

ELEKTR MAYDONIDA O'TKAZGICHLAR. ELEKTR SIG'IMI VA KONDENSATORLAR

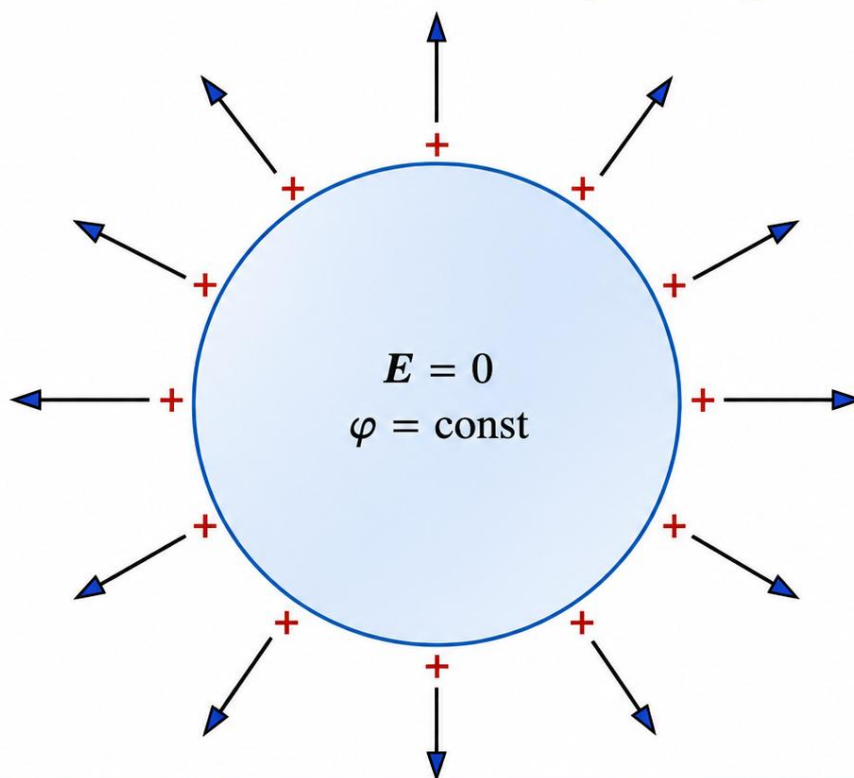
Elektr maydon energiyasi va energiya zichligini ilmiy-uslubiy o'rganish

O'tkazgichlarning elektr maydondagi xatti-harakati elektrostatiikaning muhim bo'limlaridan biridir. O'tkazgichlarda erkin zaryad tashuvchilar mavjud bo'lgani sababli tashqi elektr maydon ta'sirida ular qayta taqsimlanadi va elektrostatik muvozanat qaror topadi. Bu jarayon o'tkazgich ichidagi maydonning nolga aylanishi, sirtning ekvipotensial bo'lishi va ortiqcha zaryadning sirtga joylashishi kabi fundamental natijalarga olib keladi. Elektr sig'imi esa o'tkazgich yoki kondensatorning zaryad to'plash qobiliyatini tavsiflaydi. Kondensatorda to'plangan energiya elektr maydon energiyasi sifatida qaralib, uning fazodagi taqsimoti energiya zichligi orqali ifodalanadi.

Darsning maqsadi

Talabalarga elektrostatik muvozanatdagi o'tkazgichning xossalari, elektr sig'imi, kondensatorlarning asosiy turlari va ulanish qonunlari, dielektrikning sig'imga ta'siri, elektr maydon energiyasi va uning zichligini formulalar, grafiklar, chizmalar hamda bosqichma-bosqich yechilgan misollar orqali tushuntirish.

Elektrostatik muvozanatdagi o'tkazgich



Asosiy xossalari

- Ichki sohada $E = 0$.
- O'tkazgich ichida potensial $\varphi = \text{const}$.
- Erkin zaryadlar faqat sirtga joylashadi.
- Sirt har bir nuqtada ekvipotensial.

