

Лекция 3

Електрически вериги

Съдържание на Лекция 3

- ▲ **Основни елементи на електрическите вериги**
 - 3.1 Източници на ток и напрежение. Съгласуване на източник и товар – основни принципи.
 - 3.2 Пасивни елементи и техните характеристики: резистори, кондензатори, бобини. Съвременна SMD-технология.

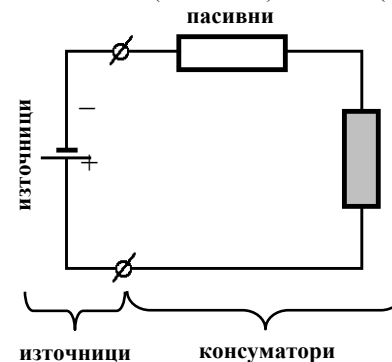
Лекция 3

3.1 Източници на ток и напрежение. Съгласуване на източник и потребител.

Електрически елементи и вериги

Електрическа верига е съвкупност от краен брой елементи (дискретни елементи, lumped elements) от следния тип:

- Източници (на напрежение или на ток; при по-високи честоти – на мощност);
- Пасивни (линейни) елементи (резистори, кондензатори, бобини)
- Активни (нелинейни) елементи (диоди и транзистори)



Източниците поддържат електрическата схема “енергетично”. Те създават насочено движение на носителите (заредени частици), които предизвикват различни процеси в другите елементи на веригата. Консуматорите (пасивни и активни потребители) “потребяват” енергията, произведена от източниците. Пасивните консуматори поглъщат, преобразуват и запасяват енергията на електрическите сигнали. Активните консуматори извършват същото, като допълнително “произвеждат” електрически сигнали за сметка на постоянноотоквата енергия на източниците.

Електрическите вериги работят в два режима: постояннотоков (dc) режим ($f = 0$) и променливотоков (ac) режим ($f \neq 0$). При последния има три подрежима: 1) установен режим (само-поддържащи се хармонични (синусоидални) трептения); 2) неустановен (преходен) режим (не-хармонични, затихващи или усилващи се сигнал); 3) ключов (цифров) режим.

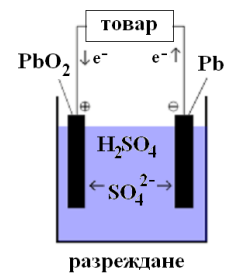
Източници

Източник	Физичен процес	Типично напрежение, V	Типично вътрешно съпротивление, Ω
Галваничен елемент (батерия)	Електрохимични процеси в електролит	$\sim 1,6$ V	0.01 – 10 Ω
Акумулатор (съвкупност от елементи)	Електрохимични процеси в електролит; (презареждаеми)	$\sim 1-2$ V на елемент	0.01 – 0.1 Ω
Термоелектричен източник (термо-батерия)	Преход от инфрачервено нагряване в <i>dc</i> напрежение (термо-двойки; термоелементи)	\sim mV	0.005 Ω
Фотоизточник (слънчева батерия)	Преход от фотоенергия в <i>dc</i> напрежение (фотоелементи)	\sim mV – V	\sim 10 Ω

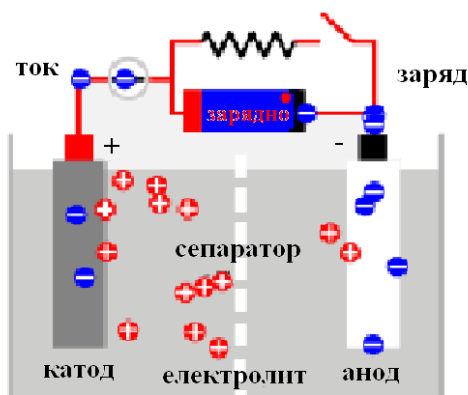
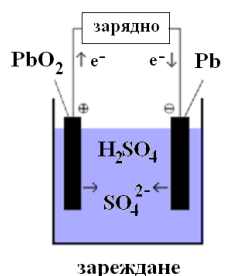
Най-използваните съвременни батерии и акумулатори

