

# 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
  2. Математическая модель
  3. Потoki энергии
  4. Обсуждение
- Приложение 1  
Литература

## 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.

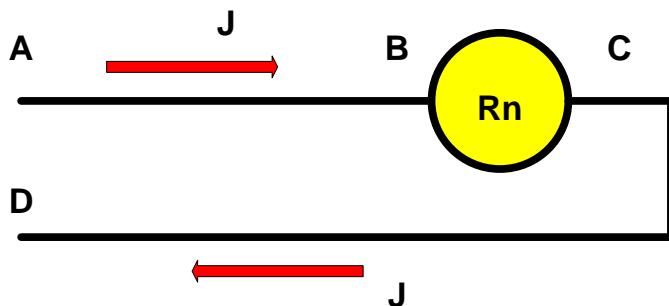


Рис. 1.

---

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, **S<sub>ab</sub>=S<sub>cd</sub>+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  $\rho$ .

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

$$E = \rho \cdot J. \quad (1)$$

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

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

$$\operatorname{rot}(\mathbf{H}) = \mathbf{J}, \quad (3)$$

Кроме того, токи должны удовлетворять условию непрерывности

$$\operatorname{div}(J) = 0. \quad (4)$$

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

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

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

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

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

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

Для сокращения записи в дальнейшем будем применять следующие обозначения:

$$co = \cos(\alpha\varphi + \chi z), \quad (10)$$

$$si = \sin(\alpha\varphi + \chi z), \quad (11)$$

где  $\alpha$ ,  $\chi$  – некоторые константы. В приложении 1 показано, что существует решение, имеющее следующий вид:

$$J_r = j_r(r)co, \quad (12)$$

$$J_\varphi = j_\varphi(r)si, \quad (13)$$

$$J_z = j_z(r)si, \quad (14)$$

$$H_r = h_r(r)co, \quad (15)$$

$$H_\varphi = h_\varphi(r)si + J_o r/2, \quad (16)$$

$$H_z = h_z(r)si, \quad (17)$$

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

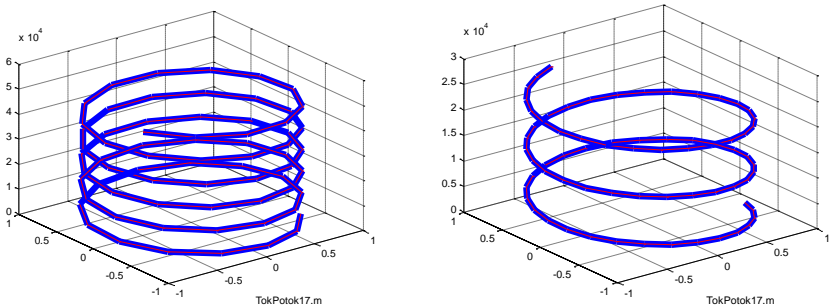


Рис. 2.

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.

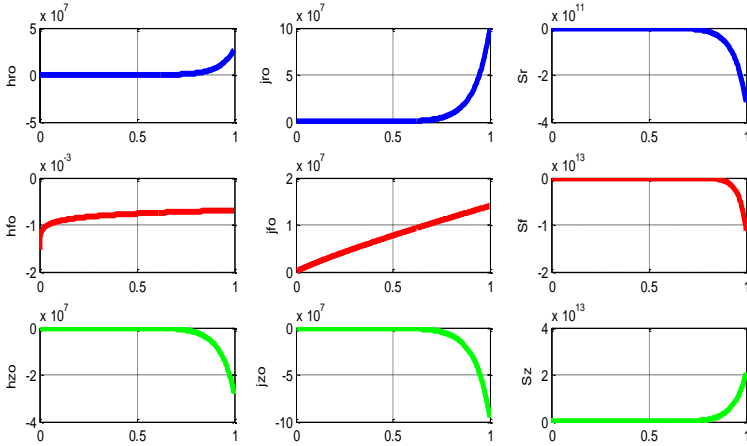


Рис. 3.

