Хмельник С. И.

Структура потока электромагнитной энергии в проводе с постоянным током

Аннотация

Рассматривается структура потоков электромагнитной энергии в проводе, по которому идет постоянный ток. Показывается, что существует поток, направленный по радиусу к центру провода; поток, циркулирующий по окружности сечения провода; поток, направленный вдоль провода в направлении основного тока. Поток, направленный извне в боковую поверхность провода, отсутствует.

Оглавление

1. Введение

В [1] была описана структура постоянного тока магнитного поля в цилиндрическом проводе. Показано (на основе решения уравнений Максвелла), что в цилиндрических координатах $r,\ \varphi,\ z$ напряженности магнитного поля и плотности токов определены следующим образом:

$$H_r. = \frac{\alpha}{2} h_\varphi r \sin(\alpha\varphi), \tag{1}$$

$$H_\varphi. = h_\varphi r \cos(\alpha\varphi) + \frac{J_o r}{2} \tag{2}$$

$$H_z = -\frac{1}{2} j_\varphi r^2 \sin(\alpha\varphi), \tag{3}$$

$$J_r. = -\frac{\alpha}{2} j_\varphi r\cos(\alpha\varphi), \qquad (4)$$

$$J_\varphi. = j_\varphi r\sin(\alpha\varphi), \qquad (5)$$

$$J_z = J_o + h_\varphi\left(\left(1-\alpha^2/2\right)\cos(\alpha\varphi) - \alpha\sin(\alpha\varphi)\right), \qquad (6)$$

где при данных j_φ, h_φ, α - константы, а J_o – плотность тока источника напряжения – см. также приложение. Показано также, что вследствие принципа минимума тепловых потерь

$$j_\varphi = \pm h_\varphi \eta / R, \qquad (2)$$

где

$$\eta = \sqrt{\left(4+\alpha^4\right)/\left(1+\alpha^2/4\right)}. \qquad (8)$$

При этом плотность мощности тепловых потерь

$$P = \pi R^2 L\rho\left(J_o^2 + h_\varphi^2\left(1/4+\alpha^4/16\right)\right). \qquad (9)$$

Здесь R **-** внешний радиус провода, L - длину провода, ρ - удельное электросопротивление. Выбор знака в формуле (7) не рассматривался в [1], но будет рассмотрен ниже.

В [2] рассматривался поток электромагнитной энергии в проводнике с постоянным током. Ниже анализ структуры этого потока проводится более строго на основе найденной строго в [1] структуры постоянного тока.

2. Поток электромагнитной энергии

Плотность потока электромагнитной энергии – вектор Пойнтинга

$$S = E \times H. \qquad (10)$$

Совмещая (7, 31), получаем:

$$S = \rho J \times H. \qquad (11)$$

Магнитная сила Лоренца

$$F = J \times B, \qquad (12)$$

Следовательно, <u>в проводе с постоянным током магнитная сила Лоренца пропорциональна вектору Пойнтинга</u>. Точнее,

$$F = S/(\mu\rho), \qquad (13)$$

Для возникновения тока в проводнике кроме силы Лоренца должно выполняться еще одно условие: проводник должен быть замкнут. Следовательно, можно утверждать, что вектор Пойнтинга создает э.д.с. в проводнике. Этот вопрос с другой стороны рассмотрен в [3], где такая э.д.с. названа четвертым видом электромагнитной индукции. Формально эту э.д.с можно определить следующим образом.

Векторное произведение (11) в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\frac{S}{\rho} = J \times H = \begin{bmatrix} J_\varphi H_z - J_z H_\varphi \\ J_z H_r - J_r H_z \\ J_r H_\varphi - J_\varphi H_r \end{bmatrix} \tag{14}$$

Найдем слагаемые в (14), используя (1-6):

$$S_{r\varphi} = H_r J_\varphi = \frac{\alpha}{2} h_\varphi r \sin(\alpha\varphi) j_\varphi r \sin(\alpha\varphi) = h_\varphi j_\varphi \frac{\alpha}{2} r^2 \sin^2(\alpha\varphi) \tag{15}$$

$$S_{\varphi r} = H_\varphi J_r = -\left(h_\varphi r \cos(\alpha\varphi) + \frac{J_o r}{2} \right) j_\varphi \frac{\alpha}{2} r \cos(\alpha\varphi) \tag{16}$$

