Хмельник С. И.

Вторая структура постоянного тока

Аннотация

Рассматривается структура постоянного тока и потока электромагнитной энергии в проводе. Показывается, что ток распространяется **внутри** провода по спирали. При постоянной величине тока плотность спиральной траектории уменьшается по мере уменьшения оставшегося сопротивления нагрузки.

Оглавление

1. Введение

В [1-3] было показано, что постоянный ток в проводе имеет сложную структуру, а поток электромагнитной энергии распространяется **внутри** провода. При этом поток электромагнитной энергии

- направлен вдоль оси провода,
- распространяется вдоль оси провода,
- распространяется внутри провода,
- компенсирует тепловые потери осевой составляющей тока.

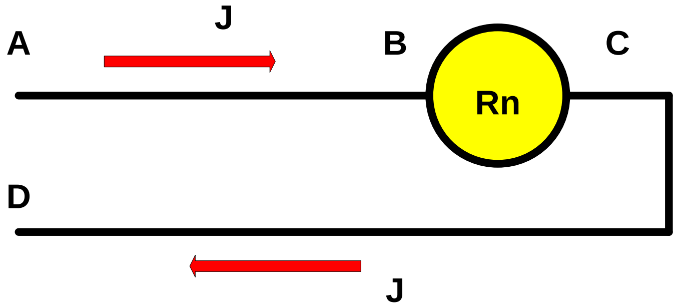

Рис. 1.

В [1-3] была предложена и рассматривалась математическая модель тока и потока, построенная исключительно на уравнениях Максвелла. Остался невыясненным следующий вопрос – см. рис. 1. Электрический **J** ток и поток электромагнитной энергии **S** распространяется внутри провода **ABCD** и проходит через нагрузку **Rn**. В этой нагрузке расходуется некоторая мощность **P.** Следовательно, поток энергии на участке **AB** должен быть больше потока энергии на участке **CD**. Точнее, **Sab=Scd+P.** Однако сила тока после прохождения нагрузки не изменилась. Как должна измениться структура тока, чтобы уменьшилась соответствующая ему электромагнитная энергия?

Ниже рассматривается более общая (по сравнению с [1-3]) математическая модель, позволяющая ответить и на этот вопрос. Эта математическая модель также построена исключительно на уравнениях Максвелла.

2. Математическая модель

При моделировании будем использовать цилиндрические координаты $r,\ \varphi,\ z$ и рассматривать

- основной ток J_o,
- дополнительные токи $J_r,\ J_\varphi,\ J_z$,
- магнитные напряженности $H_r,\ H_\varphi,\ H_z$,
- электрические напряженности E,
- электросопротивление ρ.

Ток в проводе принято рассматривать как усредненный поток электронов. Механические взаимодействия электронов с атомами считаются эквивалентными электрическому сопротивлению. Очевидно,

$$E = \rho \cdot J . \tag{1}$$

Основной ток с плотностью J_o создает дополнительные токи с плотностями $J_r,\ J_\varphi,\ J_z$ и магнитные поля с напряженностями $H_r,\ H_\varphi,\ H_z$. Они должны удовлетворять уравнениям Максвелла. Эти уравнения для магнитных напряженностей и токов в стационарном магнитном поле имеют вид

$$\operatorname{div}(H) = 0, \tag{2}$$

$$\operatorname{rot}(\mathrm{H}) = J, \tag{3}$$

Кроме того, токи должны удовлетворять условию непрерывности

$$\mathrm{div}(J) = 0. \tag{4}$$

Уравнения (2-4) для цилиндрических координат имеют вид:

$$\frac{H_r}{r} + \frac{\partial H_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial H_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0, \tag{5}$$

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = J_r, \tag{6}$$

$$\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} = J_\varphi, \tag{7}$$

$$\frac{H_\varphi}{r} + \frac{\partial H_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial H_r}{\partial \varphi} = J_z + J_o, \tag{8}$$

$$\frac{J_r}{r} + \frac{\partial J_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial J_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = 0. \tag{9}$$

