

Урок 9. Конденсаторы

Основные параметры и характеристики конденсаторов

Конденсатором называют систему из двух и более электродов (обкладок), разделенных диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок.

Электрические характеристики конденсатора определяются его конструкцией, размером площади обкладок, расстоянием между обкладками и свойствами используемого диэлектрика.

В зависимости от области применения конденсаторы подразделяются на конденсаторы:

- общего назначения, к которым не предъявляются особые требования;
- специального назначения, к которым относят высоковольтные, импульсные, помехоподавляющие, дозиметрические, пусковые и другие специализированные конденсаторы.

В зависимости от материала изолирующего слоя различают конденсаторы:

- с газообразным (воздушным) диэлектриком;
- жидким диэлектриком, в качестве которого используют специальное масло;
- твердым неорганическим диэлектриком (слодяные, керамические);
- твердым органическим диэлектриком (бумажные, пленочные);

Большинство конденсаторов являются неполярными. Но особое место занимают электролитические конденсаторы, емкость которых может значительно превышать 1 микрофараду. Оксидный диэлектрик у этих конденсаторов в виде пленки наносят на одну из пластин-обкладок, в качестве которой служит тонкая алюминиевая или танталовая фольга. Другой пластиной конденсатора является электролит, в зависимости от вида которого различают жидкостные, сухие и твердые электролитические конденсаторы.

В связи с тем, что слой оксида с электролитом обладает вентильными свойствами, электролитические конденсаторы являются полярными и на корпусе соответствующую обкладку обозначают специальным знаком + или -. При включении конденсатора обкладку, помеченную знаком +, присоединяют к узлу электрической цепи с большим потенциалом, а другую обкладку – к узлу с меньшим потенциалом. Нарушение полярности приводит к выходу из строя конденсатора.

По характеру изменения емкости конденсаторы подразделяют на:

- постоянные конденсаторы;
- переменные конденсаторы.

К группе **постоянных** конденсаторов относят те, емкость которых нельзя изменять в процессе настройки или во время работы электронного устройства, а к группе переменных конденсаторов относят подстроечные и регулировочные конденсаторы.

Переменные подстроечные конденсаторы предназначены для относительно небольшого изменения емкости. Они используются в основном для разовой настройки режимов отдельных узлов электронных схем, и в процессе функционирования устройства их емкость не изменяется. Обкладками у таких конденсаторов обычно являются два слоя серебра в виде секторов, нанесенных на керамические подвижный и неподвижный диски. При повороте подвижного диска изменяется перекрытие пластин и, соответственно, емкость конденсатора.

Переменные регулировочные конденсаторы осуществляют оперативную регулировку электронных устройств. Их изготавливают в основном с воздушным диэлектриком. При этом их конструкция в отличие от подстроечных конденсаторов рассчитана на более долговременную работу в режиме вращения ротора.

Основными **параметрами** конденсатора являются:

1. **Номинальная емкость** – величина емкости, значение которой обозначено на конденсаторе и указано заводом-изготовителем в технической документации. Для постоянных неэлектролитических конденсаторов установлено четыре основных ряда номинальных значений емкости – Е3, Е6, Е12 и Е24. Номинальная емкость электролитических конденсаторов обычно выбирается в соответствии со значениями ряда Е6.
2. **Допуск** (допустимое отклонение) – величина, указывающая на возможный разброс значения емкости конденсатора.
3. **Рабочее напряжение** – максимальное значение напряжения, при котором конденсатор может работать длительное время без изменения своих свойств.
4. **Температурный коэффициент емкости (ТКЕ)** – параметр, характеризующий зависимость изменения емкости конденсатора от температуры окружающей среды. Значение ТКЕ может быть положительным, отрицательным или близким к нулю.

Согласно рекомендациям МЭК, основные параметры и характеристики конденсаторов должны отражаться в их маркировке. Для этих целей применяется буквенно-цифровая и цветовая маркировка.

Буквенно-цифровая маркировка конденсаторов

Действующая в настоящее время в России система буквенно-цифровой маркировки конденсаторов основана на стандарте «Коды для маркировки резисторов и конденсаторов» ГОСТ 28883-90.

Полная буквенно-цифровая маркировка конденсаторов состоит из нескольких позиционных элементов.

Первый позиционный элемент – буква или сочетание букв, которые обозначают подкласс конденсатора. Используются следующие буквенные обозначения:

К – конденсатор постоянной емкости;

КП – конденсатор переменный регулировочный;

КТ – конденсатор переменный подстроечный;

Второй позиционный элемент – цифры, характеризующие тип диэлектрика и назначение конденсатора. В табл. 1.1 приведены примеры кодов классификации конденсаторов в зависимости от материала диэлектрика.