$$S_{rz} = H_r J_z = \frac{\alpha}{2} h_\varphi r \sin(\alpha\varphi) \left(J_o + h_\varphi \left(\left(1 - \alpha^2/2\right) \cos(\alpha\varphi) - \alpha \sin(\alpha\varphi) \right) \right), \tag{17}$$

$$S_{zr} = H_z J_r = \frac{1}{2} j_\varphi r^2 \sin(\alpha\varphi) \frac{\alpha}{2} j_\varphi r \cos(\alpha\varphi) = -j_\varphi^2 \frac{\alpha}{8} r^3 \sin(2\alpha\varphi), \tag{18}$$

$$S_{\varphi z} = H_\varphi J_z = \left(h_\varphi r \cos(\alpha\varphi) + \frac{J_o r}{2} \right) \left(J_o + h_\varphi \left(\left(1 - \alpha^2/2\right) \cos(\alpha\varphi) - \alpha \sin(\alpha\varphi) \right) \right), \tag{19}$$

$$S_{z\varphi} = H_z J_\varphi = -\frac{1}{2} j_\varphi r^2 \sin(\alpha\varphi) j_\varphi r \sin(\alpha\varphi) = -\frac{1}{2} j_\varphi^2 r^3 \sin^2(\alpha\varphi) \tag{20}$$

Используя (15-20), запишем проекции вектора (14):

$$S_{rfz} = \begin{bmatrix} S_r = J_\varphi H_z - J_z H_\varphi = -\frac{1}{2} j_\varphi^2 r^3 \sin^2(\alpha\varphi) - \\ -\left(h_\varphi r \cos(\alpha\varphi) + \frac{J_o r}{2} \right) \bullet \left(J_o + h_\varphi \left(\left(1 - \alpha^2/2\right) \cos(\alpha\varphi) - \alpha \sin(\alpha\varphi) \right) \right) \\ S_\varphi = J_z H_r - J_r H_z = \frac{\alpha}{2} J_o h_\varphi r \sin(\alpha\varphi) + \\ + \frac{\alpha}{2} h_\varphi^2 r \left(\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha^2}{4} \right) \sin(2\alpha\varphi) - \alpha \sin^2(\alpha\varphi) \right) + j_\varphi^2 \frac{\alpha}{8} r^3 \sin(2\alpha\varphi) \\ S_z = J_r H_\varphi - J_\varphi H_r = -j_\varphi \frac{\alpha}{2} r \cos(\alpha\varphi) \left(h_\varphi r \cos(\alpha\varphi) + \frac{J_o r}{2} \right) - \\ - h_\varphi j_\varphi \frac{\alpha}{2} r^2 \sin^2(\alpha\varphi) \end{bmatrix}$$

или

$$
S_{rfz} = \left[\begin{array}{l}
S_r = -\frac{1}{2} j_\varphi^2 r^3 \sin^2(\alpha\varphi) - \frac{J_o^2 r}{2} - J_o h_\varphi r \cos(\alpha\varphi) - \\
\qquad - \frac{J_o r}{2} h_\varphi \left(\begin{array}{l} \left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right) \cos(\alpha\varphi) \\ -\alpha \sin(\alpha\varphi) \end{array} \right) - h_\varphi^2 r \left(\begin{array}{l} \left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right) \cos^2(\alpha\varphi) \\ -\frac{\alpha}{2} \sin(2\alpha\varphi) \end{array} \right) \\
S_\varphi = \frac{\alpha}{2} J_o h_\varphi r \sin(\alpha\varphi) + \frac{\alpha}{8} j_\varphi^2 r^3 \sin(2\alpha\varphi) \\
\qquad + \frac{\alpha}{2} h_\varphi^2 r \left(\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha^2}{4} \right) \sin(2\alpha\varphi) - \alpha \sin^2(\alpha\varphi) \right) \\
S_z = -j_\varphi h_\varphi r^2 \frac{\alpha}{2} - j_\varphi J_o r^2 \frac{\alpha}{4} \cos(\alpha\varphi)
\end{array} \right] \tag{21}
$$

На рис. 11-13 показаны графики функций (21).

