

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 14. Закон Ома

Рассмотрев основные свойства электростатического поля неподвижных зарядов, мы можем перейти к изучению более сложного случая электромагнитного поля, возникающего при стационарном движении свободных зарядов, т. е. при наличии постоянного во времени тока в проводниках. Этот вопрос включает два, в значительной мере независимых, аспекта:

- 1) нахождение электромагнитного поля постоянных токов;
- 2) рассмотрение механизма прохождения тока в различных средах — механизма электропроводности.

Не вдаваясь в изучение механизма прохождения тока, мы ограничимся допущением, что плотность тока в однородном проводнике связана с напряженностью поля законом Ома ($j = \sigma E$).

Значение электропроводности σ тесно связано с механизмом прохождения тока и изменяется в весьма широких пределах у различных проводников.

В части VI мы рассмотрим микроскопический смысл электропроводности и оценим ее значение для некоторых важнейших проводников.

Мы будем далее предполагать, что постоянство электрического тока во времени поддерживается некоторыми устройствами, именуемыми источниками тока. Примерами источников тока могут служить машинные генераторы разнообразных устройств, гальванические элементы, аккумуляторы, термопары и т. п. Действительно, физически совершенно очевидно, что никакая комбинация заряженных или нейтральных проводников не может обеспечить прохождение постоянного тока в системе. Приведя в контакт проводники, находящиеся при различных потенциалах, мы вызовем нестационарное движение свободных зарядов, которое будет продолжаться до тех пор, пока не произойдет выравнивание потенциалов всех проводников.

Источники постоянного электрического тока должны всегда иметь неэлектростатический характер. Они могут, хотя и

не обязательно, иметь, например, электрохимический характер. Мы не будем в дальнейшем вдаваться в детали устройства источников тока. Для нас важно лишь то, что источники тока обеспечивают поддержание постоянного тока в проводниках.

Совершенно формально, не входя в рассмотрение механизма действия источников тока, мы можем включить источник тока в состав рассматриваемой системы проводников с постоянным током, видоизменив закон Ома. Именно, замечая, что источники тока создают плотность тока в проводниках вне зависимости от непосредственного действия электрического поля, мы можем записать закон Ома в обобщенном виде

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{E}^{\text{стор}}). \quad (14,1)$$

Вектор $\mathbf{E}^{\text{стор}}$, зависящий от координат, формально характеризует действие источников тока. В тех участках проводника, где действует источник тока, при $\mathbf{E} = 0$ $\mathbf{j} \neq 0$. Так, например, если система состоит из проводника, соединенного с пластинами гальванического элемента, то в области пространства, занятой элементом, $\mathbf{E}^{\text{стор}} \neq 0$. Процессы, происходящие внутри гальванического элемента, позволяют поддерживать при различных потенциалах его пластины, соединенные с проводником. Это, в свою очередь, обеспечивает существование постоянного во времени электрического поля внутри элемента и, в соответствии с законом Ома, постоянного тока в проводнике.

Величина $\mathbf{E}^{\text{стор}}$ по историческим причинам носит не совсем удачное наименование сторонней силы ($\mathbf{E}^{\text{стор}}$ не имеет размерности силы и не является аналогом силы по существу). Сторонняя сила является количественной характеристикой устройства, поддерживающего прохождение постоянного тока в проводниках. Мы вернемся еще к интерпретации понятия сторонней силы в последующих параграфах.

Система уравнений Максвелла для постоянного тока при наличии сторонних сил имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \text{rot } \mathbf{E} &= 0, \\ \text{div } \mathbf{D} &= 4\pi\rho; \end{aligned} \right\} \quad (14,2)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{rot } \mathbf{H} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \\ \text{div } \mathbf{B} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (14,3)$$

Уравнение непрерывности для стационарного процесса прохождения тока можно написать в виде

$$\text{div } \mathbf{j} = 0. \quad (14,4)$$

Нетрудно видеть, что написанная система уравнений является полной. Мы видим, прежде всего, что распределение

электрического поля не зависит от распределения магнитного поля. Последнее определяется заданием плотности тока j во всем пространстве.

На границе раздела проводящих сред должны выполняться граничные условия:

$$E_{tg}^{(1)} = E_{tg}^{(2)}, \quad (14,5)$$

или

$$\frac{j_{tg}^{(1)}}{\sigma^{(1)}} = \frac{j_{tg}^{(2)}}{\sigma^{(2)}} \quad (14,6)$$

и

$$j_n^{(1)} = j_n^{(2)}. \quad (14,7)$$

Первое из них совпадает с (5,2), второе получается из уравнения непрерывности так же, как, например, условие (5,5).

Наглядно граничные условия (14,6)—(14,7) можно интерпретировать как преломление линий тока на границе раздела по закону:

$$\frac{tg \alpha_1}{tg \alpha_2} = \frac{\sigma^{(1)}}{\sigma^{(2)}}, \quad (14,8)$$

где α — угол между линией тока и нормалью к поверхности в соответствующих средах.

На границе раздела проводник — диэлектрик выполняется граничное условие

$$j_n = 0. \quad (14,9)$$

Магнитные векторы удовлетворяют граничным условиям, рассмотренным в § 5.

§ 15. Линейный проводник с постоянным током

Рассмотрим прежде всего весьма важный случай линейного проводника с постоянным током. Под линейным мы будем понимать проводник, длина которого весьма велика по сравнению с его поперечными размерами. Линейные проводники часто именуют также проводами. Вектор плотности тока в линейном проводнике можно, в силу граничного условия (14,9) на его поверхности, с большой степенью точности считать параллельным вектору dl , касательному к оси проводника.

Таким образом, в каждой данной точке линейного проводника можно написать

$$j dl = j dl. \quad (15,1)$$

Введем в рассмотрение полный ток I , проходящий через сечение линейного проводника, нормальное к оси проводника