

И.Н. Добротворский

Теория электрических цепей

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 030
ББК 92
И11

И11 **И.Н. Добротворский**
Теория электрических цепей / И.Н. Добротворский – М.: Книга по Требованию, 2023. – 472 с.

ISBN 978-5-458-33964-3

Рассматриваются физические процессы и методы расчетов пассивных и активных электрических цепей.

ISBN 978-5-458-33964-3

© Издание на русском языке, оформление
«УОУО Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

1.1. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЗАРЯДЕ

Давно было замечено, что если потереть стекло о шелк, то стекло приобретает способность притягивать некоторые предметы, например, сухую бумагу, но отталкивать такое же потертое о шелк стекло. Эбонит, потертый о мех, притягивает бумагу, стекло, натертое о шелк, но отталкивает потертый о мех эбонит. Свойство притягивать или отталкивать тела было объяснено появлением зарядов, не видимых человеческим глазом, и названных электрическими. Поскольку заряженные тела вели себя по-разному: в одних случаях притягивали предметы, а в других отталкивали, то их стали различать. Заряды, появляющиеся на стекле, назвали *положительными*, а на эбоните — *отрицательными*. При изучении поведения заряженных тел стало ясно, что одноименные заряды отталкиваются, разноименные притягиваются, а незаряженные предметы притягиваются как к положительно, так и к отрицательно заряженным телам.

Значительно позже было установлено, что все тела состоят из атомов, каждый из которых имеет положительно заряженное ядро и отрицательно заряженные электроны. В тех случаях, когда положительный заряд ядра равен отрицательному заряду электронов, атом был электрически нейтральным. При уменьшении заряда электронов (например, трением стекла о шелк) тело становилось положительно заряженным, а при увеличении (например, трением эбонита о мех) тело приобрело отрицательный заряд. Таким образом, в телах может быть избыток или недостаток электронов, а также их равенство. Заряд электрона — самый малый электрический заряд, известный в природе. По многим причинам, которые мы выясним позднее, за единицу заряда был принят не заряд одного электрона, а заряд, равный заряду $6\,290\,000\,000\,000\,000\,000$ электронов и названный *кулоном*. Сразу заметим, что числа с большим количеством нулей, как правило, записывают короче — в виде однозначного числа с запятой и десятичной частью, умноженной на 10 в соответствующей степени. Например, заряд в один кулон равен заряду $6,29 \cdot 10^{18}$ электронов. Единица заряда кулон записывается сокращенно, двумя буквами — Кл, причем первая буква — большая. По ныне действующим стандартам единицы, названные именами ученых, пишутся с большой буквы. (Ш. О. Кулон (1733 — 1806) — французский инженер и физик, один из основателей электростатики) Напомним, что все физические величины (длина, масса, время, напряжение, сопротивление, ток,

скорость, сила, мощность и т. д.) объединены в одну систему единиц, названную СИ (читается ЭС–И, а не СИ), что означает "система интернациональная", т. е. международная (Systeme International). В соответствии со стандартом СЭВ 1052–78 и постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 25 июля 1979 г. № 2242 единицы СИ должны использоваться во всех видах деятельности, а также в учебном процессе.

Поскольку кулон является единицей СИ, то имеется строго определенная зависимость между единицей заряда и единицами, принятыми в СИ за основные (метр, килограмм, секунда, ампер). При сравнении заряда в 1 Кл, получившегося из физических законов, с зарядом электрона и оказалось соотношение $1 \text{ Кл} = 6,29 \cdot 10^{18}$ зарядов электронов.

