – 488 с.
10. Kozlowski, M. Stray Losses and Local Overheating Hazard in Transformers / M. Kozlowski, J. Turowski // Transformers: Analysis, Design and Measurement (28.08.–06.09.1972) : Proc. of Intern. Conf. on Large High Tension Electric System. – Paris : CIGRE, 1972. – Rep. 12-10.
11. Turowski, J. Pole elektromagnetyczne i straty w obudowie transformatora / J. Turowski // Zesz.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

- Nauk, Politechniki Łódzkiej, "Elektryka". – 1957. – № 3. – P. 47–65.
12. Turowski, J. Obliczanie strat I temperatur w ekranie rurowym szyny / J. Turowski // Archiwum Elektrot. – 1963. – № 1. – P. 1–79.
13. Turowski, J. Wybór optymalnej grubości blachy elektrotechnicznej z punktu widzenia własności rdzenia. / J. Turowski // Przegląd Elektrot. – 1964. – № 8. – P. 361–366.

М. О. КОСТИН^{1*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 37

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА ПЕРЕДАЧІ ТА ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПРИСТРОЯХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ

Мета. Теоретичне обґрунтування «польового» (на основі електромагнітного поля) підходу до передачі й утворення втрат електроенергії в пристроях систем тягового електропостачання та електрорухомого складу. **Методика.** Використано методи теорії електромагнітного поля та, зокрема, теорія й практика передачі електромагнітної енергії на основі поняття вектора Пойнтінга та елементів теорії розповсюдження, віддзеркалення й заломлення плоских електромагнітних хвиль. **Результати.** Виконано теоретичні дослідження передачі електромагнітної енергії від тягової підстанції до електрорухомого складу діелектриком (повітрям), що оточує тягову мережу (між контактним проводом і рейкою). Запропоновано стратегічно конструювати «приземисті» (невисокі) типи електрорухомого складу. Оцінено складові потоку електроенергії крізь дах електрорухомого складу та його лобову частину кузова, що дозволило достовірно оцінити активні втрати потужності в системі електротяги. Для компенсації реактивної потужності, споживаної електрорухомим складом й обумовленою стоячими хвилями, запропоновано (для гасіння останніх) створювати та розмішувати перед електрорухомим складом шар певного середовища з необхідними параметрами. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано «польовий» принцип аналізу передачі електроенергії й виникнення її втрат у системах електричної тяги. Встановлено закономірності руху потоків електромагнітної енергії через дах і лобову частину кузова електрорухомого складу. **Практична значимість.** Отримано вираз абсолютної величини вектора Пойнтінга в точках діелектрика (повітря) між контактним проводом і рейкою, що дозволяє оцінити найбільшу густину енергії, передавану в одиницю часу, та спрогнозувати основні габаритні розміри одиниці електрорухомого складу. Чисельно оцінено енергетичні показники даху кузова електрорухомого складу, через який проникають електромагнітні хвилі при перенесенні електроенергії.

Ключові слова: електроенергія; передача; втрати; вектор Пойнтінга; контактні дроти; рейки; електрорухомий склад; електромагнітні хвилі

М. О. KOSTIN^{1*}

^{1*}Dep. «Electrical Technology and Electrical Engineering», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 37

ELECTRODYNAMICS OF TRANSMISSION AND LOSSES OF POWER IN THE DEVICES OF ELECTRIC TRACTION SYSTEMS

Purpose. Theoretical justification of the "field" approach (based on electromagnetic field) to the transmission and losses of power in the devices of traction power supply systems and electric rolling stock. **Methodology.** The methods of electromagnetic field theory and, in particular, the theory and practice of electromagnetic energy transmission based on the concept of the Poynting vector and elements of the theory of propagation, reflection and refraction of plane electromagnetic waves were used. **Findings.** Theoretical studies of electromagnetic energy transmission from the traction substation to the electric rolling stock through dielectric (air) surrounding traction network: between the contact wire and the rail were carried out. It is proposed strategic designing "squat" (low) types of electric rolling stock. The components of electric energy flow through the roof of electric rolling stock and its frontal part of the body were estimated. This allows reliable estimating active power losses in electric traction system. To compensate the reactive power consumed by electric rolling stock, which is conditioned by standing waves, it is proposed (for extinction of the the