Таблица 1.1. Маркировочные коды материала диэлектрика конденсаторов

Подкласс конденсатора	Код подкласса	Разновидности конденсатора по типу диэлектрика	Код типа
конденсаторы постоянной емкости	К	керамические на напряжение ниже 1600 В	10
		керамические на напряжение выше 1600 В	15
		стеклокерамические	22
		тонкопленочные	26
		слюдяные малой мощности	31
		бумажные металлизированные	42
		оксидные алюминиевые	50
		оксидные танталовые, ниобиевые	51
		оксидно-полупроводниковые	53
		вакуумные	61
		полистирольные	71
		фторопластовые	72
		полиэтилентерефталатные	74
		поликарбонатные	77
		полипропиленовые	78
конденсаторы переменные регулировочные	КП	вакуумные	1
		с воздушным диэлектриком	2
		с газообразным диэлектриком	3
		с твердым диэлектриком	4
конденсаторы переменные подстроечные	КТ	вакуумные	1
		с воздушным диэлектриком	2
		с газообразным диэлектриком	3
		с твердым диэлектриком	4

Третий позиционный элемент – цифра или число, обозначающее регистрационный номер конструктивной разработки конденсатора. Третий позиционный элемент отделяется от второго дефисом.

Четвертый позиционный элемент – число, обозначающее ТКЕ конденсатора. Различают нормированный и ненормированный ТКЕ. При ненормированном ТКЕ в спецификации конденсатора ставится буква Н и число, показывающее в % на возможное изменение емкости в диапазоне допустимых температур. Буквенный код ненормированных ТКЕ приведен в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Маркировочные коды ненормированного ТКЕ конденсаторов

группа ТКЕ	H10	H20	H30	H50	H70	H90
Код	B	Z	D	X	E	F

При нормированном ТКЕ указывают значение относительного отклонения емкости конденсатора от номинального значения при изменении температуры окружающей среды на 1°. Положительный знак ТКЕ обозначают буквой П, отрицательный – буквой М, а близкий к нулю – буквами МП. Буквенный код нормированных ТКЕ приведен в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Маркировочные коды нормированного ТКЕ конденсаторов

группа ТКЕ	П100	П33	МП0	М33	М75	М150	М330	М750	М1500
ТКЕ, 10 ⁻⁶ /°С	+100	+33	0	-33	-75	-150	-330	-750	-1500
Код	A	N	C	H	L	P	S	U	V

Пятый позиционный элемент – число, обозначающее номинальную емкость конденсатора, которую указывают в долях фарад: мкФ (10⁻⁶ Ф), нФ (10⁻⁹ Ф), пФ (10⁻¹² Ф). Кодированное обозначение номинала обычно состоит из трех знаков, включающих две цифры и букву. Буква обозначает множитель, на который умножается цифровое обозначение, и определяет положение запятой десятичного знака значения емкости конденсатора. То есть если емкость конденсатора выражена не целым числом, а целым числом с дробью или просто дробью, то вместо запятой в маркировке ставится множитель – один из тех, что приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4. Маркировочные коды множителя номинала конденсаторов

Множитель	1	10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁹	10 ⁻¹²
Буква русского алфавита	-	-	М	Н	П
Буква латинского алфавита	F	M	μ	n	p

Шестой позиционный элемент – выраженное в процентах допустимое отклонение емкости конденсатора от указанного номинального значения. В случае кодированного обозначения допустимое отклонение обозначается со-

ответствующей буквой русского или латинского алфавита. Возможные варианты кода допустимых отклонений приведены в табл. 1.3 и в табл. 1.5.

Таблица 1.5. Маркировочные коды допустимых отклонений номинальных значений

Допустимое отклонение, %	-10...+30	-10...+50	-10...+100	-20...+50	-20...+80
Буква русского алфавита	О	Э	Ю	Б	А
Буква латинского алфавита	Q	T	Y	S	Z

Седьмой позиционный элемент – номинальное значение напряжения, при котором конденсатор сохраняет свои параметры. В случае кодированного обозначения номинального значения оно обозначается соответствующей буквой латинского алфавита. Возможные варианты обозначения номинального напряжения приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6. Маркировочные коды номинального напряжения конденсаторов

Номинальное напряжение, В	1,0	2,5	4,0	6,3	10	16	20	25	40
Буква латинского алфавита	R	M	C	B	D	E	F	G	S

На последнюю, **восьмую** позицию ставят дату изготовления конденсатора. Код даты изготовления можно определить по табл. 1.4 и табл. 1.5.