Elektr maydon chiziqlari

- Elektr maydon chiziqlari sirtga tik.
- Ular o'tkazgichdan tashqariga yo'nalgan (agar sirt zaryadi musbat bo'lsa).

Fizik ma'no

- Bu holat elektrostatik muvozanat deb ataladi.
- Misol: musbat zaryadlangan o'tkazgich shar.

1-rasm. Elektrostatik muvozanatdagi zaryadlangan o'tkazgich

Elektrostatik muvozanatda o'tkazgich ichida $E=0$, butun hajm va sirt bo'ylab potensial bir xil bo'ladi. Ortiqcha zaryad o'tkazgichning tashqi sirtida joylashadi.

1. Elektr maydonida o'tkazgichlar

Metall o'tkazgichlarda valent elektronlarning bir qismi kristall panjara bo'ylab erkin harakatlana oladi. Tashqi E maydon qo'yilganda elektronlar maydonga qarama-qarshi yo'nalishda siljib, sirtlarda induksiyalangan zaryadlar hosil qiladi. Ichki qayta taqsimlanish natijasida hosil bo'lgan ikkilamchi maydon tashqi maydonni o'tkazgich ichida kompensatsiyalaydi.

$$E_{\text{ich}} = 0$$

Agar ichkarida E noldan farqli bo'lsa, erkin zaryadlar harakatda davom etar va elektrostatik muvozanat bo'lmas edi. $E=-\nabla\varphi$ bo'lgani sababli $E=0$ shart o'tkazgich potensialining doimiyligini bildiradi:

$$\varphi = \text{const}$$

Gauss qonuniga ko'ra o'tkazgich materiali ichida olingan yopiq sirt uchun oqim nol, demak muvozanatda hajmiy ortiqcha zaryad yo'q. Ortiqcha zaryad sirtga chiqadi. Sirtga juda yaqin tashqi maydon normal yo'nalgan:

$$E_n = \sigma/\epsilon_0 \quad (\text{vakuumda})$$

Xossa	Elektrostatik muvozanatdagi natija
O'tkazgich ichidagi maydon	$E = 0$
Potensial	$\varphi = \text{const}$
Ortiqcha zaryad	Sirtlarda joylashadi
Sirtga tangensial maydon	$E_t = 0$
Tashqi normal maydon	$E_n = \sigma/\epsilon_0$

1-misol

O'tkazgich sirtining bir nuqtasida $\sigma=3 \mu\text{C}/\text{m}^2$. Vakuumdagi sirtga yaqin tashqi elektr maydon:

$$E = \sigma/\epsilon_0 = 3 \times 10^{-6} / (8.854 \times 10^{-12}) \approx 3.39 \times 10^5 \text{ N/C}$$

2. Elektrostatik induksiya va ekranlash

Neytral o'tkazgich tashqi elektr maydonga kiritilganda uning umumiy zaryadi o'zgarmasa ham, erkin zaryadlar qayta taqsimlanadi. Tashqi maydonga qarshi tomonda bir ishorali, ikkinchi tomonda qarama-qarshi ishorali induksiyalangan sirt zaryadlari paydo bo'ladi. Ushbu hodisa elektrostatik induksiya deyiladi.

Yopiq o'tkazuvchi qobiq tashqi elektrostatik maydonning ichki bo'shliqqa kirishini ma'lum shartlarda to'sadi. Bu elektrostatik ekranlash prinsipidir. Faradey qafasi ushbu prinsipning amaliy ko'rinishidir.

O'tkazgich sirtidagi zaryad taqsimoti

Sirt zaryad zichligi geometriyaga bog'liq. Egrilik radiusi kichik, ya'ni uchli qismlarda σ kattaroq bo'ladi. $E_n=\sigma/\epsilon_0$ sababli bu joylarda elektr maydon ham kuchliroq. Kuchli maydon havoning ionlanishiga va korona razryadiga olib kelishi mumkin.