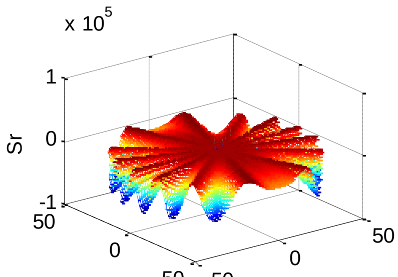

Fig. 11

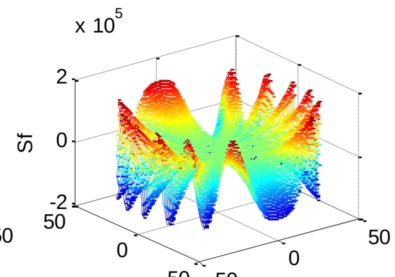

Fig. 12

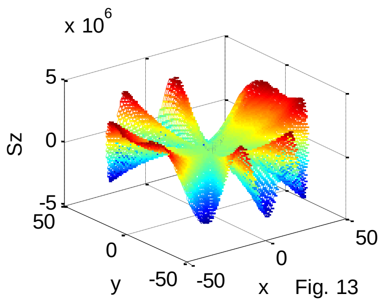

Fig. 13

Средняя на каждой окружности плотность потока электромагнитной энергии имеет вид (здесь верхней чертой обозначено среднее по окружности значение):

$$S_{rfz} = \left[\begin{array}{l} \overline{S_r} = -\dfrac{J_o^2 r}{2} - \dfrac{1}{2} j_\varphi^2 r^3 \overline{\sin^2(\alpha\varphi)} - h_\varphi^2 r \left(1 - \dfrac{\alpha^2}{2}\right) \overline{\cos^2(\alpha\varphi)} \\ \overline{S_\varphi} = -\dfrac{\alpha^2}{2} h_\varphi^2 r \overline{\sin^2(\alpha\varphi)} \\ \overline{S_z} = -j_\varphi h_\varphi r^2 \dfrac{\alpha}{2} \end{array} \right]$$

или

$$S_{rfz} = \left[\begin{array}{l} \overline{S_r} = -\dfrac{J_o^2 r}{2} - \dfrac{1}{2\sqrt{2}} j_\varphi^2 r^3 - \dfrac{h_\varphi^2 r}{\sqrt{2}} \left(1 - \dfrac{\alpha^2}{2}\right) \\ \overline{S_\varphi} = -\dfrac{\alpha^2}{2\sqrt{2}} h_\varphi^2 r \\ \overline{S_z} = -j_\varphi h_\varphi r^2 \dfrac{\alpha}{2} \end{array} \right] \tag{22}$$

На рис. 14 показаны графики функций (22).

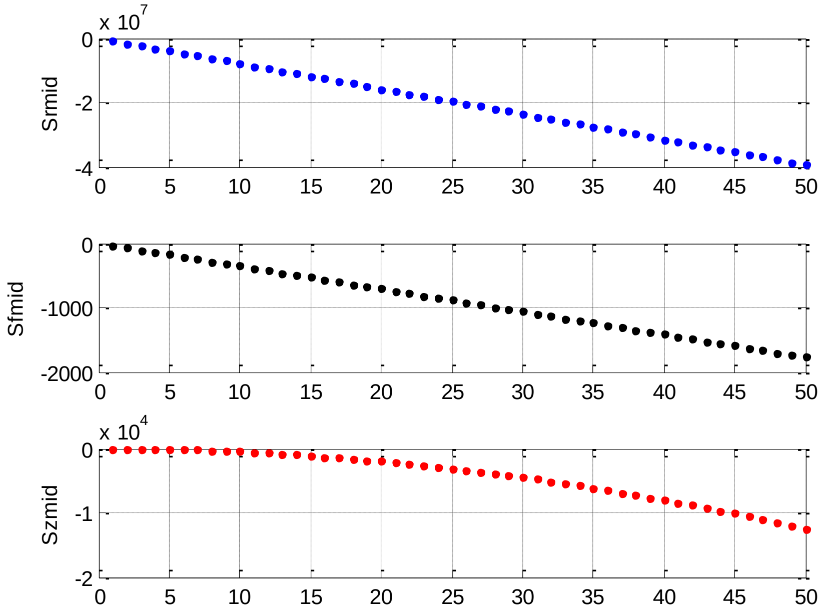

Fig. 14

3. Анализ результатов

Прежде всего, напомним, что по существующим представлениям в единицу длины провода поступает внешний поток энергии, направленный по радиусу к оси провода и имеющий величину

$$S_w = -\rho\pi R^2 J_o^2, \tag{23}$$

в точности равную мощности тепловых потерь в проводе единичной длины.