1.2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯДОВ

Опытным путем было установлено, что сила взаимодействия двух зарядов пропорциональна значению этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Формула, по которой рассчитывается взаимодействие заряженных тел, называется *законом Кулона* и имеет вид

$$F = Q_1 Q_2 / \epsilon_a R^2, \quad (1.1)$$

где F – сила взаимодействия зарядов Q_1 и Q_2 , измеряемая в ньютонах (Н), по имени английского физика Исаака Ньютона (1643 – 1727); Q_1 и Q_2 – заряды, Кл; R – расстояние между центрами заряженных тел, м; ϵ_a – диэлектрическая проницаемость, представляющая собой произведение двух множителей, ϵ_0 и ϵ_r , из которых ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума (практически воздуха), а ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость данной среды, показывающая, во сколько раз уменьшается взаимодействие заряженных тел, если их перенести из вакуума в данную среду. Значения ϵ_r приведены в табл. 1.1.

Таким образом, закон Кулона может быть записан так:

$$F = Q_1 Q_2 / \epsilon_0 \epsilon_r R^2. \quad (1.2)$$

Таблица 1.1

Материал	ϵ_r	Материал	ϵ_r
Воздух	1	Слюда флогопит	4 ... 5,5
Пористый полиэтилен	1,5	Слюда мусковит	4,5 ... 8
Полипропилен, фторопласт, сплошной полиэтилен, полиизобутилен, бумага с диэлектриком, парафин	2,2 ... 2,3	Радиофарфор	6
Плексиглас	3 ... 3,6	Текстолит	7
Винипласт	4,1	Ультрафарфор	6,3 ... 7,5
Эбонит	4,3	Тиконд	25 ... 80
Бакелит	4 ... 4,6	Бензол	2,2 ... 2,3
		Ацетон	20 ... 30
		Вода	80

Опытным путем было установлено, что диэлектрическая проницаемость вакуума равна $8,85 \cdot 10^{-12}$ и измеряется в единицах "фарад на метр", причем "фарад" – есть единица электрической емкости, что будет рассмотрено в § 1.5. Пока следует запомнить, что единица "фарад" сокращенно записывается большой буквой Ф. (Фарад – по имени английского физика Майкла Фарадея (1791 – 1867), почетного члена Петербургской Академии наук (1830 г.), подробнее см. гл. 4, раздел "Электромагнитная индукция").

1.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Около заряженных тел всегда имеется пространство, в котором оказываются притягивающие или отталкивающие силы заряженного тела. Это пространство называется пространством с электрическим полем. Можно сказать, что *электрическим полем* является особый вид материи, через который осуществляется взаимодействие электрических зарядов. Электрическое поле неизменяющихся зарядов называется электростатическим.

Каждая точка электрического поля характеризуется напряженностью электрического поля E (не следует путать с "напряжением": это совершенно различные физические понятия). Напряженность поля определяется из выражения $E = F/q$, где F – сила, действующая на пробный заряд q , помещенный в данной точке поля. Пробным зарядом q называется заряд, много меньший заряда Q , создающего основное поле. Знать точно величину пробного заряда нет необходимости, поскольку с увеличением заряда q увеличивается и сила взаимодействия F , поэтому отношение F/q остается постоянным, равным напряженности поля в данной точке. Так как сила измеряется в ньютонах, а заряд – в кулонах, то напряженность электрического поля измеряется в Н/Кл,

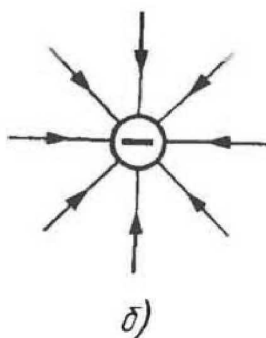
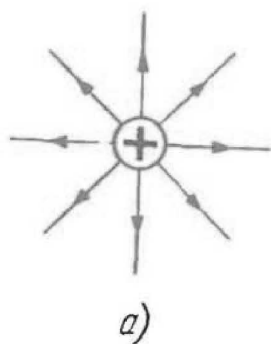