2-misol: o'tkazuvchi sfera

Radiusi $R=0.10$ m bo'lgan izolyatsiyalangan metall sferaga $Q=5$ nC zaryad berilgan. Sferik simmetriya tufayli zaryad sirt bo'ylab bir tekis taqsimlanadi:

$$\sigma = Q/(4\pi R^2)$$

$$\sigma \approx 5 \times 10^{-9} / [4\pi(0.10)^2] \approx 3.98 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$$

Sirt tashqarisidagi maydon $E=\sigma/\epsilon_0 \approx 4.49 \times 10^3$ N/C. Sfera ichida esa $E=0$.

3. O'tkazgichning elektr sig'imi

Izolyatsiyalangan o'tkazgichga berilgan Q zaryad uning potensialini φ ga o'zgartiradi. Chiziqli elektrostatik sharoitda Q va φ orasida proporsionallik mavjud. O'tkazgichning elektr sig'imi:

$$C = Q/\varphi$$

Sig'im o'tkazgichning geometrik shakli, o'lchami va atrof muhitning dielektrik xossalriga bog'liq; Q yoki φ ning alohida qiymatiga bog'liq emas. SI birligi farad (F): $1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$.

Yakka metall sferaning sig'imi

Radiusi R bo'lgan izolyatsiyalangan metall sferaning potentsiali $\varphi=Q/(4\pi\epsilon_0 R)$. Shuning uchun:

$$C = 4\pi\epsilon_0 R$$

3-misol

$R=0.05$ m radiusli metall sferaning vakuumdagi sig'imi:

$$C=4\pi \cdot 8.854 \times 10^{-12} \cdot 0.05 \approx 5.56 \times 10^{-12} \text{ F} = 5.56 \text{ pF}$$

Radius ikki marta oshirilsa sig'im ham ikki marta ortadi. Bu sferik o'tkazgich sig'imining R ga to'g'ri proporsionalligini ko'rsatadi.

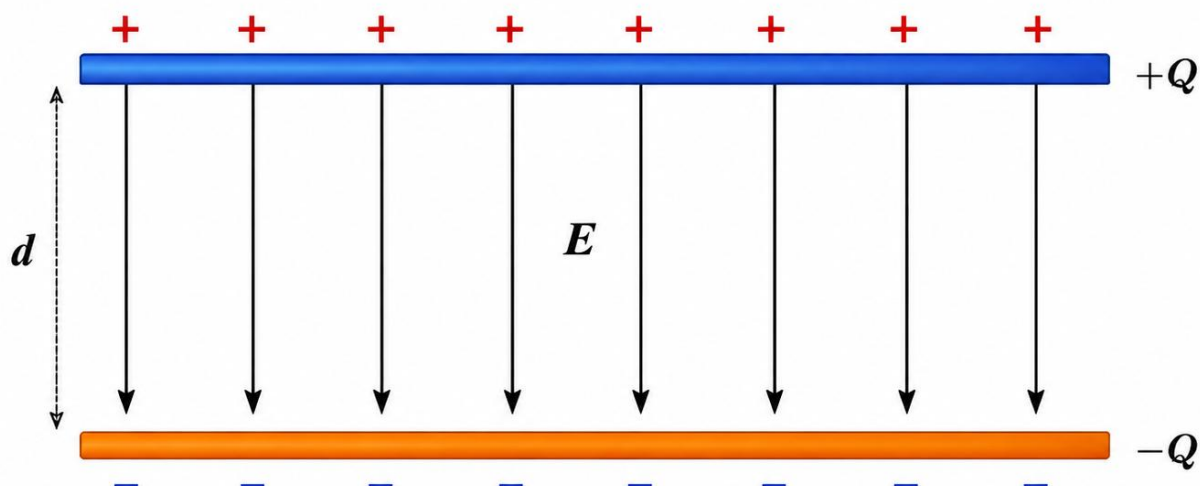
Omil	Sig'imga ta'siri
O'tkazgich o'lchami ortishi	Odatda C ortadi
Plastinalar yuzi S ortishi	Yassi kondensatorda C ortadi
Oraliq d ortishi	Yassi kondensatorda C kamayadi
ϵ_r ortishi	C ϵ_r marta ortadi