Сокращенная буквенно-цифровая маркировка конденсаторов обязательно должна содержать пятый и шестой позиционные элементы полной маркировки, то есть представлять информацию о номинальном значении емкости и допустимом отклонении. Остальные позиционные маркировочные элементы устанавливаются, если для них имеется достаточно места на корпусе конденсатора.

Кроме сокращенной буквенно-цифровой маркировки для миниатюрных конденсаторов применяется также **цифровая** кодовая маркировка, состоящая из трех-четырех цифр. В этом случае первые две-три цифры обозначают значение емкости в пикофарадах, а последняя цифра – количество нулей. Для обозначения емкости от 0,1 до 1 пФ первой цифрой устанавливают 0, а в качестве разделительной запятой используется буква R. Для обозначения емкости от 1 до 10 пФ в качестве последней цифры используют 9.

В маркировке конденсаторов, разработанных до 1968 года, тип конденсаторов обозначается в виде букв, отражающих конструктивно-технологические особенности конденсаторов. Например, КД – конденсатор дисковый, СГМ – слюдяные герметизированные малогабаритные, КБГИ – конденсаторы бумажные герметизированные изолированные, ЭТО – электролитические танталовые объемно-пористые. Остальные маркировочные

элементы в основном соответствуют правилам действующей системы буквенно-цифровой маркировки.

Примеры маркировки конденсаторов показаны на рис. 1.



Рис. 1. Примеры буквенно-цифровой маркировки конденсаторов

Цветовая маркировка конденсаторов

Правила цветовой маркировки керамических и пленочных конденсаторов постоянной емкости, номинальное рабочее напряжение которых не превышает 63 В, устанавливает ГОСТ 26192-84. Общие требования стандарта к маркировке цветовыми кодами соответствуют ГОСТ 30668-2000.

Цветовую маркировку на конденсаторы наносят в виде цветных колец, полос или точек, размер и форму которых выбирают в зависимости от размеров и формы конденсаторов так, чтобы они обеспечивали безошибочную расшифровку этих знаков. Примеры установки маркировочных меток на поверхность конденсаторов показаны на рис.2.



Рис.2. Примеры цветовой маркировки конденсаторов

Каждому цвету соответствует определенное цифровое значение, определяемое с помощью табл. 1.7.

Таблица 1.7. Система цветовой маркировки конденсаторов

Цвет	Цифра номинала	Десятичный Множитель	Допустимое отклонение, %	Номинальное напряжение, В
Черный	10	1	± 20	4
Коричневый	12	10	± 1	6,3
Красный	15	10^2	± 2	10
Оранжевый	18	10^3	$\pm 0,25$	16
Желтый	22	10^4	$\pm 0,5$	40
Зеленый	27	10^5	± 5	25
Голубой	33	10^6	± 1	32
Фиолетовый	39	10^7	-20...+50	50
Серый	47	10^{-2}	-20...+80	-
Белый	56	10^{-1}	± 10	63
Серебряный	68	-	-	2,5
Золотой	82	-	-	1,5

В маркировке первые две метки определяют номинальное значение емкости конденсатора, выраженное в пикофарадах, причем первая метка определяет единицы номинала, а вторая метка – множитель номинала.

Третья цветная метка определяет величину допустимого отклонения емкости от номинального значения.

Четвертая цветная метка определяет значение номинального напряжения конденсатора.

При цветовом кодировании группы по температурной стабильности руководствуются требованиями Публикации МЭК 384-8, допускающей кодирование цветом корпуса. Если для обозначения группы по температурной стабильности требуется два цвета, второй цвет представляют цветом специальной типографской маркировки, например, в виде дополнительной точки.

Ряд заводов-изготовителей выпускают конденсаторы с цветовой маркировкой, отличающейся от рассмотренной выше. В качестве примера на рис. 3 показаны изображения цилиндрических конденсаторов, у которых маркировка представляет собой набор цветных колец-поясков.

