

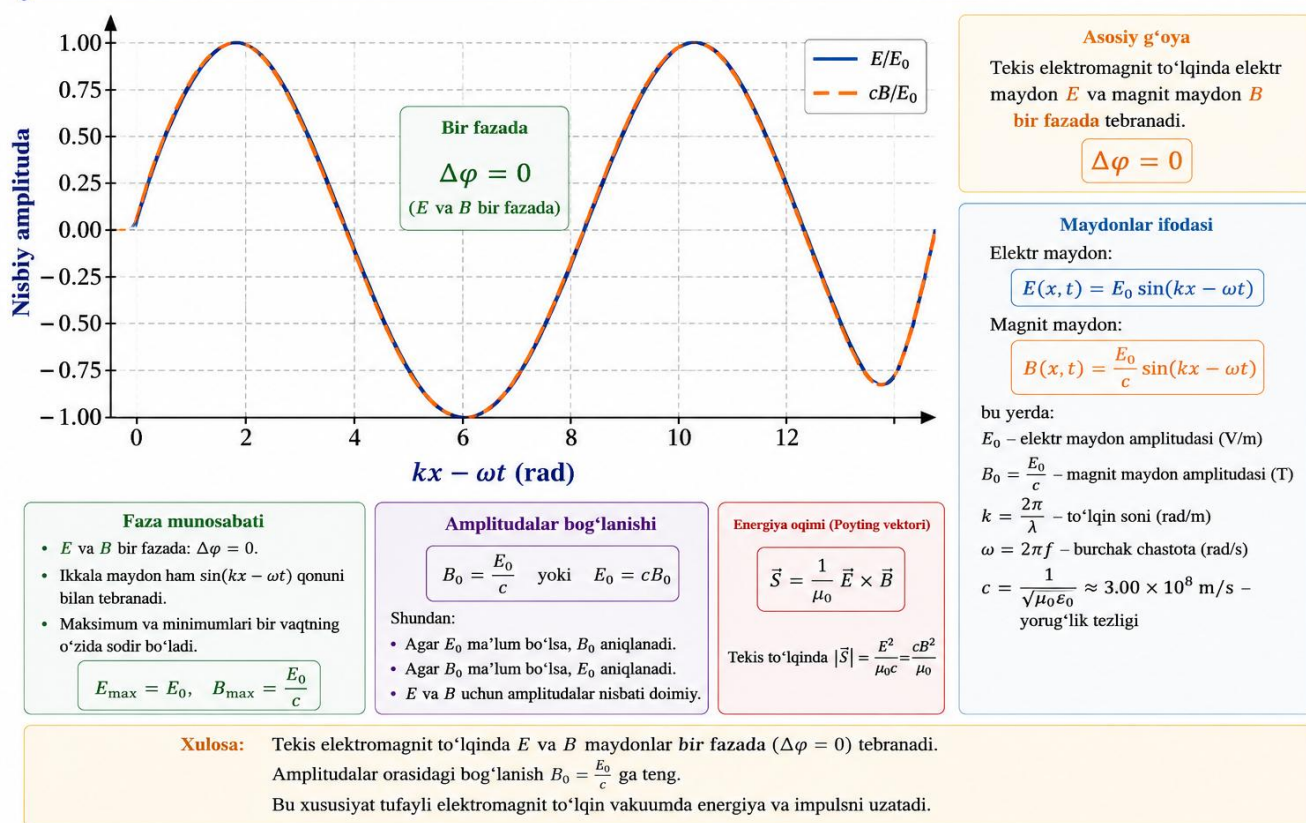
ELEKTROMAGNIT TO'LQINLAR. XUSUSIYATLARI VA UMOV–POYNTING VEKTORI

Elektromagnit to'lqinlar — vaqt bo'yicha o'zgaruvchi elektr va magnit maydonlarning fazoda o'zaro bog'langan holda tarqalishidir. Maksvell nazariyasiga ko'ra, o'zgaruvchan elektr maydon magnit maydonni, o'zgaruvchan magnit maydon esa uyurmaviy elektr maydonni hosil qiladi. Shu o'zaro induksiyaning natijasida elektromagnit maydon manbadan ajralib, vakuumda yorug'lik tezligida tarqala oladi. Radioaloqa, optika, radar, sun'iy yo'ldosh tizimlari, rentgen diagnostikasi va zamonaviy telekommunikatsiyalar elektromagnit to'lqinlar fizikasi bilan bevosita bog'liq.