4. Kondensator va yassi kondensator sig'imi

Kondensator bir-biridan dielektrik bilan ajratilgan ikki o'tkazgichdan iborat sistema bo'lib, ular teng moduldagi qarama-qarshi zaryadlar bilan zaryadlanadi. Kondensator sig'imi bir plastinadagi Q zaryadning plastinalar orasidagi U potentsiallar farqiga nisbatidir:

$$C = Q/U$$

Yassi kondensator va uning elektr maydoni



Asosiy xossalar

- Yuqori plastina zaryadi: $+Q$
- Pastki plastina zaryadi: $-Q$
- Plastinalar orasidagi masofa: d
- Chetki effektlar e'tiborga olinmaydi ($d \ll$ plastina o'lchamlari)

Elektr maydon

Plastinalar orasida maydon bir jinsli:

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{n} \quad (\text{platinadan pastga})$$

bu yerda:

$$\sigma = \frac{Q}{S} \text{ — sirt zaryad zichligi}$$

ϵ_0 — vakuum dielektrik doimiysi

$\hat{n}$ — birlik normal (yo'nalishi pastga)

Potensiallar farqi

Plastinalar orasidagi potensiallar farqi:

$$U = E d$$

Kondensator sig'imi

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon_0 S}{d}$$

bu yerda S — plastinalar yuzasi

2-rasm. Yassi kondensatorning tuzilishi va maydon yo'nalishi

Chekka effektlari e'tiborga olinmaydigan yassi kondensator uchun $E = \sigma/\epsilon$, $U = Ed$ va $Q = \sigma S$. Natijada:

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

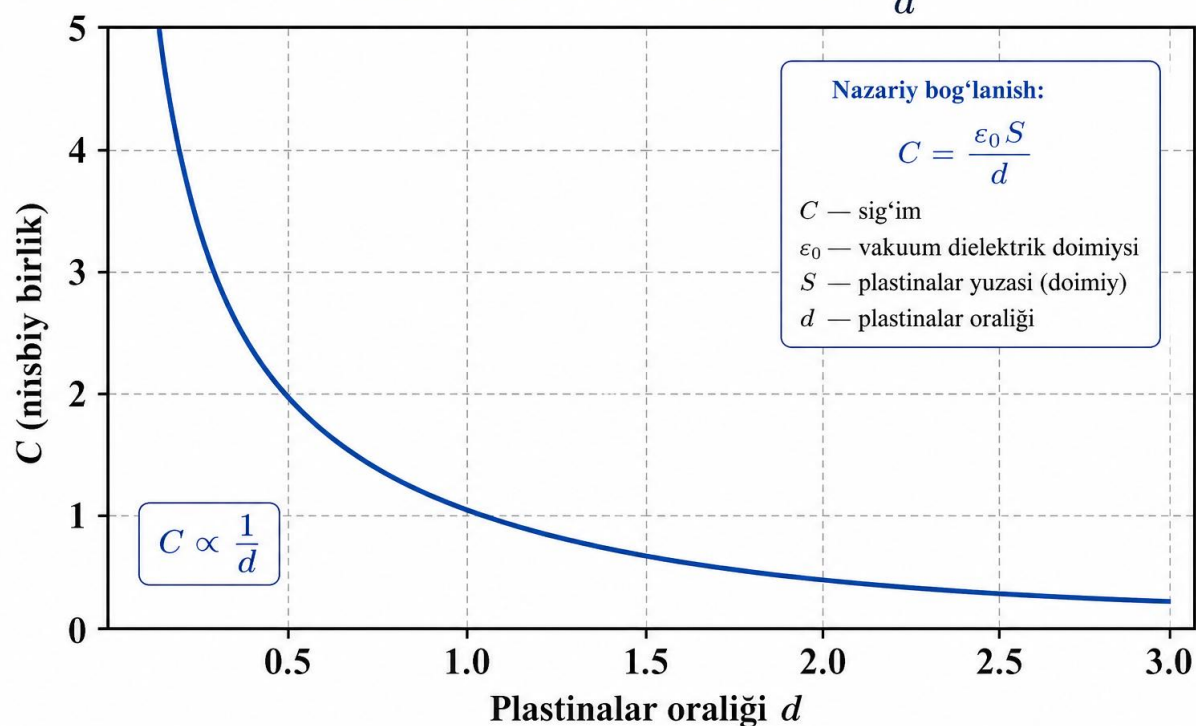
4-misol

$S = 200 \text{ cm}^2 = 0.020 \text{ m}^2$, $d = 1.0 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$ va $\epsilon_r = 4$ bo'lgan dielektrik bilan to'ldirilgan yassi kondensator sig'imi:

$$C = 8.854 \times 10^{-12} \cdot 4 \cdot 0.020 / 10^{-3} \approx 7.08 \times 10^{-10} \text{ F}$$