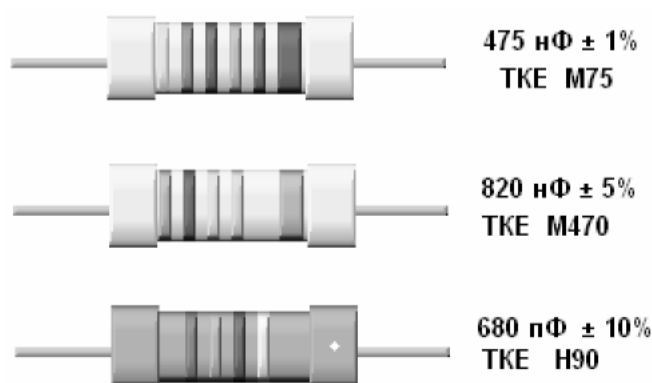


Рис. 3. Примеры альтернативной цветовой маркировки конденсаторов

Маркировочные знаки на конденсаторах обычно сдвинуты к одному из выводов и располагаются слева направо. Значения цветовых знаков определяются по табл. 1.8.

Таблица 1.8. Система альтернативной цветовой маркировки конденсаторов

Цвет	Цифра номинала	Десятичный множитель	Допустимое отклонение, %	ТКЕ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Черный	0	1	-	± 250
Коричневый	1	10	± 1	± 100
Красный	2	10^2	± 2	± 50
Оранжевый	3	10^3	-	± 15
Желтый	4	10^4	-	± 25
Зеленый	5	10^5	$\pm 0,5$	± 20
Голубой	6	10^6	$\pm 0,25$	± 10
Фиолетовый	7	10^7	$\pm 0,1$	± 5
Серый	8	10^8	-	± 1
Белый	9	10^9	± 10	-
Серебряный	-	10^{-2}	± 10	-
Золотой	-	10^{-1}	± 5	-
Отсутствует	-	-	± 20	-

Конденсаторы с малой величиной допуска (менее 5%) маркируются шестью цветовыми кольцами. Первые три – численная величина емкости в пикофарадах, четвертое кольцо - множитель, пятое кольцо – допуск, шестое кольцо – обозначает величину ТКЕ. Ширина полосы, обозначающей величину ТКЕ, делается примерно в два раза больше других.

Конденсаторы с допускаемой погрешностью 5 и 10% маркируются пятью цветовыми кольцами. Первые два – численная величина емкости в пикофарадах, третье кольцо – множитель, четвертое кольцо - допуск, пятое кольцо – обозначает величину ТКЕ.

Конденсаторы с величиной допуска $\pm 20\%$ маркируются четырьмя цветовыми кольцами. Первые два – численная величина емкости в пикофарадах. Третье кольцо – множитель, четвертое кольцо - ТКЕ. Величина допуска цветом не маркируется.

Корпус конденсаторов с ненормируемым ТКЕ окрашивают в оранжевый цвет.

Применяются и другие системы цветовой маркировки конденсаторов, разработанные рядом заводов-изготовителей.

Маркировка SMD конденсаторов

Пленочные SMD конденсаторы для поверхностного монтажа из-за своих малых размеров практически никогда не маркируются. Маркировку

имеют обычно только электролитические конденсаторы, номинальная емкость которых превышает 0,1 мкФ.

Буквенно-цифровая маркировка **танталовых** SMD конденсаторов состоит из двух позиционных элементов.

Первый позиционный элемент – буква, указывающая на величину номинального рабочего напряжения в соответствии с табл. 1.9.

Второй позиционный элемент – три цифры обозначают номинал в пикофарадах, причем две первые цифры являются значащими цифрами номинала, а последняя цифра – десятичный множитель.

Специальная светлая полоса, нанесенная вблизи одного из электродов, указывает на вывод положительной полярности.

Таблица 1.9. Коды номинального рабочего напряжения конденсаторов

Номинальное напряжение, В	4,0	6,3	10	16	20	25	35
Буква латинского алфавита	G	J	A	C	D	E	V

В некоторых случаях при маркировке конденсаторов сначала цифрами указывают номинальную емкость в микрофарадах, а затем - величину номинального рабочего напряжения.

Если габариты конденсаторов достаточны, то в их маркировке возможно использования также буквенно-цифрового кода.

Примеры маркировки SMD конденсаторов приведены на рис. 4.



Рис. 4. Примеры буквенно-цифровой маркировки SMD конденсаторов

Свойства и характеристики конденсатора

Конденсатор в цепи постоянного тока не проводит ток, так как его обкладки разделены диэлектриком. В цепи же переменного тока он проводит колебания переменного тока посредством циклической перезарядки конденсатора.

Реактивное сопротивление конденсатора:

$$X_c = -1/\omega C.$$

Из формулы видно, что зависимость реактивного сопротивления конденсатора обратно пропорциональна частоте, т. е. при $\omega = 0$ реактивное сопротивление конденсатора равно бесконечности.