Darsning maqsadi

Maksvell tenglamalaridan elektromagnit to'lqin tenglamasini keltirib chiqarish; tekis garmonik to'lqinda E va B maydonlarning yo'nalishi, fazasi va amplitudalari orasidagi bog'lanishni tushuntirish; elektromagnit spektrni tasniflash; energiya zichligi, intensivlik va Umov–Poynting vektorining fizik mazmunini formulalar va hisoblash misollari orqali ochib berish.

Tekis elektromagnit to'lqinda E va B bir fazada



1-rasm. Tekis elektromagnit to'lqinda elektr va magnit maydonlarning sinxron o'zgarishi

Kattalik	Belgi	SI
Elektr maydon	E	V/m
Magnit induksiya	B	T
To'lqin uzunligi	λ	m
Chastota	f	Hz
Burchak chastota	ω	rad/s

To'lqin soni	k	rad/m
Poynting vektori	S	W/m ²
Energiya zichligi	w	J/m ³

1. Elektromagnit to'lqinning hosil bo'lishi

Vakuumda erkin zaryad va o'tkazuvchanlik toki bo'lmagan sohada Maksvell tenglamalarining ikki uyurmaviy tenglamasi asosiy rol o'ynaydi:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \partial \mathbf{E} / \partial t$$

Birinchi tenglamaning rotorini olib, $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$ ayniyatidan va vakuumda $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ shartidan foydalanamiz:

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\partial(\nabla \times \mathbf{B}) / \partial t$$

Ampere–Maksvell tenglamasini qo'ysak:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \epsilon_0 \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 = 0$$

Xuddi shu usulda magnit maydon uchun:

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \mu_0 \epsilon_0 \partial^2 \mathbf{B} / \partial t^2 = 0$$

Standart to'lqin tenglamasi bilan taqqoslashdan tarqalish tezligi:

$$c = 1/\sqrt{(\mu_0 \epsilon_0)} \approx 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

1-misol

$\mu_0 \approx 1.256637 \times 10^{-6} \text{ H/m}$ va $\epsilon_0 \approx 8.854188 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ qiymatlari uchun $c = 1/\sqrt{(\mu_0 \epsilon_0)} \approx 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$. Bu natija elektromagnit to'lqinlarning vakuumdagi tezligi yorug'lik tezligiga tengligini ko'rsatadi.

2. Tekis garmonik elektromagnit to'lqin

x yo'nalishda tarqalayotgan tekis monoxromatik to'lqin uchun elektr maydon y, magnit maydon z yo'nalishda tanlanishi mumkin:

$$\mathbf{E}_y(x,t) = E_0 \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

$$\mathbf{B}_z(x,t) = B_0 \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

Bu yerda $k = 2\pi/\lambda$ — to'lqin soni, $\omega = 2\pi f$ — burchak chastota. Vakuumda dispersiya munosabati:

$$\omega = ck, \quad c = \lambda f$$

Maksvell tenglamalaridan amplitudalar orasidagi bog'lanish:

$$E_0 = cB_0$$

E va B bir fazada bo'lib, ikkalasi ham tarqalish yo'nalishiga perpendikulyar. Shu sababli elektromagnit to'lqin ko'ndalang to'lqindir.

2-misol

$f = 100 \text{ MHz}$ radio to'lqin vakuumda tarqalsa, $\lambda = c/f \approx 3.00 \text{ m}$. Agar $E_0 = 60 \text{ V/m}$ bo'lsa, $B_0 = E_0/c \approx 2.00 \times 10^{-7} \text{ T}$.

