

При описании квазистационарных процессов в электрич. цепях в ур-нии энергетич. баланса (\*) необходим учёт изменений накопленной магнитной  $W^m$  и электрической  $W^e$  энергий:

$$\mathcal{E} \cdot I = R \cdot I^2 + dW^m/dt + dW^e/dt.$$

При изменении магн. поля во времени возникает вихревое электрич. поле  $E_s$ , циркуляцию к-рого вдоль проводящего контура принято называть эдс *электромагнитной индукции*:

$$dW^m/dt = -\mathcal{E}_{em} \cdot I = -I \cdot \oint E_s dl.$$

Изменения электрич. энергии существенны, как правило, в тех случаях, когда цепь содержит элементы с большой электрич. ёмкостью, напр. конденсаторы. Тогда  $dW^e/dt = \Delta U \cdot I$ , где  $\Delta U$  — разность потенциалов между обкладками конденсатора.

Допустимы, однако, и др. интерпретации энергетич. превращений в электрич. цепи. Так, напр., если в цепь перем. гармонич. тока включён соленоид с индуктивностью  $L$ , то взаимные превращения электрич. и магн. энергий в нём могут быть охарактеризованы как эдс эл.-магн. индукции  $\mathcal{E}_{em} = -L \cdot dI/dt$ , так и падением напряжения на эффективном реактивном сопротивлении  $Z_L$  (см. *Импеданс*):  $U_L = Z_L \cdot I = -\mathcal{E}_{em}$ . В движущихся в магн. поле телах (напр., в якоре униполярного индуктора) даже работа сил сопротивления может давать вклад в эдс.

В разветвлённых цепях квазилинейных токов соотношения между эдс и падениями напряжения на участках цепи, составляющих замкнутый контур, определяется вторым *Кирхгофа правилом*.

Эдс является интегральной характеристикой замкнутого контура, и в общем случае нельзя строго указать место её «приложения». Однако довольно часто эдс можно считать приближённо локализованной в определённых устройствах или элементах цепи. В таких случаях её принято считать характеристикой устройства (гальванич. батареи, аккумулятора, динамо-машины и т. п.) и определять через разность потенциалов между его разомкнутыми полюсами. По типу преобразований энергии в этих устройствах различают следующие виды эдс: химическая эдс в гальванич. батареях, ваннах, аккумуляторах, при коррозионных процессах (гальванозффекты), фотоэлектрическая эдс (фотоэле) при внеш. и внутр. фотоэфекте (фотоэлементы, фотодиоды); электромагнитная эдс — эдс эл.-магн. индукции (динамо-машины, трансформаторы, дроссели, электромоторы и т. п.); электростатическая эдс, возникающая, напр., при механич. трении (электрофорные машины, электризация грозовых облаков и т. п.); пьезоэлектрическая эдс — при сдвигании или растяжении пьезоэлектриков (пьезодатчики, гидрофоны, стабилизаторы частоты и т. п.); термоионная эдс, связанная с термоэмиссией заряж. частиц с поверхности разогретых электродов; термоэлектрическая эдс (*термоэдс*) — на контактах разнородных проводников (*Зеебека эффект* и *Пельтье эффект*) либо на участках цепи с неоднородным распределением тем-ры (*Томсона эффект*). Термоэдс используют в термопарах, пирометрах, холодильных машинах.

М. А. Миллер, Г. В. Пермитин.

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА классическая.

### Содержание

Исходные представления .....	519
Особенности динамики поля с источниками .....	521
Внутренние противоречия (неклассические проблемы) .....	523
Законы сохранения и ненаблюдаемость потенциалов .....	526
Классическая электродинамика в искривлённом пространстве-времени .....	527
Макроскопическая электродинамика .....	528

Классическая Э.—область физики, в к-рой изучаются классические (неквантовые) свойства эл.-магн. поля и движения электрич. и (гипотетич.) магн. зарядов, взаимодействующих друг с другом посредством этого поля. Одна из наиболее развитых областей физики, Э. представляется широким набором различных постановок задач и их ха-

рактерных решений, приближённых методов и частных случаев, объединённых общими исходными законами и ур-ниями. Последние, составляя главную, центральную часть классической Э., подробно рассмотрены в *Максвелла уравнениях*. В настоящей статье излагаются лишь основные принципы Э., скелет её построения и периферийные отношения с др. областями физики, так или иначе граничащими с Э.