Рис. 1.1

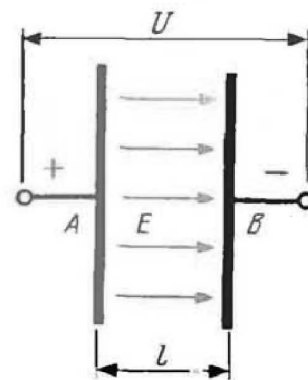


Рис. 1.3

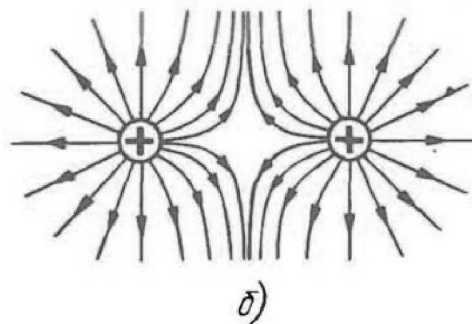
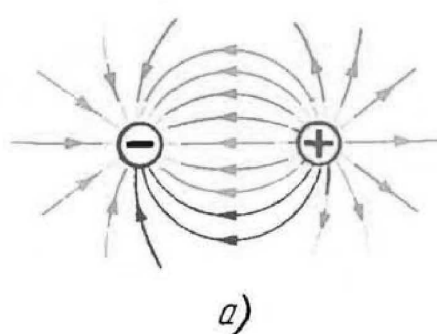


Рис. 1.2

однако данная величина во многих случаях является малоудобной, поэтому ниже будет показана иная единица, более распространенная на практике.

В соответствии с ГОСТ 19980–74 напряженность электрического поля – векторная величина, характеризующая электрическое поле и определяющая силу, действующую на заряженную частицу со стороны электрического поля. Таким образом, напряженность электрического поля есть величина векторная. За направление вектора напряженности принимают направление силы, с которой поле действует на положительный пробный заряд, помещенный в данную точку поля.

Электрическое поле изображается линиями напряженности электрического поля. На чертежах густоту линий показывают пропорциональной напряженности электрического поля. Направление поля в каждой точке совпадает с направлением касательной в этой точке. Электрическое поле, у которого во всех точках векторы напряженности поля одинаковые, называют *однородным*. Электрические силовые линии являются незамкнутыми, они начинаются на телах, обладающих положительным зарядом, и оканчиваются на телах, обладающих отрицательным зарядом. Приведем примеры электрических полей для различных зарядов. На рис. 1.1 *а, б* показаны поля точечных положительного и отрицательного зарядов, на рис. 1.2, *а, б* – поля двух точечных зарядов, на рис. 1.3 – поле между двумя параллельными пластинами.

1.4. ПОТЕНЦИАЛ. НАПРЯЖЕНИЕ

Пусть имеется положительный точечный заряд Q . Вокруг заряда образуется электрическое поле. Будем вносить из бесконечности в данную точку поля пробный положительный заряд q . Поскольку оба заряда (Q и q) в данном случае заряжены одноименно, то заряд q будет испытывать отталкивающую силу F , на преодоление которой необходимо затратить работу A . Таким образом, чтобы внести заряд в электрическое поле, необходимо затратить энергию W , равную совершенной работе A по перемещению заряда q из бесконечности в данную точку поля. Каждая точка поля характеризуется электрическим потенциалом φ , чаще называемым просто потенциалом и показывающим энергию W , которую необходимо затратить, чтобы переместить единичный пробный заряд из бесконечности в данную точку поля:

$$\varphi = W/Q. \quad (1.3)$$

Потенциал измеряется в вольтах (сокращенно записывается В – по имени итальянского физика Алессандро Вольта (1745 – 1827), одного из основателей учения об электричестве). Широкое распространение имеют кратные и дольные значения вольта: киловольт (кВ) = 1000 В (1 кВ = 10^3 В); милливольт (мВ) = 0,001 В, 1 В = 1000 мВ, 1 мВ = 10^{-3} В; микровольт (мкВ) = 0,000001 В = 10^{-6} В, 1 В = 10^6 мкВ. Энергия W , как и работа A , измеряется в джоулях (сокращенно записывают Дж – по имени английского физика Джеймса Джоуля (1818 – 1889), экспериментально обосновавшего закон сохранения энергии). Джоулем называется работа, совершенная силой в один ньютон на пути в один метр, т. е. [Дж] = Н · м = кг · м · м/с² = кг · м²/с². Из (1.3) следует, что потенциалом в 1 В называется такой потенциал, при котором на перемещение заряда в 1 Кл из данной точки поля в бесконечность затрачивается энергия в 1 Дж. Получим зависимость напряженности электрического поля E от потенциала φ . $E = F/Q$, из выражения (1.3) $Q = W/\varphi$, но $W = A = Fl$, где F – сила, а l – путь, тогда

$$E = F/Q = F\varphi/W = F\varphi/A = F\varphi/Fl = \varphi/l.$$

Следовательно, напряженность поля E равна отношению потенциала φ к расстоянию l и измеряется в вольтах на метр (В/м). Таким образом, единица Н/Кл то же самое, что и В/м. Напряженность поля может измеряться также в мкВ/м и мВ/м.

Выразим потенциал φ через напряженность электрического поля E . Из выражения $E = \varphi/l$ следует, что $\varphi = El$, причем данная формула справедлива только для однородного поля, т. е. такого поля, в котором при изменении расстояния напряженность поля остается неизменной. В тех случаях, когда напряженность поля неодинаковая, приходится подсчитывать приращение потенциала $d\varphi$ на бесконечно малом пути dx , а затем все приращения потенциалов суммировать. В этом случае $d\varphi = E(l)dx$, а

$$\varphi = \int_l^{\infty} E(l) dx, \quad (1.4)$$

где $E(l)$ — закон, по которому изменяется напряженность поля при перемещении заряда из бесконечности на расстояние l .

Пример 1.1. Определить потенциал φ в точке l , если напряженность поля $E(l)$ изменяется по закону E_0/x^2 , где E_0 — постоянная величина, а x — расстояние.

Решение.

$$\varphi = \int_l^{\infty} E(l) dx = \int_l^{\infty} \frac{E_0}{x^2} dx = E_0 \int_l^{\infty} x^{-2} dx.$$

Напомним, что

$$\int x^n dx = \frac{1}{n+1} x^{(n+1)}.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \varphi &= E_0 \frac{1}{(-2)+1} x^{(-2)+1} \Big|_l^{\infty} = \frac{E_0}{-1} x^{-1} = \frac{E_0}{-x} \Big|_l^{\infty} = \frac{E_0}{x} \Big|_{\infty}^l = E_0/l - E_0/\infty = \\ &= E_0/l - 0 = E_0/l. \end{aligned}$$

(Обратите внимание: при изменении знака на обратный верхний и нижний пределы интегрирования меняются местами.)

Таким образом, каждая точка электрического поля характеризуется некоторым потенциалом. *Разность потенциалов двух точек называется напряжением, обозначается U и измеряется так же, как и потенциал, в вольтах.* Если, например, потенциал точки A — φ_A , а потенциал точки B — φ_B , то напряжение между этими точками определяется из выражения $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$. Важнейшим свойством электрического поля является то, что напряжение между двумя точками зависит от разности потенциалов, но не зависит от формы пути, по которому перемещается заряд. *Напряжение между двумя точками численно равно работе A , затраченной на перемещение единичного заряда из одной точки поля в другую.* В общем случае, при неравномерных полях, напряжение

$$U = \int_{I_A}^{I_B} E(l) dx. \quad (1.5)$$

В соответствии с ГОСТ 19880–74 электрическое напряжение – скалярная величина, равная линейному интегралу напряженности электрического поля. Разность электрических потенциалов – электрическое напряжение в безвихревом поле, характеризующееся независимостью от выбора пути интегрирования.