Для сокращения записи в дальнейшем будем применять следующие обозначения:

$$co = \cos(\alpha\varphi + \chi z), \tag{10}$$

$$si = \sin(\alpha\varphi + \chi z), \tag{11}$$

где α, χ – некоторые константы. В приложении 1 показано, что существует решение, имеющее следующий вид:

$$J_r. = j_r(r) co, \tag{12}$$

$$J_\varphi. = j_\varphi(r) si, \tag{13}$$

$$J_z. = j_z(r) si, \tag{14}$$

$$H_r. = h_r(r) co, \tag{15}$$

$$H_\varphi. = h_\varphi(r) si + J_o r/2, \tag{16}$$

$$H_z. = h_z(r) si, \tag{17}$$

где $j(r)$, $h(r)$ - некоторые функции координаты r.

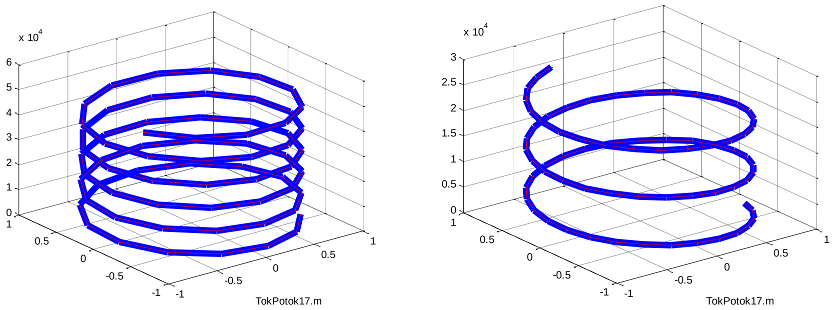

Рис. 2.

На рис. 2 показаны две винтовые линии, описываемые функциями (10, 11) тока при $\alpha = -0.014$, но при различных значениях $\chi = 720$ и $\chi = 720/2$ - справа и слева соответственно.

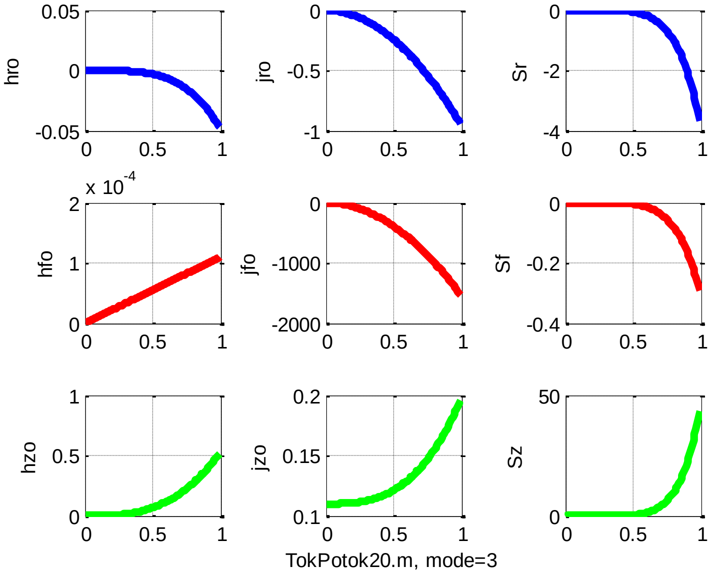

Рис. 3.

Пример 1.

На рис. 3 показаны графики функций $j_r(r),\ j_\varphi(r),\ j_z(r),\ h_r(r),\ h_\varphi(r),\ h_z(r)$. Эти функции вычисляются итеративно при данных $\alpha = -0.0018,\ \chi = 460$, радиусе провода $R = 0.001$ и начальных (при $r = 0$) нулевых значениях перечисленных функций и их производных. Исключением является функция $h_\varphi(r)$, которая определена при $r = 0$. Точнее, $h_\varphi(0) = h_{\varphi o} = 0$ и $h'_\varphi(0) = h'_{\varphi o} = 0.000001$. Функции, показанные в третьей колонке, будут рассмотрены далее. Здесь и далее все числовые результаты представлены в системе СИ.