### Исходные представления

Основы Э. заложены в 18—19 вв.: сначала в пределах электростатики, магнитостатики и токовой статики, а затем — после открытия явлений магн. действия электрич. токов Х. Эрстедом (Н. Oersted, 1820) и эл.-магн. индукции М. Фарадеем (М. Faraday, 1831) — на базе исследований эл.-магн. взаимодействий зарядов и токов. Ур-ния для взаимосвязанных электрич. и магн. полей, возбуждаемых источниками (зарядами и токами), найдены Дж. Максвеллом (J. Maxwell, 1864—73) и стали общепринятыми после обнаружения эл.-магн. волн Г. Герцем (Н. Hertz, 1888). В результате Э. слилась с оптикой. Формирование принципов Э. в осн. завершилось в нач. 20 в. Были открыты дискретные электрич. заряды — отрицательно заряженный электрон (Дж. Дж. Томсон, J. J. Thomson, 1897) и положительно заряженные ядра атомов (Э. Резерфорд, E. Rutherford, 1903—11). На основе ур-ний Максвелла и ур-ний Ньютона с силой Лоренца развиты представления об электронном строении вещества и в ходе анализа Э. движущихся сред построена спец. теория относительности. Она естеств. образом (с позиций классич. Э.) объяснила релятивистские оптич. эффекты и отвергла необходимость существования эфира для распространения эл.-магн. волн.

В дальнейшем фундам. исследования в Э. переместились в квантовую релятивистскую область. В частности, только квантовая Э. объяснила устойчивость вещества, ибо по законам классич. Э. ускоренно движущиеся электроны в атомах должны были бы непрерывно растрчивать энергию на излучение и в конце концов упасть на ядра. Вместе с тем при учёте квантового характера движения нерелятивистских заряж. частиц, составляющих материальные тела, законы классич. Э., описывающие взаимодействие этих частиц посредством классич. полей, позволяют объяснить подавляющую часть происходящих вокруг нас явлений. Сюда относятся не только электрич., магн. и оптич. свойства твёрдых тел, жидкостей и газов, но и их др. макроскопич. характеристики (упругость, теплопроводность, поверхностное трение, вязкость и т. д.).

В Э. прежде всего рассматриваются свободные заряды и системы зарядов, удовлетворяющие приближению непрерывного энергетич. спектра. Классическому, неквантовому, описанию их эл.-магн. взаимодействия благоприятствует то, что оно, в отличие от слабого и сильного взаимодействий, является эффективным уже в низкоэнергетич. пределе, когда энергия взаимодействия частиц и фотонов мала по сравнению с энергией покоя электрона. В таких ситуациях, как правило, отсутствуют рождение и аннигиляция заряж. частиц, а имеет место лишь постепенное изменение состояния их движения в результате обмена большим кол-вом низкоэнергетич. фотонов. Однако и при высоких энергиях частиц в среде (в условиях их постоянного рождения и аннигиляции, напр. в электрон-позитронной плазме), несмотря на существ. роль флуктуаций, Э. может быть с успехом использована для описания среднестатистич., макроскопич. характеристик процессов.

Исходными в Э. являются следующие понятия, вводимые на основе анализа физ. измерений: геометрия рассматриваемой области пространства-времени, включая условия на её границе и гравитац. фон (пустота); заряды частиц и токи, связанные с их движением (вещество); эл.-магн. поле; силы, испытываемые частицами; пространственно-временное перераспределение вещества и поля (взаимодействие).

**Геометрия.** Пространство-время, рассматриваемое общей теорией относительности (ОТО), четырёхмерно и мо-