Demak, $C \approx 708 \text{ pF}$. Xuddi shu geometriyada vakuum bo'lsa sig'im to'rt marta kichik bo'ladi.

Yassi kondensator: $C \propto \frac{1}{d}$

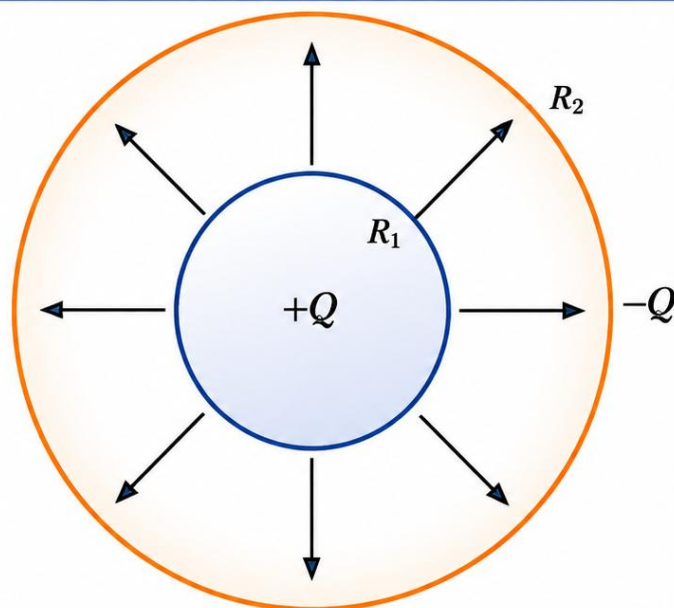


3-rasm. Yassi kondensator sig'imining plastinalar oraliği ga bog'liqligi

5. Kondensatorlarning asosiy turlari

Turi	Sig'im formulasi	Asosiy parametrlar
Yassi	$C = \epsilon S / d$	S, d, ϵ
Sferik	$C = 4\pi\epsilon R_1 R_2 / (R_2 - R_1)$	R_1, R_2, ϵ
Silindrik	$C = 2\pi\epsilon L / \ln(R_2 / R_1)$	L, R_1, R_2, ϵ

Sferik kondensator



Asosiy xossalari

- Ichki sferaning radiusi R_1 , tashqi sferaning radiusi R_2 ($R_2 > R_1$).
- Ichki sferada zaryad $+Q$, tashqi sferada zaryad $-Q$.
- Elektrostatik muvozanatda elektr maydon faqat $R_1 < r < R_2$ sohada mavjud.

Elektr maydon

$R_1 < r < R_2$ sohada:

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \quad (\text{radial yo'nalishda})$$

$r < R_1$ va $r > R_2$ sohalarida: $E = 0$

Potensiallar farqi

Ichki va tashqi sferalar orasidagi potensiallar farqi:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} Q \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Sferik kondensator sig'imi

$$C = \frac{Q}{U} = 4\pi\epsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

bu yerda:

ϵ_0 — vakuum dielektrik doimiysi
($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m)

4-rasm. Konsentrik sferalardan tashkil topgan sferik kondensator

5-misol: sferik kondensator

Vakuumda $R_1=2$ cm va $R_2=5$ cm bo'lgan sferik kondensator uchun:

$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

$$C \approx 4\pi \cdot 8.854 \times 10^{-12} \cdot (0.02 \cdot 0.05) / (0.05 - 0.02) \approx 3.71 \text{ pF}$$

R_2 juda katta bo'lsa, tashqi sfera cheksizlikka uzoqlashadi va formula yakka sfera sig'imi $C=4\pi\epsilon R_1$ ga yaqinlashadi.