### 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  $\alpha = -0.0035$ ,  $\chi = 14200$ , радиусе провода  $R = 0.001$  и начальных (при  $r = 0$ ) нулевых значениях перечисленных функций и их производных. Исключением является функция  $h_\varphi(r) = 0.0001 \cdot \ln(r)$ . В первой колонке показаны функции  $j_r(r)$ ,  $j_\varphi(r)$ ,  $j_z(r)$ , во второй колонке показаны функции  $h_r(r)$ ,  $h_\varphi(r)$ ,  $h_z(r)$ , а 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

$$S = E \times H. \quad (1)$$

Токам соответствуют одноименные электрические напряженности, т.е.

$$E = \rho \cdot J, \quad (2)$$

где  $\rho$  - электросопротивление. Совмещая (10, 10а), получаем:

$$S = \rho J \times H. \quad (3)$$

Это векторное произведение в цилиндрических координатах имеет вид:

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

В частности, плотность потока энергии **ВДОЛЬ ОСИ** провода определяется как

$$S_z = \rho(J_r H_\varphi - J_\varphi H_r). \quad (5)$$

Поток энергии **ВДОЛЬ ОСИ** провода при данном радиусе

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

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

Полный поток энергии **ВДОЛЬ ОСИ**

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

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

$$\overline{S_z} = P, \quad (8)$$

где

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

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  $\overline{S_z} \approx 1000$ . Равная ему мощность потребляется в сопротивлении  $R_H \approx 100$  при плотности основного тока  $J_o = 1 \cdot 10^6$ . Важно отметить, что поток энергии вдоль провода значительно превышает потоки энергии по радиусу и по окружности. В данном примере

$$\overline{S_z} = 1000, \quad \overline{S_r} = -300, \quad \overline{S_\varphi} = -15.$$

### Пример 3.

В условиях примера 2 будем изменять только величину  $\chi$ , выбирая последнюю таким образом, чтобы выполнялось условие (8). На рис. 4 показана функция  $P(\chi)$ .

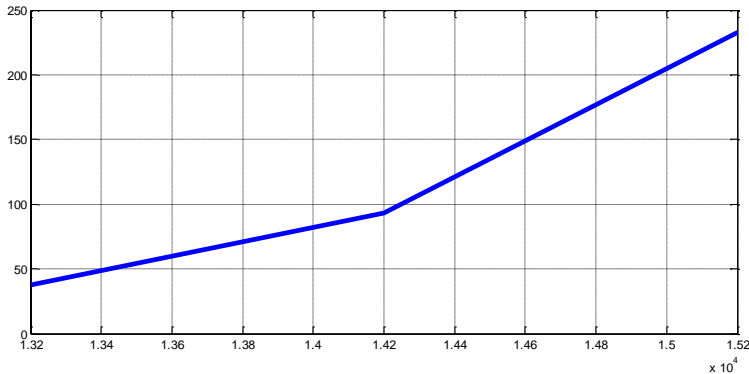


Рис. 4.

### Обсуждение

Из рис. 4 видно, что

**при неизменной плотности тока в проводе передаваемая по нему мощность увеличивается с увеличением величины  $\chi$ .**

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

**при неизменной 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  $\chi$  и плотности витков спиральной траектории тока. На участке **CD** по проводу передается незначительная энергия. Ей соответствует малое значение  $\chi$  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:

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

или

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

Из (2.5, 2.6, 2.7) находим:

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

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

$$-h_r(r)\chi - h'_z(r) = j_\varphi(r), \quad (5)$$

Из (2.8) находим:

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

Итак, получено 5 уравнений (2, 3-6) с 6-ю неизвестными функциями  $f(r)$ ,  $\phi(r)$ . Поэтому одну из функций можно определить произвольно. Мы определим функцию  $h_\varphi = k_h \ln(r)$ . В этом случае алгоритм решения этих уравнений имеет следующий вид:

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

$$h'_r = -\frac{h_r}{r} - \frac{h_\varphi}{r}\alpha - h_z\chi, \quad (7)$$

$$h_r = h_{r_{old}} + h'_r \cdot dr. \quad (8)$$

---

3. Из (6) находим:

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

4. Из (2) находим:

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

$$j_r = j_{r\text{old}} + j'_r \cdot dr. \quad (11)$$

5. Из (4) находим:

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

$$h'_z = (h_z - h_{z\text{old}})/dr. \quad (13)$$

6 Из (5) находим:

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

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/1504.0061>