Тип	Електролит; процес	Типично напрежение, V	Плътност на енергията, Wh/kg	Мощност W/kg	Ефективност, %	Цикли	Типично приложение
Оловни	+PbO ₂ (H ₂ SO ₄) Pb-	2.1-2.2	30-40	180	70-90 %	500-800	стартери на коли
Ni-Cd; Ni-Fe	+NiO(OH) (KOH) Cd; Fe	1.2 1.2	30-60 50	150 100	70-90 % 65 %	1500	домашна електр.
Ag-Zn; Ag-Cd	+Ag ₂ O (KOH) Zn;Cd	1.3-1.5 0.9-1.1	100-120 60-70	-	-	-	самолети
NiMH	-	1.2	30-80	170	-	-	хибр. коли
Li йонни	+Li _x C ₆ (Li соли) Li _{1-x} CoO ₂ -	3.6, 3.7	160	1800	99.9 %	1200	цифрово оборудване
Li йон полимерни	+Li _x C ₆ (Li соли) Li _{1-x} CoO ₂ - електролит-полимер	3.7	130-200	3000	-	-	лаптопи, GSM
Нано-титанат	-	13.8	90	4000	95 %	9000-15000	лаптопи
не-химични (FES)	Маховик	-	130	-	90 %	10 ⁵ – 10 ⁷	е-коли

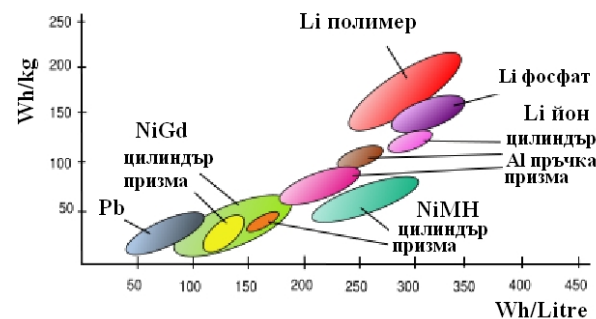
Процес на зареждане-разреждане в оловните акумулатори



Батериите са неуправляеми електронни източници – при работа се изтощават и напрежението им намалява с времето. Необходимо е презареждане както е показано на схемата.



Фотографии на по-известните типове батерии



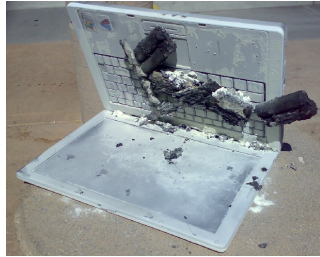
На фигурата са дадени най-известните презареждаеми батерии върху диаграмата “Wh/kg спрямо Wh/litre” – плътност на енергията в клетките



Ni-Cd комерсиални батерии и типично зарядно устройство. Ni-Cd батерии имат недостатък – “памет” за последното ниво на зареждане и не възстановяват пълният си капацитет

Li-йон батерии за GSM

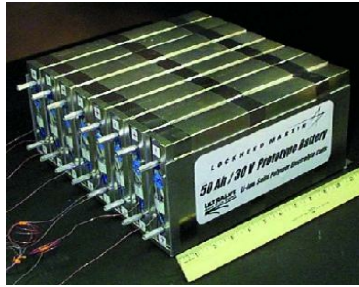
Фотографии на по-известните типове батерии



Li-йон батерии са “дълго-живущи”, но са лесно запалими, пробиват се и могат да експлодират. Известен е случаят, когато Sony “изтегли” от употреба ~10 млн. Li йонни батерии, използвани в лаптопи на различни фирми поради опасност от експлозия (вж.).