Следует помнить важнейшее правило: чтобы увеличить потенциал некоторой точки или напряжение между двумя точками, при прочих равных условиях, необходимо затратить какую-то энергию. В последующих главах будет показано, что такой энергией может быть химическая, тепловая, световая и другие.

1.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ

Пусть имеются параллельные пластины, находящиеся на расстоянии много меньшем, чем линейные размеры пластин. Если эти пластины заряжены разноименными зарядами, то между ними образуется практически однородное электрическое поле с напряженностью $E = U/l$, где U – электрическое напряжение; l – расстояние между пластинами (см. рис. 1.3). Около краев поле оказывается неоднородным, напряженность поля в этом случае представляет величину переменную, зависящую от места данной точки, и рассчитывается по формуле $E(l) = du/dl$. Система, состоящая из двух пластин, способная накапливать электрические заряды, называется *конденсатором*.

Каждый конденсатор характеризуется электрической емкостью C . Емкостью называется коэффициент пропорциональности между напряжением на обкладках конденсатора U и зарядом, запасенном в конденсаторе Q ($Q = CU$), откуда

$$C = Q/U. \quad (1.6)$$

Из (1.6) следует, что чем больше емкость конденсатора, тем больше заряд, запасенный в конденсаторе при неизменном напряжении на его обкладках. Единицей электрической емкости является фарад (а не "фарада"), причем фарад – емкость такого конденсатора, в котором заряд в один кулон изменяет напряжение на один вольт. Фарад – очень большая емкость, на практике используются дольные единицы: микрофарад (мкФ) = 10^{-6} Ф, нанофарад (нФ) = 10^{-9} Ф, пикофарад (пФ) = 10^{-12} Ф. Определим размерность фарада. Из формулы $C = Q/U$ следует, что [Ф] = Кл/В. Заметим, что в последующих главах будет показана еще одна размерность емкости, более удобная, чем Кл/В. Введя единицу емкости – фарад, можно определить размерность диэлектрической проницаемости вакуума ϵ_0 . По закону Кулона

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon_0 \epsilon_r R^2}, \text{ откуда } \epsilon_0 = \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon_r F R^2}, \text{ или } [\epsilon_0] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{Кл}}{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{Кл}}{\text{Дж} \cdot \text{м}} =$$

$$= \frac{\text{Кл}}{\text{В} \cdot \text{м}} = \frac{\Phi}{\text{м}} \text{ (напомним, что } \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж, Кл/Дж} = 1/\text{В, Кл/В} = \Phi) \text{ . Таким}$$

образом, диэлектрическая проницаемость вакуума измеряется в фарадах на метр: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Емкость плоского конденсатора с воздушным диэлектриком тем больше, чем больше площадь пластин конденсатора S , чем меньше расстояние между пластинами l , и определяется из выражения $C = \epsilon_0 (S/d)$. Если между пластинами ввести диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r , то емкость конденсатора возрастает в ϵ_r раз. Таким образом, относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r представляет отвлеченное число, показывающее, во сколько раз увеличивается емкость конденсатора, если между пластинами ввести диэлектрик из данного материала.

Пример 1.2. Рассчитать емкость плоского конденсатора, имеющего две пластины с площадью каждой из них по 5 см^2 при расстоянии между ними 1 мм , если диэлектриком является: а) воздух; б) титанат бария.

Решение. Емкость конденсатора определяется из выражения $C = \epsilon_0 \epsilon_r S/l$. При воздушном диэлектрике $\epsilon_r = 1$, в этом случае $C_{\text{в}} = (8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-4}) / 1 \cdot 10^{-3} = 4,425 \cdot 10^{-12}$ Ф = $4,425$ пФ. (Напомним, что площадь следует выражать в квадратных метрах, а расстояние – в линейных метрах, $5 \text{ см}^2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $1 \text{ мм} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.) Если в конденсатор ввести диэлектрик из титаната бария с $\epsilon_r = 80$, то емкость конденсатора увеличится в 80 раз и станет $C_{\text{(тит. бар)}} = \epsilon_r C_{\text{в}} = 80 \cdot 4,425 \cdot 10^{-12} = 354 \times 10^{-12}$ Ф = 354 пФ. Если пластины имеют неодинаковые поверхности, то берется площадь меньшей пластины.