Silindrik kondensator

Koaksial kabel ikki konsentrik silindrik o'tkazgichdan iborat bo'lib, uning birlik uzunlikka to'g'ri keladigan sig'imi $C/L=2\pi\epsilon/\ln(R_2/R_1)$. Bu formula kabel geometriyasining elektr parametrlariga qanday ta'sir qilishini ko'rsatadi.

6. Kondensatorlarni parallel va ketma-ket ulash

Kondensatorlarni ulash usuli sistemaning ekvivalent sig'imini belgilaydi. Parallel ulanishda barcha kondensatorlardagi kuchlanish bir xil, zaryadlar esa qo'shiladi:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Ketma-ket ulanishda har bir kondensatordagi zaryad moduli bir xil, umumiy kuchlanish esa alohida kuchlanishlarning yig'indisiga teng:

$$1/C_{eq} = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_n$$

6-misol: parallel ulash

$C_1=2 \mu F$, $C_2=3 \mu F$ va $C_3=5 \mu F$ parallel ulangan. $C_{eq}=10 \mu F$. $U=12 V$ bo'lsa, umumiy zaryad $Q=C_{eq}U=120 \mu C$.

7-misol: ketma-ket ulash

$C_1=6 \mu F$ va $C_2=3 \mu F$ ketma-ket ulangan:

$$1/C_{eq} = 1/6 + 1/3 = 1/2 \rightarrow C_{eq} = 2 \mu F$$

$U=12 V$ bo'lsa, $Q=C_{eq}U=24 \mu C$. Har ikkala kondensatorda $|Q|=24 \mu C$. Kuchlanishlar $U_1=Q/C_1=4 V$ va $U_2=Q/C_2=8 V$; $U_1+U_2=12 V$.

Ulanish	Bir xil kattalik	Ekvivalent sig'im
Parallel	U	$C_{eq}=\Sigma C_i$
Ketma-ket	$ Q $	$1/C_{eq}=\Sigma 1/C_i$

7. Kondensatorning elektr energiyasi

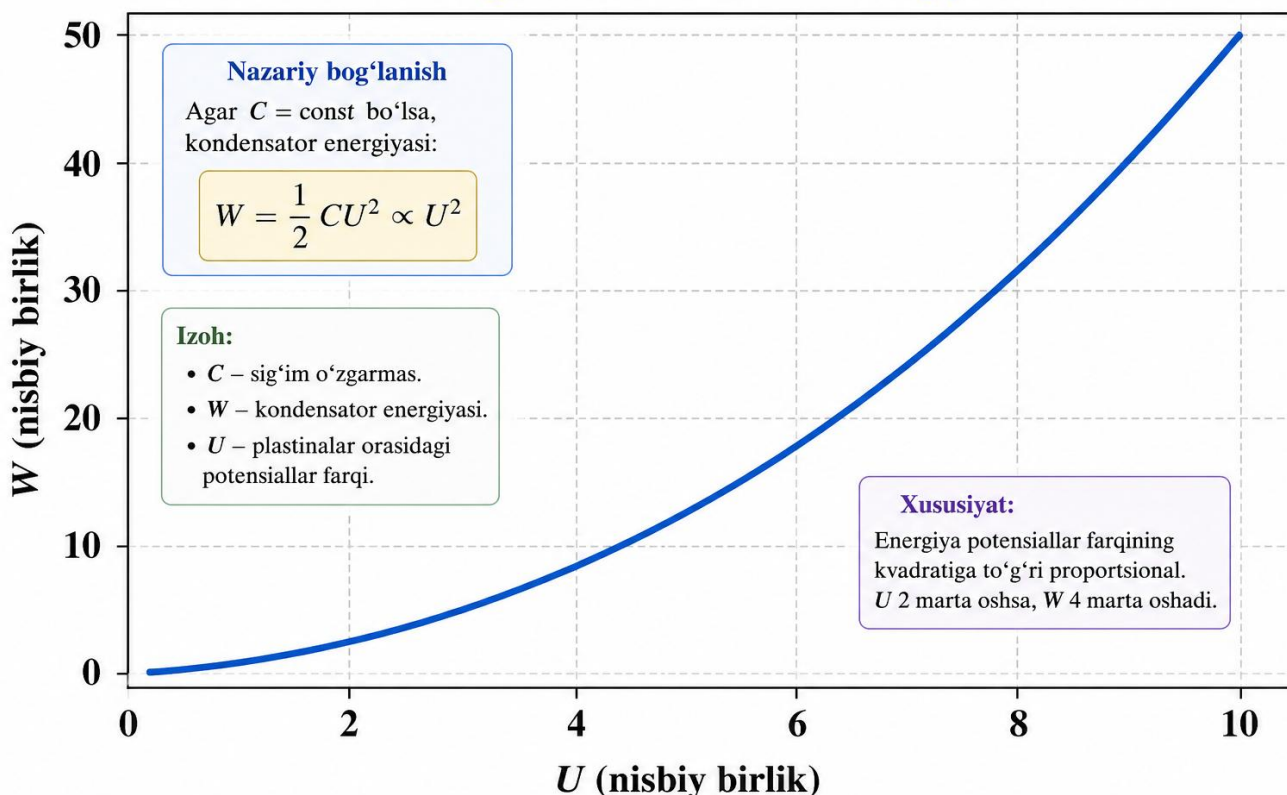
Kondensatorni zaryadlash uchun tashqi manba zaryadlarni bir plastinadan ikkinchisiga ko'chirishda ish bajaradi. Zaryadlash jarayonida kuchlanish 0 dan U gacha ortadi. Elementar ish $dA=Vdq$, bunda $V=q/C$. Integrallash natijasida kondensatorda to'plangan energiya:

$$W = \int_0^Q (q/C) dq = Q^2/(2C)$$

$Q=CU$ ni hisobga olib, energiyaning ekvivalent ko'rinishlari:

$$W = Q^2/(2C) = QU/2 = CU^2/2$$

$C = \text{const}$ bo'lganda kondensator energiyasi: $W \propto U^2$



5-rasm. C o'zgarmaganda energiyaning U^2 ga bog'liqligi

8-misol

$C=20\text{ }\mu\text{F}$ kondensator $U=100\text{ V}$ gacha zaryadlangan. Uning energiyasi:

$$W = CU^2/2 = 20 \times 10^{-6} \cdot 100^2/2 = 0.10\text{ J}$$

Kuchlanish ikki marta oshirilsa, C o'zgarmaganda energiya to'rt marta ortadi. Shu sababli yuqori kuchlanishli kondensatorlarda saqlanadigan energiya xavfsizlik nuqtai nazaridan ham muhim.

Energetik talqin

Kondensator energiyasini faqat plastinalardagi zaryadga tegishli deb emas, balki ular orasidagi elektr maydonda saqlanadigan energiya deb qarash mumkin. Bu yondashuv elektromagnit maydon nazariyasiga o'tishda fundamental ahamiyatga ega.

8. Elektr maydon energiyasining zichligi

Yassi kondensator uchun $W=CU^2/2$, $C=\epsilon S/d$ va $U=Ed$. Ushbu formulalarni birlashtiramiz:

$$W = (1/2)(\epsilon S/d)(Ed)^2 = (1/2)\epsilon E^2 \cdot Sd$$

Sd kondensator orasidagi maydon egallagan hajm V_{hajm} . Shuning uchun birlik hajmga to'g'ri keladigan energiya zichligi:

$$w = W/V_{\text{hajm}} = \epsilon E^2/2$$

Chiziqli izotrop dielektrikda $D=\epsilon E$ bo'lgani uchun:

$$w = (\vec{E} \cdot \vec{D})/2$$

9-misol

Vakuumdagi $E=3 \times 10^5\text{ V/m}$ elektr maydonning energiya zichligi:

$$w = \epsilon_0 E^2/2 = 8.854 \times 10^{-12} \cdot (3 \times 10^5)^2/2 \approx 0.398\text{ J/m}^3$$

Agar shu maydon $\epsilon_r=4$ dielektrikda aynan bir xil E qiymatida mavjud bo'lsa, chiziqli muhit modelida $w=\epsilon_0 \epsilon_r E^2/2$ bo'lib, energiya zichligi 4 marta katta chiqadi. Biroq real tajribada qaysi kattalik — Q yoki U — doimiy saqlanishi energiyaning o'zgarishini tahlil qilishda albatta ko'rsatilishi kerak.