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

last) to develop and put in front of electric rolling stock the layer of particular environment with the necessary parameters. **Originality.** The "field" principle of the power transmission analysis and its losses arising in electric traction system was first proposed. The laws of motion of electromagnetic energy flows through the roof and the frontal part of the body of electric rolling stock were established. **Practical value.** An expression of the absolute value of the Poynting vector in the points of dielectric (air) between the contact wire and the rail was obtained. This allows assessing the highest density of energy, which is transferred to the time unit and predicting the main dimensions of the unit of electric rolling stock. The energy indices of the roof of electric rolling stock, through which penetrate the electromagnetic waves during energy transferring were numerically evaluated.

Keywords: electric energy; transmission; losses; Poynting vector; contact wires; rails; electric rolling stock; electromagnetic waves

REFERENCES

1. Goldshteyn L.D. *Elektromagnitnyye polya i volny* [Electromagnetic fields and waves]. Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1971. 664 p.
2. Kostin M.O., Sheikina O.H. *Teoretychni osnovy elektrotekhniki. T.3, ch. 2.* [Theoretical foundations of electric engineering]. Dnipropetrovsk, DNUZT Publ., 2011. 352 p.
3. Kostin N.A. Reaktivnaya moshchnost v ustroystvakh sistem elektricheskoy tyagi [Reactive power in the devices of electric traction systems]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport], 2010, issue 34, pp. 73-76.
4. Kuznetsov V.H., Kyryliuk T.I., Serhatyi Yu.M. Analiz dynamiky zminy «umovnykh» vtrat elektrychnoi enerhii v tiahovii merezhi [Dynamics analysis of the change of “conventional” losses of electric energy in traction network]. *Elektryfikatsiia transportu – Transport Electrification*, 2011, issue 1, pp. 42-45.
5. Lavrov V.M. *Teoriya elektromagnitnogo polya i osnovy rasprostraneniya radiovoln* [Ectromagnetic field theory and the foundations of radio wave distribution]. Moscow, Svyaz Publ., 1964. 368 p.
6. Makvardt K.G. *Elektrosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Electric power supply of the electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.
7. Petrov A.V., Kostin M.O. Neproduktyvni vtraty elektroenerhii v tiahovomu elektropostachanni systemy postinoho strumu [Unproductive power losses in traction power supply of DC]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport], 2010, issue 31, pp. 106-110.
8. Sablin O.I. Dopolnitelnyye pulsatsionnyye poteri moshchnosti v silovykh tyagovykh tsepyakh EPS postoyannogo toka [Additional fluctuating power losses in power traction circuits of electric rolling stock of DC]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport], 2007, issue 18, pp. 38-41.
9. Turowskiy Ya. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical electrodynamics]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 488 p.
10. Kozlowski M., Turowski J. Stray Losses and Local Overheating Hazard in Transformers. Proc. of Int. Conf. on Large High Tension Electric System «Transformers: Analysis, Design and Measurement». Paris, 1972. Rep. 12-10.
11. Turowski J. Pole elektromagnetyczne i straty w obudowie transformatora. *Zesz. Nauk, Politechniki Łódzkiej, “Elektryka”*, 1957, no. 3, p. 47-65.
12. Turowski J. Obliczanie strat I temperatur w ekranie rurowym szyny. *Archiwum Elektrot*, 1963, no. 1, pp. 1-79.
13. Turowski J. Wybór optymalnej grubości blachy elektrotechnicznej z punktu widzenia wtasności rdzenia. *Przegląd Elektrot*, 1964, no. 8, pp. 361-366.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабцом (Украина); д.т.н., проф. Л. В. Дубинцом (Украина)

Поступила в редколлегию 28.11.2013

Принята к печати 09.01.2014