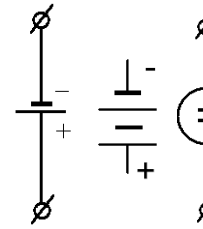


Има и не-химични “батерии” – даден е пример за прототипа на FES (Flywheel Energy Storage) батерия, натрупваща механична енергия чрез маховик



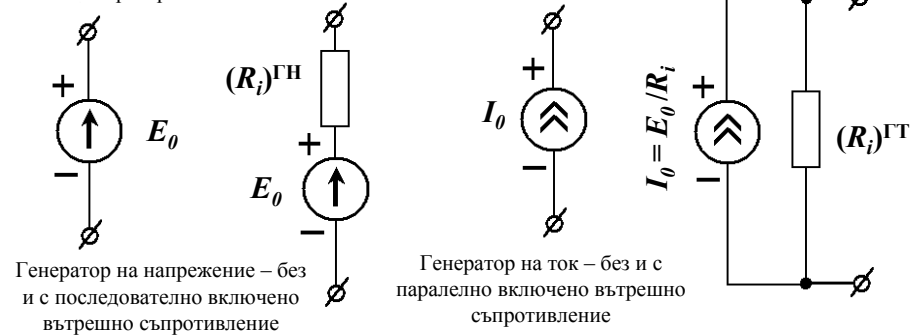
Li-йон полимерни батерии (фотография на оригиналния прототип на MIT)

Управляеми източници



клетка, батерия и генератор

Батериите в качеството си на неуправляеми електронни източници с ограничена мощност, не винаги са удобни и изгодни за използване в електронните схеми. Затова се използват и т. нар. управляеми източници – генератори на напрежение или генератори на ток. Управление-то и стабилизирането на стойността на тока или напрежението става по механичен или по електронен път – чрез ток или напрежение; плавно или стъпаловидно. Освен с напрежението E_0 и с тока I_0 , всеки генератор се характеризира със свое вътрешно съпротивление R_i , включено последователно или паралелно на източника.

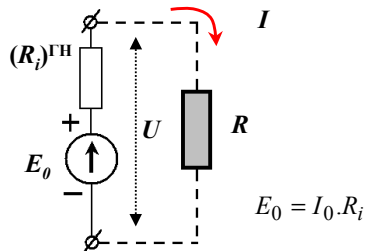


Генератор на напрежение – без и с последователно включено вътрешно съпротивление

Генератор на ток – без и с паралелно включено вътрешно съпротивление

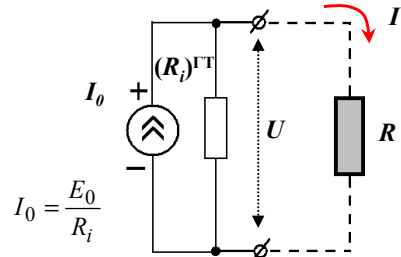
Генератори на напрежение и ток

Генератор на напрежение



$$E_0 = I_0 \cdot R_i$$

Генератор на ток



$$I_0 = \frac{E_0}{R_i}$$

Означения:

E_0 – електродвижещо напрежение (изходното напрежение на клемите на идеален генератор $R_i = 0$);

I_0 – генериран ток в идеален генератор $R_i = 0$;

R – съпротивление на консуматора

$(R_i)^{GH}$ – вътрешно съпротивление на генератор на напрежение; $(R_i)^{GH} \ll R$; $(R_i)^{GH} \sim \Omega$, десетки Ω ; ще го означаваме с R_i

$(R_i)^{GT}$ – вътрешно съпротивление на генератор на ток; $(R_i)^{GT} \gg R$; $(R_i)^{GT} \sim$ десетки до стотици $k\Omega$; ще го означаваме с R_i

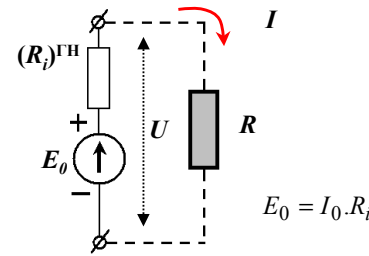
U – изходно напрежение на клемите на реален генератор $R_i \neq 0$;