3. Потоки энергии

Плотность потока электромагнитной энергии – вектор Пойнтинга

$$S = E \times H. \tag{1}$$

Токам соответствуют одноименные электрические напряженности, т.е.

$$E = \rho \cdot J\,, \tag{2}$$

где ρ - электросопротивление. Совмещая (10, 10а), получаем:

$$S = \rho J \times H\,. \tag{3}$$

Это векторное произведение в цилиндрических координатах имеет вид:

$$S = \rho(J \times H) = \rho \begin{bmatrix} J_\varphi H_z - J_z H_\varphi \\ J_z H_r - J_r H_z \\ J_r H_\varphi - J_\varphi H_r \end{bmatrix}. \tag{4}$$

В частности, плотность потока энергии **вдоль оси** провода определяется как

$$S_z = \rho(J_r H_\varphi - J_\varphi H_r). \tag{5}$$

Поток энергии **вдоль оси** провода при данном радиусе

$$S_{zr}(r) = 4\pi^2 \rho \int_r S_z(r) \cdot r \cdot dr\,. \tag{6}$$

Аналогично определяются потоки энергии вдоль радиуса $S_{rr}(r)$ и по окружности $S_{fr}(r)$. Эти функции показаны на рис. 3.

Полный поток энергии **вдоль оси**

$$\overline{S_z} = \int_r S_{zr}(r) \cdot dr\,. \tag{7}$$

равен мощности P, передаваемой по проводу, т.е.

$$\overline{S_z} = P\,, \tag{8}$$

где

$$P = R_H \int_r \left(\int_\varphi J_o^2 d\varphi \right) dr = 4\pi R^2 R_H J_o^2\,, \tag{9}$$

где R_H - сопротивление нагрузки.

Пример 2.

При условиях примера 1 и удельном сопротивлении медного провода $\rho = 0.0175 \cdot 10^6$ далее найдена величина потока энергии $\overline{S_z} \approx 4000$. Равная ему мощность потребляется в сопротивлении $R_H = 100$ при плотности основного тока $J_o = 2 \cdot 10^6$. Важно отметить, что поток энергии вдоль провода значительно превышает потоки энергии по радиусу и по окружности. В данном примере

$$\overline{S_z} = 4000,\ \overline{S_r} = -370,\ \overline{S_\varphi} = -30.$$

Пример 3.

В условиях примера 2 будем изменять только величину χ, выбирая последнюю таким образом чтобы выполнялось условие (8). На рис. 4 показаны функции $R_H(\chi)$ и $P(\chi)$.

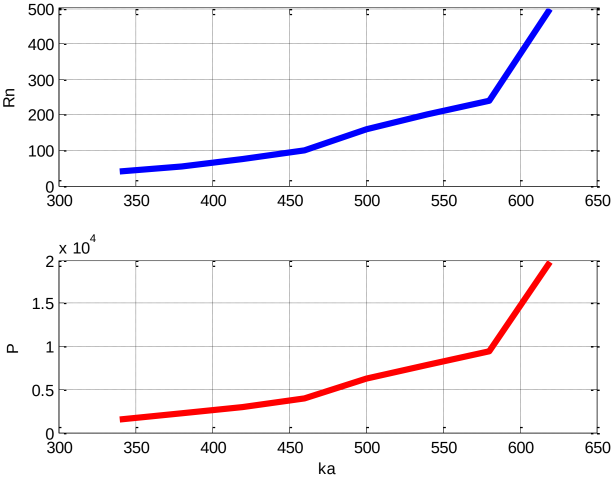

Рис. 4.

Обсуждение

Из рис. 4 видно, что

> **при <u>неизменной</u> плотности тока в проводе передаваемая по нему мощность увеличивается с увеличением величины χ.**

Здесь можно снова рассмотреть рис. 2. Видно, что с увеличением χ увеличивается плотность витков спиральной траектории тока. Таким образом, увеличение передаваемой мощности.

> **при <u>неизменной</u> плотности тока в проводе передаваемая по нему мощность увеличивается за счет увеличения плотности витков спиральной траектории тока.**

Снова рассмотрим рис. 1. На участке **AB** по проводу передается энергия нагрузки **P.** Ей соответствует определенное значение χ и плотности витков спиральной траектории тока. На участке **CD** по проводу передается незначительная энергия. Ей соответствует малое значение χ и малая плотность витков спиральной траектории тока.