1.6. ПРОБИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ КОНДЕНСАТОРА

При увеличении напряжения на обкладках конденсатора увеличивается напряженность электрического поля, которое при определенных значениях может разрушить диэлектрик или, как говорят, пробить конденсатор. У каждого конденсатора различают номинальное, т. е. рабочее, напряжение и пробивное. Рабочее напряжение, как правило, в $1,5 - 2,0$ раза меньше пробивного. Значения этого напряжения в конденсаторах, широко распространенных на практике, составляют от единиц до сотен вольт, в зависимости от их конструкции. Максимально допустимое напряжение определяется расстоянием между пластинами и физическими свойствами диэлектрика. Емкость и рабочее напряжение – важнейшие характеристики любого конденсатора. Максимально допустимое напряжение называют также электрической прочностью конденсатора.

1.7. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Если к источнику электрической энергии подключить конденсатор, то он заряжается, между его обкладками создается электрическое поле, в котором запасается энергия W , равная работе A , которую необходимо совершить, чтобы зарядить данный конденсатор. Эта работа

$$A = UQ. \quad (1.7)$$

Поскольку в процессе заряда конденсатора значения напряжения и количества электричества q изменяются, то сначала следует подсчитать элементарную работу dA , совершаемую при бесконечно малом изменении заряда q , а затем с помощью интегрирования просуммировать эти элементарные работы: $dA = u_C dq = u_C d(Cu_C)$. Так как емкость конденсатора C определяется его

конструкцией и не зависит от значения напряжения на его обкладках, то множитель C выходит за знак производной, как всякая постоянная величина, т. е. $dA = Cu_C du_C$. Интегрируя обе части равенства, получим $\int dA = \int Cu_C du_C$, или $A = C \int u_C du_C$, откуда (см. пример 1.1) $A = Cu_C^2/2$. Следовательно, энергия, запасенная в конденсаторе, определяется из выражения

$$W_3 = Cu_C^2/2. \quad (1.8)$$

Пример 1.3. Подсчитать электрическую энергию W_3 , запасенную в конденсаторе емкостью 300 мкФ, если напряжение на обкладках конденсатора 200 В.

$$W_3 = \frac{Cu_C^2}{2} = \frac{300 \cdot 10^{-6} \cdot 200^2}{2} = \frac{3 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 10^4}{2} = 6 \text{ Дж.}$$

(Напомним, что емкость следует подставлять в фарадах, причем $300 \text{ мкФ} = 300 \times 10^{-6} \text{ Ф}$.)

1.8. СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

Конденсаторы на электрических схемах обозначают так, как показано на рис. 1.4. Конденсаторы можно соединять параллельно и последовательно. *Параллельным соединением* называется такое, при котором все конденсаторы включены между зажимами источника электрической энергии. При этом на всех конденсаторах имеется одно и то же напряжение, равное напряжению источника питания (рис. 1.5). Поскольку напряжение на всех конденсаторах одинаковое, а общий заряд равен сумме зарядов, имеющих в конденсаторах, общая емкость конденсаторной батареи равна арифметической сумме емкостей всех конденсаторов, соединенных параллельно. Действительно,

$$Q_{\text{эк. пар}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = C_1 U + C_2 U + C_3 U + \dots = U(C_1 + C_2 + C_3 + \dots).$$

Но $Q_{\text{эк. пар}} = UC_{\text{эк. пар}}$, или $UC_{\text{эк. пар}} = U(C_1 + C_2 + C_3 + \dots)$. Сокращая обе части равенства на U , получаем $C_{\text{эк. пар}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$ или, записывая в более общей форме,

$$C_{\text{эк. пар}} = \Sigma C, \quad (1.9)$$

т. е. *эквивалентная емкость конденсаторов, соединенных параллельно, равна арифметической сумме емкостей этих конденсаторов*. Напомним, что слово "арифметическая" означает, что все члены этой суммы берутся со знаком "плюс".