$$U = I \cdot R$$

I – ток през консуматора

Генератори на напрежение и ток с вътрешно съпротивление

Генератор на напрежение



$$U = I \cdot R$$

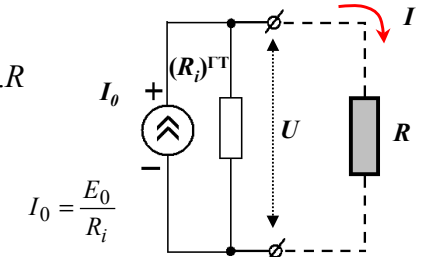
$$E_0 = I_0 \cdot R_i$$

$$E_0 = I(R + R_i) = IR + IR_i$$

$$I = \frac{E_0}{R + R_i} \cong \frac{E_0}{R} \Big|_{R_i^{GH} = 0}$$

$$U = I \cdot R = \frac{E_0 \cdot R}{R + R_i} \cong E_0 \Big|_{R_i^{GH} = 0}$$

Генератор на ток



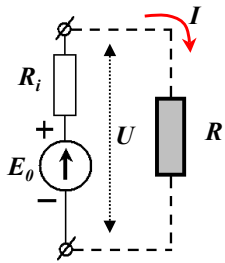
$$I_0 = \frac{E_0}{R_i}$$

$$I_0 = I \frac{R + R_i}{R_i}$$

$$I = I_0 \frac{R_i}{R + R_i} \cong I_0 = \frac{E_0}{R_i} \Big|_{R_i^{GT} \rightarrow \infty}$$

$$U = I_0 \frac{R R_i}{R + R_i} \cong I_0 R \Big|_{R_i^{GT} \rightarrow \infty}$$

Съгласуване на генератор и консуматор



Това е важен въпрос: доколко ефективно източникът може да “достави” необходимата мощност в консуматора. Ако

$$U = I.R = \frac{E_0}{R + R_i} R \quad I = \frac{E_0}{R + R_i},$$

консумираната мощност (доставена в консуматора) е

$$P = I^2 R = U.I = \frac{U^2}{R} = \frac{E_0^2 R}{(R + R_i)^2}$$

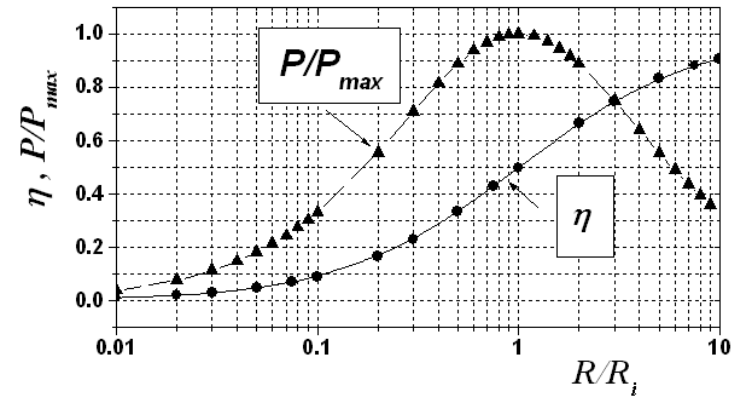
Максимално съгласуване (т. е. доставената в консуматора мощност да е максимална P_{max}) се получава при условието $R = R_i$

$$\max \Rightarrow \frac{dP}{d(R/R_i)} = 0 \quad \Rightarrow \quad P_{max} = \frac{E_0^2}{4R_i} \Big|_{R=R_i}$$

Ефективността η (коэффициентът на полезно действие) е

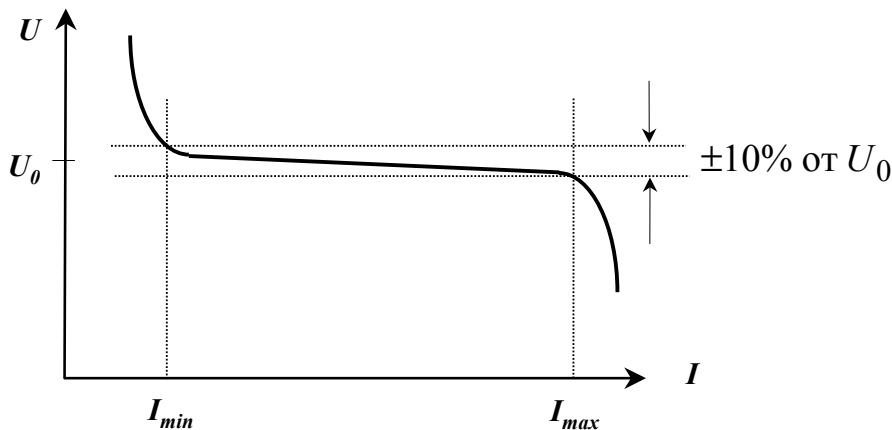
$$\eta = \frac{E_0}{R + R_i} \cdot \frac{R}{E_0} = \frac{R}{R + R_i} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{1}{1 + R_i/R}$$