Из (22) следует, что существует средний по каждой окружности поток электромагнитной энергии S_{ro}, направленный по по радиусу к оси провода. На единице длины провода и через всю длину окружности этот поток определяется по (22):

$$\begin{aligned} S_{ro} &= 2\pi r\rho\overline{S_r} = 2\pi r\rho\left[-\frac{J_o^2 r}{2} - \frac{1}{2\sqrt{2}}\, j_\varphi^2 r^3 - \frac{h_\varphi^2 r}{\sqrt{2}}\left(1-\frac{\alpha^2}{2}\right)\right] = \\ &= -\rho\pi\left[J_o^2 r^2 + \frac{1}{\sqrt{2}}\, j_\varphi^2 r^4 + \sqrt{2} h_\varphi^2 r^2\left(1-\frac{\alpha^2}{2}\right)\right] \end{aligned} \tag{24}$$

На внешнем радиусе провода

$$S_{ro} = -\rho\pi\left[J_o^2 R^2 + \frac{1}{\sqrt{2}}\, j_\varphi^2 R^4 + \sqrt{2} h_\varphi^2 R^2\left(1-\frac{\alpha^2}{2}\right)\right]. \tag{25}$$

Видно, что это значение превышает общепринятое значение (23), колеблется по величине вдоль окружности и, главное, является результатом внутренних токов и напряженностей, т.е. **не** поступает извне.

Существует также средний по каждой окружности поток электромагнитной энергии $S_{\varphi o}$, направленный по окружностям сечения провода. На единице длины провода этот поток определяется по (22):

$$S_{\varphi o} = \rho\overline{S_\varphi} = -\frac{\rho\alpha^2 h_\varphi^2}{2\sqrt{2}} r \tag{26}$$

Этот поток, циркулирующий по всему сечению через весь радиус, равен интегралу от (26) по r, т.е.

$$S_{\varphi o all} = -\frac{\pi\rho\alpha^2 h_\varphi^2 R^2}{2\sqrt{2}}. \tag{27}$$

Существует также поток электромагнитной энергии S_{zo}, направленный вдоль оси провода. Это предсказывалось в [1]. На единице длины провода этот поток определяется по (22):

$$S_{zo} = \rho\overline{S_z} = -\frac{\alpha}{2}\rho j_\varphi h_\varphi r^2 \qquad (28)$$

Этот поток через все сечение равен интегралу от (28) по r, т.е.

$$S_{zoall} = -\frac{\rho\alpha j_\varphi h_\varphi R^3}{6} \qquad (29)$$

При выборе положительного знака в формуле (7), т.е. в том случае, если $j_\varphi < 0$ ток циркулирует по часовой стрелке, этот поток (29) направлен в сторону основного тока J_o. Учитывая (7, 29), получаем поток в каждом сечении провода:

$$S_{zoall} = \frac{\rho\alpha\eta h_\varphi^2 R^4}{6} \qquad (30)$$

Итак, в проводе циркулируют потоки S_{ro}, $S_{\varphi oall}, S_{zoall}$. Они являются внутренними. Они порождаются токами и магнитными напряженностями, создаваемые этими токами. В свою очередь, эти потоки возбуждают токи, как силы Лоренца. При этом энергия потоков расходуется на тепловые потери токов.

Вдоль провода идет поток S_{zoall}, величина которого остается неизменной на всей длине провода.

Приложение – таблица размерностей

Величина	Размерность в СИ
ρ (удельное сопротивление)	Om*m
J (плотность тока)	A/m^2
j_φ	A/m^3
H (магнитная напряженность)	A/m
h_φ	A/m^2
P (плотность мощности)	Om*A^2/m^2
S (плотность потока электромагнитной энергии)	Om*A^2/m^2
S_w, S_{ro}, S_{foall}	Om*A^2/m^2
S_r, S_f, S_z	A^2/m^3
S_{fo}, S_{zo}	Om*A^2/m^3
S_{zoall}	Om*A^2

Литература

1. Хмельник С.И. Структура постоянного тока, http://vixra.org/pdf/1503.0241v2.pdf
2. Хмельник С.И. Поток электромагнитной энергии в проводнике с постоянным током, «Доклады независимых авторов», изд. «DNA», ISSN 2225—6717, Россия – Израиль, 2015, вып. 32. ISBN 978-1-312-19894-4, printed in USA, Lulu Inc., ID 16319679; http://vixra.org/pdf/1503.0048v1.pdf
3. Хмельник С.И. Четвертая электромагнитная индукция, «Доклады независимых авторов», изд. «DNA», ISSN 2225—6717, Россия – Израиль, 2015, вып. 31. ISBN 978-1-312-90496-5, printed in USA, Lulu Inc., ID 16318950; http://vixra.org/pdf/1412.0214v3.pdf