Естественно, нагрузкой является и сопротивление самого провода. Следовательно,

> **по мере прохождения тока по проводу спираль траектории тока выпрямляется.**

Таким образом, показано, что существует такое решение уравнений Максвелла для провода с постоянным током, которому соответствует представление о

- спиральной траектории постоянного тока в проводе,
- передаче энергии вдоль и внутри провода,
- зависимости плотности спиральной траектории от передаваемой мощности.

Приложение 1

Рассматривается решение уравнений (2.5-2.9) в виде функций (2.12-2.17). Далее производные по r будем обозначать штрихами.

Из (2.5) находим:

$$\frac{j_r(r)}{r}co + j_r'(r)co + \frac{j_\varphi(r)}{r}\alpha \cdot co + j_z(r)\chi \cdot co = 0 \tag{1}$$

или

$$\frac{j_r(r)}{r} + j_r'(r) + \frac{j_\varphi(r)}{r}\alpha + j_z(r)\chi = 0. \tag{2}$$

Из (2.5, 2.6, 2.7) находим:

$$\frac{h_r(r)}{r} + h_r'(r) + \frac{h_\varphi(r)}{r}\alpha + \chi \cdot h_z(r) = 0, \tag{3}$$

$$\frac{1}{r} \cdot h_z(r)\alpha - h_\varphi(r)\chi = j_r(r), \tag{4}$$

$$-h_r(r)\chi - h_z'(r) = j_\varphi(r), \tag{5}$$

Из (2.8) находим:

$$\frac{h_\varphi(r)}{r} + \frac{J_o}{2} + h_\varphi'(r) + \frac{J_o}{2} + \frac{1}{r} \cdot h_r(r)\alpha = j_z(r) + J_o, \tag{6}$$

Итак, получено 5 уравнений (2, 3-6) с 6-ю неизвестными функциями $f(r),\ \phi(r)$. Эти уравнения дополним уравнением (3.9). Алгоритм решения этих уравнений имеет следующий вид:

1. При $r = 0$ устанавливаем нулевые значения всех функций $j(0),\ h(0)$, за исключением функции $h_\varphi(0) = h_{\varphi o}$ и $h_\varphi'(0) = h_{\varphi o}'$.
2. Из (3) находим:

$$h_r' = -\frac{h_r}{r} - \frac{h_\varphi}{r}\alpha - h_z\chi, \tag{7}$$

$$h_r = h_{rold} + h_r' \cdot dr. \tag{8}$$

3. Из (6) находим:

$$j_z(r) = h'_\varphi(r) + \frac{h_\varphi(r)}{r} + \frac{1}{r} \cdot h_r(r)\alpha \qquad (9)$$

4. Из (2) находим:

$$j'_r(r) = -\frac{j_r(r)}{r} - \frac{j_\varphi(r)}{r}\alpha - j_z(r)\chi = 0. \qquad (10)$$

$$j_r = j_{rold} + j'_r \cdot dr. \qquad (11)$$

5. Из (4) находим:

$$h_z(r) = \left(j_r(r) + h_\varphi(r) \cdot \chi\right) r/\alpha. \qquad (12)$$

$$h'_z = \left(h_z - h_{zold}\right)/dr. \qquad (13)$$

6 Из (5) находим:

$$j_\varphi(r) = -h_r(r)\chi - h'_z(r). \qquad (14)$$

7. Переходим к п. 2 с новым значением переменной r.

Литература

Примечание: **Vixra** – архив 'viXra Funding', http://vixra.org/funding,
DNA – "Доклады независимых авторов",
ISSN 2225-6717, http://dna.izdatelstwo.com/

1. Хмельник С.И. Поток электромагнитной энергии в проводнике с постоянным током, DNA-32, ID16319679, 2015, ViXra, http://vixra.org/abs/1503.0048
2. Хмельник С.И. Структура постоянного тока, DNA-33, ID16537771, 2015, ViXra, http://vixra.org/abs/1503.0241
3. Хмельник С.И. Структура потока электромагнитной энергии в проводе с постоянным током, DNA-33, ID16537771, 2015, ViXra, http://vixra.org/abs/1507.0061