Конденсатор может накапливать электрическую энергию. Энергия заряженного конденсатора

$$E = CU^2/2,$$

где U – напряжение, до которого заряжен конденсатор.

Емкость C является основной характеристикой конденсатора. Так, по определению емкости, заряд на обкладке пропорционален напряжению между обкладками:

$$q = CU$$

Типичные значения емкости конденсаторов составляют от единиц пикофарад до сотен микрофарад. Однако существуют конденсаторы с емкостью до десятков фарад.

Емкость плоского конденсатора, состоящего из двух параллельных металлических пластин, выражается формулой в системе СИ

$$C = \epsilon \epsilon_0 S/d$$

где S – площадь пластин, d – расстояние между пластинами, ϵ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика расположенного между пластинами, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная равная $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ (эта формула справедлива, когда d много меньше линейных размеров пластин).

Последовательное и параллельное соединение конденсаторов

Для получения больших емкостей конденсаторы соединяют параллельно (рис. 1.5).

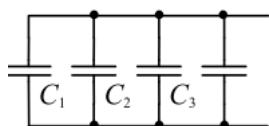
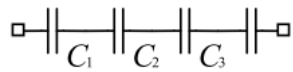


Рис. 1.5. Параллельное соединение конденсаторов

При этом напряжение между обкладками всех конденсаторов одинаково. При параллельном соединении емкостей полная емкость равна сумме всех емкостей:

$$C = \sum_i C_i$$

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 1.6) заряды всех конденсаторов одинаковы.



Общая емкость батареи при последовательном соединении конденсаторов равна:

$$C = \frac{1}{\sum_i 1/C_i}$$

Эта емкость всегда меньше минимальной емкости конденсатора, входящего в батарею. Однако при последовательном соединении уменьшается возможность пробоя конденсаторов, так как на каждый конденсатор приходится лишь часть разницы потенциалов источника напряжения.

Номинальное напряжение. Другой важной характеристикой конденсатора является номинальное напряжение – это напряжение, при котором он может работать с сохранением параметров в допустимых пределах. Номинальное напряжение, обычно, указывается на корпусе конденсатора и зависит от конструкции конденсатора и свойств применяемых материалов. При эксплуатации напряжение на конденсаторе не должно превышать номинального.

Полярность. Многие конденсаторы с оксидным диэлектриком (электролитические) работают только при корректной полярности напряжения из-за химических особенностей взаимодействия электролита с диэлектриком. При обратной полярности напряжения электролитические конденсаторы обычно выходят из строя из-за химического разрушения диэлектрика с последующим увеличением тока, вскипанием электролита внутри и, как следствие, с вероятностью взрыва корпуса.

Паразитные параметры

Реальные конденсаторы, помимо емкости, обладают также собственными сопротивлением и индуктивностью. С высокой степенью точности, эквивалентная схема реального конденсатора представлена на рис. 1.7.

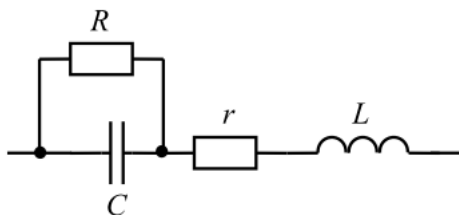


Рис. 1.7. Эквивалентная схема конденсатора с учетом паразитных параметров

R – электрическое сопротивление изоляции конденсатора, определяемое соотношением

$$r = U / I_{\text{ут}}$$

где U – напряжение приложенное к конденсатору, $I_{\text{ут}}$ – ток утечки.

r – эквивалентное последовательное сопротивление (ЭПС) обусловлено главным образом электрическим сопротивлением материала обкладок и выводов конденсатора, а так же потерями в диэлектрике.

В большинстве случаев этим параметром можно пренебречь, но иногда (например, в фильтрах импульсных блоков питания) достаточно малое его значение может быть жизненно важным для надежности устройства.

L – эквивалентная последовательная индуктивность обусловлена в основном, собственной индуктивностью обкладок и выводов конденсатора. На низких частотах (до единиц килогерц) обычно не учитывается в силу малости вклада.

Резонансная частота конденсатора. Вследствие того, что конденсаторы, используемые на практике, представляются в виде эквивалентной схемы (рис. 1.7), т. е., в виде последовательного колебательного контура, то практически у любого конденсатора есть своя резонансная частота, которая определяется выражением:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

При $f > f_p$ конденсатор в цепи переменного тока ведет себя как катушка индуктивности. Следовательно, конденсатор целесообразно использовать лишь на частотах $f < f_p$, на которых его сопротивление носит емкостный характер. Обычно максимальная рабочая частота конденсатора примерно в 2 – 3 раза ниже резонансной.