3-misol

$\lambda = 600 \text{ nm}$ ko'rinadigan yorug'lik uchun $f = c/\lambda \approx 5.00 \times 10^{14} \text{ Hz}$ va $\omega = 2\pi f \approx 3.14 \times 10^{15} \text{ rad/s}$.

3. Elektromagnit to'lqinlarning asosiy xususiyatlari

Elektromagnit to'lqinlar vakuumda moddiy muhit talab qilmasdan tarqaladi. Ular ko'ndalang bo'lib, E va B vektorlari o'zaro hamda tarqalish yo'nalishiga perpendikulyar. Vakuumda barcha chastotalar ideal klassik modelda bir xil c tezlik bilan tarqaladi. Moddiy muhitda esa tezlik, yutilish va dispersiya chastotaga bog'liq bo'lishi mumkin.

Elektromagnit to'lqinlar qaytish, sinish, interferensiya, difraksiya va qutblanish hodisalarini namoyon qiladi. Qutblanish ayniqsa to'lqinning ko'ndalang tabiatini tasdiqlovchi muhim hodisadir. To'lqin energiya va impuls tashiydi; shu sababli modda bilan o'zaro ta'sirda nurlanish bosimi yuzaga kelishi mumkin.

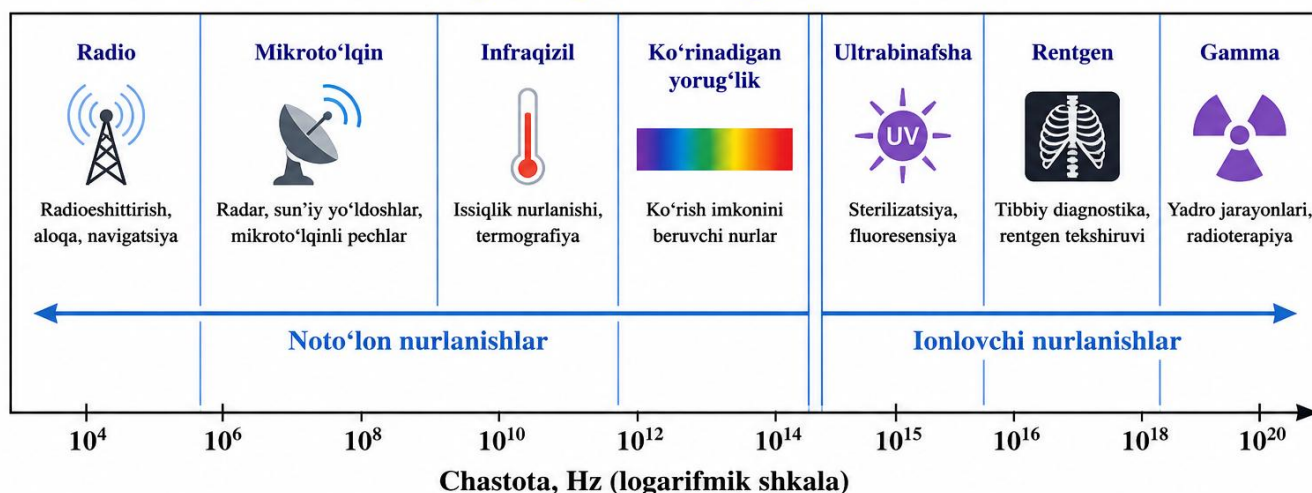
Xususiyat	Fizik mazmun
Ko'ndalanglik	$E \perp B \perp$ tarqalish yo'nalishi
Vakuumdagi tezlik	$c \approx 2.998 \times 10^8$ m/s
Faza	Tekis to'lqinda E va B bir fazada
Amplituda	Vakuumdada $E_0 = cB_0$
Energiya	Elektr va magnit maydonlarda saqlanadi
Impuls	Nurlanish modda bilan ta'sirlashganda impuls uzatadi
Qutblanish	E vektor yo'nalishining tartiblangan xususiyati

Chastota va to'lqin uzunligi bir-biriga $\lambda = c/f$ orqali bog'langan. Chastota oshgani sari vakuumdagi λ kamayadi, lekin tarqalish tezligi o'zgarmaydi.