Dielektrik kiritilganda

Shart	C o'zgarishi	Energiya o'zgarishi
$Q = \text{const}$	$C \rightarrow \epsilon_r C$	$W=Q^2/(2C)$ kamayadi
$U = \text{const}$	$C \rightarrow \epsilon_r C$	$W=CU^2/2$ ortadi

U doimiy holatda ortgan energiya manbadan keladi. Q doimiy holatda esa kondensator dielektrikni ichkariga tortishda maydon energiyasining bir qismi mexanik ishga aylanishi mumkin.

9. Darsni mustahkamlash: formulalar, masalalar va xulosa

Formula	Mazmuni
$E_{\text{ich}}=0, \varphi=\text{const}$	O'tkazgich elektrostatik muvozanati
$C=Q/U$	Kondensator sig'imi
$C=4\pi\epsilon_0 R$	Yakka sfera sig'imi

$C = \epsilon S/d$	Yassi kondensator
$C_{eq} = \sum C_i$	Parallel ulash
$1/C_{eq} = \sum 1/C_i$	Ketma-ket ulash
$W = CU^2/2 = QU/2 = Q^2/(2C)$	Kondensator energiyasi
$w = \epsilon E^2/2 = E \cdot D/2$	Elektr maydon energiya zichligi

Mustaqil yechish uchun masalalar

1. Radiusi 8 cm metall sferaning vakuumdagi sig'imini toping.
2. $S=0.03 \text{ m}^2$, $d=2 \text{ mm}$ yassi kondensatorning vakuumdagi sig'imini hisoblang.
3. $4 \mu\text{F}$ va $12 \mu\text{F}$ kondensatorlar ketma-ket ulanganda ekvivalent sig'imni toping.
4. $C=50 \mu\text{F}$ kondensator 200 V gacha zaryadlangan. Undagi energiyani aniqlang.
5. $\epsilon_r=3$ muhitda $E=2 \times 10^5 \text{ V/m}$ bo'lsa, elektr maydon energiya zichligini hisoblang.
6. Zaryadi uzilgan kondensatorga $\epsilon_r=5$ dielektrik kiritilsa, C , U va W qanday o'zgaradi?

Xulosa

Elektrostatik muvozanatda o'tkazgich ichidagi elektr maydon nol, potensial esa butun o'tkazgich bo'ylab doimiy bo'ladi; ortiqcha zaryad sirtga joylashadi. Elektr sig'imi o'tkazgich yoki kondensatorning zaryad to'plash qobiliyatini ifodalaydi va asosan geometriya hamda muhitning dielektrik xossalariga bog'liq. Yassi, sferik va silindrik kondensatorlar turli geometriyalarda elektr maydonni boshqarish va energiya saqlash imkonini beradi. Kondensatorda to'plangan $W=CU^2/2$ energiya aslida elektr maydonda taqsimlangan bo'lib, uning hajmiy zichligi chiziqli izotrop muhitda $w=\epsilon E^2/2$ bilan ifodalanadi. Ushbu tushunchalar elektr zanjirlari, elektronika, yuqori kuchlanish texnikasi va elektromagnit maydon nazariyasining keyingi mavzulari uchun muhim ilmiy asos yaratadi.

Tavsiya etiladigan adabiyotlar

1. Griffiths D. J. Introduction to Electrodynamics. Cambridge University Press.
2. Halliday D., Resnick R., Walker J. Fundamentals of Physics. Wiley.
3. Young H. D., Freedman R. A. University Physics with Modern Physics. Pearson.
4. Serway R. A., Jewett J. W. Physics for Scientists and Engineers. Cengage.