Рис. 1.4

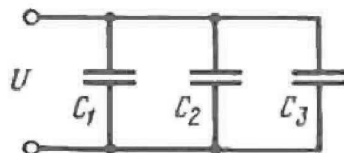


Рис. 1.5

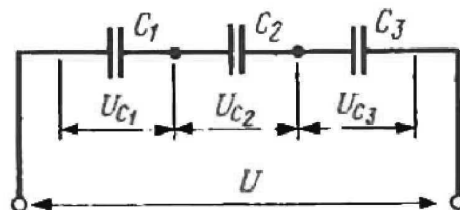


Рис. 1.6

Частный случай. Если n одинаковых конденсаторов соединены параллельно, то эквивалентная емкость батареи в n раз больше емкости каждого конденсатора: $C_{\text{эк. пар}} = nC$.

Последовательным соединением конденсаторов называется такое соединение, при котором отрицательно заряженная пластина одного конденсатора соединена с положительной заряженной пластиной другого (рис. 1.6). При последовательном соединении конденсаторов заряд каждого конденсатора равен заряду всей батареи, т.е. $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$. Так как $U = U_{C_1} + U_{C_2} + U_{C_3} + \dots$, а $U_{C_1} = Q/C_1$, $U_{C_2} = Q/C_2$, $U_{C_3} = Q/C_3$, $U = Q/C_{\text{эк. посл}}$, то $Q/C_{\text{эк. посл}} = Q/C_1 + Q/C_2 + Q/C_3 + \dots$, или, сокращая все члены на Q , получим

$$1/C_{\text{эк. посл}} = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \dots \quad (1.10)$$

Рассмотрим два важных частных случая.

Если последовательно соединены два конденсатора, то

$$1/C_{\text{эк. посл}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2}, \text{ откуда } C_{\text{эк. посл}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (1.11)$$

Если последовательно соединено n одинаковых конденсаторов, то $1/C_{\text{эк. посл}} = 1/C + 1/C + 1/C + \dots = n \cdot 1/C$, откуда

$$C_{\text{эк. посл}} = C/n. \quad (1.12)$$

Таким образом, при параллельном соединении нескольких конденсаторов их эквивалентная емкость больше емкости конденсатора с наибольшей емкостью, а при последовательном соединении – меньше емкости конденсатора с самой малой емкостью.

Пример 1.4. Имеются конденсаторы с емкостями $C_1 = 2$ мкФ, $C_2 = 3$ мкФ, $C_3 = 5$ мкФ. Рассчитать эквивалентные емкости, напряжение на каждом конденсаторе, заряды и энергию каждого конденсатора, если конденсаторы соединены: а) параллельно; б) последовательно, а напряжение источника $U = 100$ В.

Решение. Произведем расчеты, если конденсаторы соединены параллельно (см. рис. 1.5):

$$C_{\text{эк. пар}} = C_1 + C_2 + C_3 = 2 + 3 + 5 = 10 \text{ мкФ.}$$

Напряжение на каждом конденсаторе 100 В.

Рассчитаем заряды конденсатора и всей батареи: $Q = C_{\text{эк. пар}} U$, следовательно, $Q_1 = C_1 U_C = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 2 \cdot 10^{-4}$ Кл = 200 мкКл; $Q_2 = C_2 U_C = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 300$ мкКл; $Q_3 = C_3 U_C = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 500$ мкКл; $Q_{\text{эк}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 200 + 300 + 500 = 1000$ мкКл = 1 мКл.