Графика на нормираната мощност



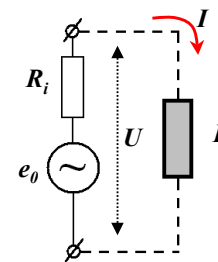
$$\eta = \frac{1}{1 + R_i/R} \quad P/P_{max} = 4 \frac{R/R_i}{(1 + R/R_i)^2}$$

Товарна графика на напрежението от стабизиран генератор на напрежение



Горе е показана типична крива на изходното напрежение от генератор на напрежение при натоварване с консуматор. Работната област е в интервал $\pm 10\%$ около номиналното напрежение U_0 . Ако съпротивлението R на консуматора е малко, протича силен ток и напрежението пада под номиналното. Обратно, ако съпротивлението е високо, токът е малък и напрежението е над номиналното.

Съгласуване на генератор и консуматор при променлив ток



При променлив ток има същите принципи на съгласуване, като тук токът и напрежението се заменят с техните ефективни стойности.

$$U \Rightarrow U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$$

$$I \Rightarrow I_{eff} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

Консумираната мощност (доставена в консуматора) е

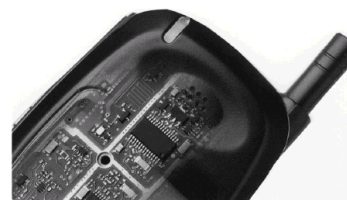
$$\bar{P} = \frac{1}{2} I_{max}^2 R \quad P_{max} = \frac{e_0^2}{8R_i} \Big|_{R=R_i}$$

Максимално съгласуване (т.е. доставената в консуматора мощност е максимална P_{max}) отново се получава при условието $R = R_i$

Лекция 3

3.2 Пасивни елементи и техните характеристики: резистори, кондензатори, бобини. Съвременна SMD технология

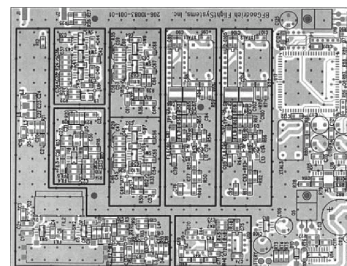
Електронни платки и схеми



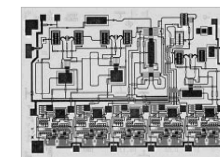
Платка в клетъчен телефон - висока плътност (VLSI)



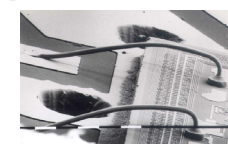
Компютърна платка



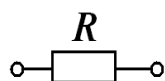
Многослойна платка



Интегрални схеми



Резистори

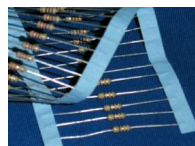


Резисторът със съпротивление R, Ω е двуполусен електронен елемент, който “се съпротивлява” на протичащия през него ток от носители и предизвиква “пад” на напрежението между двата си полюса (по закона на Ом). Този ефект е свързан с топлинното движение на носителите.

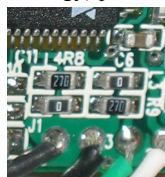
Технология: Резисторите се произвеждат по различна технология. Ниско-честотните резистори имат тяло и крачета (за запояване към платката). “Съпротивителният ефект” се постига по различен начин: обемни въглеродни резистори, жичен материал, съпротивително метално фолио, метални филми, Ni-Cr, Ta, дебело-слоини и тънко-слоини резистивни филми от различни материали и др. Има и SMT (Surface-Mount Technology) резистори.