4. Elektromagnit spektr

Elektromagnit spektr radio to'lqinlardan gamma nurlanishigacha bo'lgan juda keng chastota oralig'ini qamrab oladi. Spektr bo'linmalari qat'iy mutlaq chegaralar emas; ular hosil bo'lish mexanizmi, qo'llanish sohasi va modda bilan o'zaro ta'sir xususiyatlari bo'yicha amaliy tasnifdir.

Elektromagnit spektrning sxematik tasnifi



Asosiy xususiyatlar

- Chastota (ν) ortishi bilan to'lqin uzunligi (λ) kamayadi: $\lambda = \frac{c}{\nu}$
- $c = 3.00 \times 10^8$ m/s – vakuumdagi yorug'lik tezligi
- Past chastotalar: radio va mikroto'lqinlar – aloqa va texnologiyada keng qo'llaniladi.
- O'rta chastotalar: infraqizil va ko'rinadigan yorug'lik – issiqlik va ko'rish bilan bog'liq.
- Yuqori chastotalar: UV, rentgen va gamma nurlar – atom va yadro darajasidagi jarayonlarda ishtirok etadi.

Ionlovchi nurlanishlar

Chastotasi $\nu \geq 10^{15}$ Hz (yoki energiyasi $E = h\nu \geq 10$ eV) bo'lgan nurlar modda atomlarini ionlaydi.
Bu soha: ultrabinafsha (qisman), rentgen va gamma nurlarga kiradi.

Eslatma: Elektromagnit spektr uzluksiz bo'lib, bu chiziqlar taxminiy chegara qiymatlarni ko'rsatadi.
Amalda chegaralar qat'iy emas va bir sohadan boshqasiga o'tish yumshoq kechadi.

2-rasm. Elektromagnit spektrning chastota bo'yicha sxematik ko'rinishi

Soha	Taxminiy xususiyat	Tipik qo'llanish
Radio	Uzun λ , past f	Radio va telealoqa
Mikroto'lqin	cm–mm diapazonlar	Radar, aloqa, isitish
Infraqizil	Issiqlik nurlanishi bilan bog'liq	Termografiya, sensorlar
Ko'rinadigan	Inson ko'zi sezadigan diapazon	Optika, yoritish
Ultrabinafsha	Ko'rinadigan yorug'likdan yuqori f	Fotokimyo, spektroskopiya
Rentgen	Juda qisqa λ	Tasvirlash, kristallografiya
Gamma	Eng yuqori f diapazonlari	Yadro va yuqori energiya jarayonlari

4-misol

$f=2.4$ GHz signal uchun $\lambda=c/f \approx 0.125$ m=12.5 cm. Bu chastota mikroto'lqin diapazoniga kiradi.

5. Elektromagnit maydon energiyasi

Elektromagnit maydonning vakuumdagi elektr va magnit energiya zichliklari:

$$w_E = \epsilon_0 E^2 / 2$$

$$w_B = B^2 / (2\mu_0)$$

Tekis elektromagnit to'lqinda $E=cB$ va $c^2=1/(\mu_0\epsilon_0)$. Shuning uchun:

$$w_E = w_B$$

Umumiy oniy energiya zichligi:

$$w = w_E + w_B = \epsilon_0 E^2 = B^2 / \mu_0$$

Demak, ideal tekis elektromagnit to'liqida elektr va magnit maydon energiyalari teng ulushda taqsimlangan.

5-misol

$E=100$ V/m oniy elektr maydon uchun $w=\epsilon_0 E^2 \approx 8.85 \times 10^{-8}$ J/m³. Uning yarmi elektr, yarmi magnit komponent hissasidir.