Произведем проверку: $Q_{\text{эк. пар}} = C_{\text{эк. пар}} U_{C_{\text{эк. пар}}} = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 1000 \times 10^{-6}$ Кл = 10^{-3} Кл = 1 мКл. Энергия конденсаторов рассчитывается по формуле $W_3 = C_{\text{эк. пар}} U^2 / 2$, откуда

$$W_{\text{э1}} = \frac{C_1 U_{C_1}^2}{2} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 100^2}{2} = 0,010 \text{ Дж;}$$

$$W_{э2} = \frac{C_2 u_{C_2}^2}{2} = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot 100^2}{2} = 0,015 \text{ Дж.}$$

$$W_{э3} = \frac{C_3 u_{C_3}^2}{2} = \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 100^2}{2} = 0,025 \text{ Дж.}$$

Общая энергия $W_э = W_{э1} + W_{э2} + W_{э3} = 10 + 15 + 25 = 50 \text{ мДж}$. Выполним проверку:

$$W_э = \frac{C_{\text{эк. пар}} u_C^2}{2} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 100^2}{2} = 0,05 \text{ Дж} = 50 \text{ мДж.}$$

Произведем расчеты, если конденсаторы соединены последовательно (см. рис. 1.6). Рассчитаем эквивалентную емкость $C_{\text{эк. посл}}$:

$$1/C_{\text{эк. посл}} = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 = 1/2 + 1/3 + 1/5 = 0,5 + 0,3333 + 0,2 = 1,03333 \text{ (1/мкФ)}.$$

$$C_{\text{эк. посл}} = 1/1,03333 = 0,96774 \text{ мкФ.}$$

(Заметим, что если все емкости выражались в микрофарадах, то результирующая емкость получается в тех же единицах, т. е. в микрофарадах.) Рассчитаем заряд всей батареи и, следовательно, каждого конденсатора:

$$Q = C_{\text{эк. посл}} u_C = 0,96774 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 96,774 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} = 96,774 \text{ мкКл.}$$

Рассчитаем напряжение на каждом конденсаторе:

$$u_{C_1} = Q/C_1 = \frac{96,774 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}} = 48,386 \text{ В;}$$

$$u_{C_2} = Q/C_2 = \frac{96,774 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-6}} = 32,259 \text{ В;}$$

$$u_{C_3} = Q/C_3 = \frac{96,774 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-6}} = 19,355 \text{ В.}$$

Выполним проверку: $u_{C_1} + u_{C_2} + u_{C_3} = 48,386 + 32,259 + 19,355 = 100 \text{ В}$.

Рассчитаем энергию каждого конденсатора:

$$W_{э1} = C_1 u_{C_1}^2 / 2 = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 48,386^2 / 2 = 2,341 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 2,341 \text{ мДж;}$$

$$W_{э2} = C_2 u_{C_2}^2 / 2 = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 32,259^2 / 2 = 1,561 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 1,561 \text{ мДж;}$$

$$W_{э3} = C_3 u_{C_3}^2 / 2 = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 19,355^2 / 2 = 0,93654 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 0,93654 \text{ Дж;}$$

$$W_{\text{эк. посл}} = C_{\text{эк. посл}} u_C^2 / 2 = 0,96774 \cdot 10^{-6} \cdot 100^2 / 2 = 4,8386 \text{ мДж.}$$

Произведем проверку:

$$W_{э1} + W_{э2} + W_{э3} = 2,341 + 1,561 + 0,93654 = 4,8386 \text{ мДж.}$$

1.9. ПОНЯТИЕ О МИКРОСХЕМАХ

В реальных электронных устройствах кроме конденсаторов используются резисторы и транзисторы, назначение которых будет подробно рассмотрено в следующих главах. Каждая из названных деталей имеет определенные размеры, свои выводы, некоторую массу. Примерно до 60-х годов монтаж