Стари обемни резистори



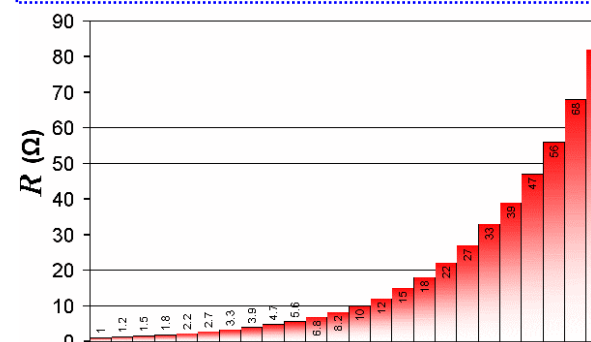
Резистори на “лента”



Тънкослойни SMT резистори

Стандартни стойности: Резисторите се произвеждат с различни, но стандартни стойности на своето съпротивление R, Ω от няколко $m\Omega$ до няколко $G\Omega$. Използват се различни скали с различен брой стойности по стандарта IEC 60063. Използват се различни серии: E6, E12, E24, E96 и E192. Числото показва броя стандартни стойности в обхвата 10-100 или 100-1000 (вж. и следващата страница). Стойностите се задават с определена точност: 20%, 10%, 5%, 2%, 1%, 0.5%, 0.25%, 0.1%, в зависимост от различни фактори.

Стандартни стойности на резистори



Стойности по стандарта E12 (вж. долу)

E6 (20%): 10 15 22 33 47 68

E12 (10%): 10 12 15 18 22 27 33 39 47 56 68 82

E24 (5%): 10 11 12 13 15 16 18 20 22 24 27 30 33 36 39 43 47 51 56 62 68 75 82 91



Цветен код за означение на резистори

Други параметри на резисторите

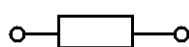
Мощност, пробивно напрежение, шумово напрежение: Резисторите се произвеждат да работят при различна номинална мощност: 1/8, 1/4, 1/2, 1 и 2 W. Имат и ограничение за пробивно напрежение, което може да издържи конструкцията им. Те са сериозни "производители" на шумов сигнал $U_n, nV \sim 0.127 (R \Delta f)^{0.5}$.

Температурна стабилност: Задава се температурния коефициент на съпротивлението α_T . $\alpha_T > 0$ при т.нар. болометри (тънки жични резистори), $\alpha_T < 0$ при полупроводниковите термистори.

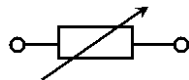
$$\alpha_T = \frac{\Delta R}{\Delta T}, \Omega^0 C$$

$$R = R_{20^\circ C} (1 + \alpha_T \Delta T)$$

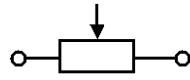
Типове: Постоянни и променливи съпротивления, потенциометри (линейни, логаритмични и анти-логаритмични)



фиксиран

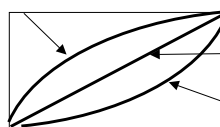


променлив



потенциометър

Анти-лог,

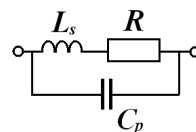


Линейен

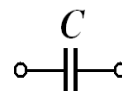
Лог.

Паразитни параметри:

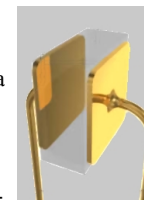
Имат важно значение на по-високи честоти. Това са паразитна индуктивност L_s и паразитен капацитет C_p . Ограничават честотния обхват.



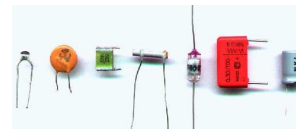
Кондензатори



Кондензаторът с капацитет C, F (Фарад) е двуполусен електронен елемент, който има свойството да "запасява" енергия на електрическото поле между двойка проводници, "плочи" на кондензатора, заграждащи изолатор, чрез "натрупване" на заредени частици на тези плочи.



Технология: Кондензаторите са устройства с двойка метални плочи и диелектрик между тях. Има въздушни кондензатори (в най-старите радиопримници), електролитни кондензатори (с висок капацитет), хартиени, слодени,



нисочестотни кондензатори



Въздушен



Планарни "hairpin"



SMT кондензатори



Високоволтов



електролитни кондензатори

Основни параметри на кондензаторите

Стандартни стойности: Подобно на резисторите, кондензаторите също се произвеждат със стандартни стойности на своя капацитет. Използва се същият мащаб. Типично капацитетът е ~pF, nF, μF, по-рядко mF или fF. Стойностите също се задават с определена точност, както при резисторите.