Тангенс угла потерь. В конденсаторе с идеальным диэлектриком, т. е. диэлектриком без потерь, вектор тока I с опережает вектор напряжения на 90° . В реальных диэлектриках угол между током, протекающим через емкость, и напряжением меньше 90° за счет потерь (т. е. $\phi = \pi/2 - \delta$, где δ – угол диэлектрических потерь), которые вызывают протекание активного тока I_r , совпадающего по фазе с напряжением. Векторная диаграмма для диэлектрика с потерями показана на рис. 1.8.

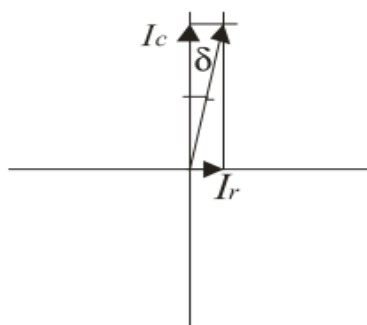


Рис. 1.8. Векторная диаграмма для тока в конденсаторе

Как видно из векторной диаграммы, тангенс угла δ равен отношению активного и реактивного токов:

$$\operatorname{tg} \delta = I_r / I_c$$

Иногда для характеристики устройства с диэлектриком определяют добротность – параметр обратный тангенсу угла диэлектрических потерь:

$$C(T) = C_0 + \beta \cdot \Delta T$$

где ΔT – изменение температуры, β – ТКЕ. Однако ТКЕ определяется не для всех типов конденсаторов. Для характеристики конденсаторов с выраженной нелинейной зависимостью обычно указывают предельные величины отклонений от номинала в рабочем диапазоне температур.

Применение конденсаторов. Конденсаторы находят применение практически во всех областях электроники.

- Конденсаторы (совместно с катушками индуктивности и/или резисторами) используются для построения различных цепей с частотно-зависимыми свойствами, в частности, фильтров, цепей обратной связи, колебательных контуров и т.п.
- При быстром разряде конденсатора можно получить импульс большой мощности, например, в фотовспышках, импульсных лазерах с оптической накачкой, генераторах и т. п. Необходимо помнить, что не все конденсаторы могут работать в импульсных режимах, происходит нагрев конденсатора и взрыв корпуса.
- Так как конденсатор способен длительное время сохранять заряд, то его можно использовать в качестве элемента памяти или устройства хранения электрической энергии.
- Как датчики малых перемещений: малое изменение расстояния между обкладками, заметно сказывается на емкости конденсатора.

Задача 1. Последовательно соединены конденсаторы емкостью 5 и 20 мкФ. Чему равна общая емкость?

Задача 2. Какой емкости конденсатор необходимо включить последовательно с конденсатором емкостью 5,6 пФ, чтобы их общая емкость была 2,5 пФ?

Список литературы

Основная

1. Берикашвили В.Ш. Электронная техника: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования/ В.Ш. Берикашвили.- 2-е изд., стер.- М.: Издательский центр "Академия", 2019 – 336 с.
2. Миловзоров, О. В. Основы электроники: учебник для СПО/ О.В. Миловзоров, И. Г. Панков. - 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 407 с.

Дополнительная

1. Гаврилов С. А., Бартош А.И. Схемотехника. От азов до создания практических устройств.- СПб.: Наука и Техника, 2020.- 528с.
2. Горошков Б.И. Электронная техника: учеб. пособие для студ. сред. проф. образования/ Б.И. Горошков, А.Б. Горошков.- 2-е изд., стер.- М.: Издательский центр "Академия", 2008.- 320 с.
3. Долженко О.В., Королев Г.В. Сборник задач, вопросов и упражнений по радиоэлектронике: Учеб. пособие для сред. ПТУ.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1986.- 103 с.
4. Игумнов Д.В., Королев Г.В., 3 Громов И.С. Основы микроэлектроники: Учеб. для техникумов по спец. «Производство изделий электр. техники».— М.: Высш. шк., 1991.— 254с.
5. Корольков В.И., Андреев В.В. Программные и аппаратные средства современной схемотехники и программирование микроконтроллеров: Учеб. пособие. – М.: РУДН, 2008. – 243 с.
6. Практикум по радиоэлектронике: Методическое руководство / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013.- 76 с.