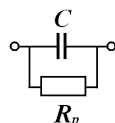
Номинално напрежение U_N : Много важен параметър; показва на какви напрежения работи кондензаторът. **Пробивно напрежение:** $U_{max} \sim 3U_N$.

Загуби и Q-фактор на кондензатора: $\tan \delta_C = \frac{1}{Q} \sim 10^{-3}$

Температурна стабилност: $\alpha_T = \pm \frac{\Delta C}{\Delta T}, pF/^\circ C$

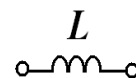
Конструкция: дискови, цилиндрични, тръбни, правоъгълни, проходни, променливи (тример-кондензатори) и др.

Паразитни параметри: основно паразитно съпротивление R_p , но и паразитна индуктивност



$$\tan \delta_C = \frac{1}{\omega C R_p}$$

Бобини

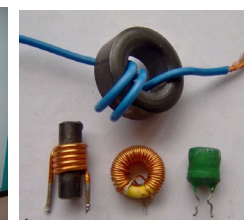


Бобината с индуктивност L, H (Хенри) е двуполусен електронен елемент, който има свойството да "запасява" енергия на магнитното поле около проводник, във вътрешността на навит проводник, соленоид и др. компоненти, в които тече ток.

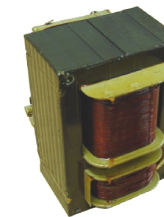
Технология: Бобините са навити върху сърцевина проводници. Има мощни бобини и трансформатори. Бобините за схеми са въздушни или навити върху феритна сърцевина



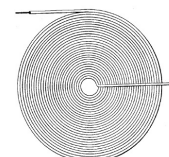
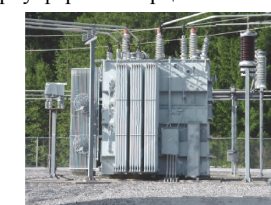
Мощни бобини



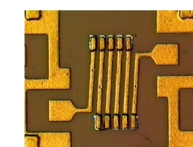
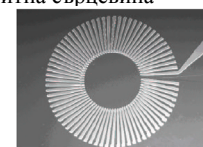
Жични бобини с и без феритна сърцевина



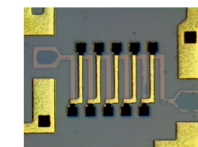
Ниско- и високоволтови трансформатори



Бобина на Тесла



Три вида SMT бобини



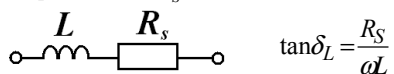
Основни параметри на бобините

Стандартни стойности: Няма стандарти за стойности на индуктивността на бобините, както при резисторите и кондензаторите. Използват се въздушни бобини, които могат да се “свиват” (за по-голяма индуктивност L) или да се “разтягат” (за по-малка L). За постигане на по-голяма индуктивност L може да се използва и феритна сърцевина. В интегралните схеми се използват планарни индуктивности.

Температурна стабилност: $\alpha_T = \pm \frac{\Delta L}{\Delta T}, nH/^\circ C$

Конструкция: въздушни бобини и бобини със феритни сърцевини, соленоиди, трансформатори, планарни бобини, Хелмхолцови бобини (няколко близко-разположени бобини с индуктивност L и взаимна индуктивност M).

Паразитни параметри: основно паразитно съпротивление R_S



Някои полезни формули



Листов проводник	Правоъгълен кондензатор	Въздушна бобина
$R = R_S \frac{l}{W};$	$C, pF = 8.85 \cdot 10^{-3} \epsilon_r \frac{WL}{d}$	$L, nH = \frac{D^2 n^2}{0.45D + L};$
$R_S = \frac{\rho}{t} = \frac{1}{\sigma t}$	$[W, L, d] = mm$	$[D, L] = mm; n = L/s$
$[L, W, t] = mm$		$\frac{L}{D} \approx 0.96;$
		$\frac{d}{s} \approx 0.5 \div 0.75$