6-misol

$B=1$ μ T bo'lsa, $w=B^2/\mu_0 \approx 7.96 \times 10^{-7}$ J/m³. Shu paytdagi $E=cB \approx 300$ V/m.

Energiya zichligi maydon amplitudasining kvadratiga bog'liq. Shu sababli E amplitudasi ikki marta ortsa, energiya zichligi va o'rtacha intensivlik to'rt marta ortadi.

6. Umov–Poynting vektori

Elektromagnit maydon energiyasining fazodagi oqimini tavsiflovchi vektor Umov–Poynting vektori deb ataladi. SI tizimida:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

Vakuumda $H=B/\mu_0$:

$$\mathbf{S} = (1/\mu_0) \mathbf{E} \times \mathbf{B}$$

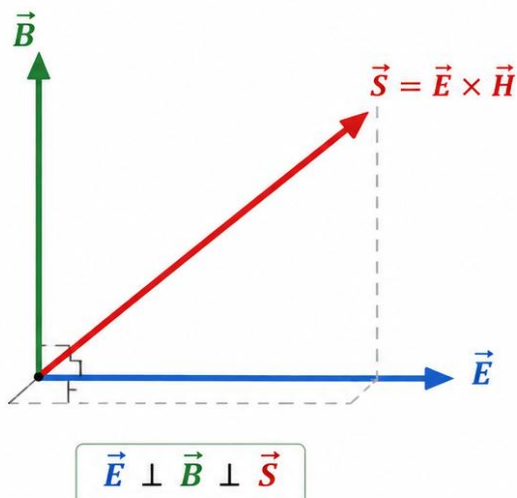
$\mathbf{S}$ vektorining yo'nalishi $\mathbf{E}$ dan $\mathbf{H}$ (yoki $\mathbf{B}$) ga o'ng vint qoidasi bo'yicha aniqlanadi va tekis to'liqida energiyaning tarqalish yo'nalishiga mos keladi. $|\mathbf{S}|$ birlik yuzadan birlik vaqtda o'tayotgan elektromagnit energiya oqimining oniy zichligini beradi.

Umov–Poynting vektorining yo‘nalishi

Elektromagnit to‘lqinda energiya oqimi $\vec{E}$ va $\vec{B}$ maydonlarining vektor ko‘paytmasi –

Umov–Poynting vektori $\vec{S}$ bilan aniqlanadi:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (\text{W/m}^2)$$



Yo‘nalish qoidasi (o‘ng qo‘l qoidasi)

O‘ng qo‘lning barmoqlarini quyidagicha joylashtiramiz:

- **Ko‘rsatkich barmoq** – $\vec{E}$ (elektr maydon)
- **O‘rta barmoq** – $\vec{B}$ (magnit maydon)
- **Bosh barmoq** – $\vec{S}$ (energiya oqimi yo‘nalishi)

U holda bosh barmoq $\vec{S}$ (Umov–Poynting vektori) yo‘nalishini ko‘rsatadi.

Fizik ma‘no

$\vec{S}$ – birlik yuzadan bir birlik vaqt oralig‘ida o‘tuvchi elektromagnit energiya quvvatining zichligini bildiradi.

$$|\vec{S}| = \frac{dW}{dA dt} \quad (\text{W/m}^2)$$

Xususiyatlar

• $\vec{E}$, $\vec{B}$ va $\vec{S}$ o‘zaro perpendikulyar:	$\vec{E} \perp \vec{B}$, $\vec{E} \perp \vec{S}$, $\vec{B} \perp \vec{S}$
• $ \vec{S} $ (energiyaning oqim zichligi):	$ \vec{S} = \frac{1}{\mu_0} EB = \epsilon_0 c E^2 = \frac{1}{\mu_0 c} B^2$
• Yo‘nalish:	To‘lqin tarqalish yo‘nalishida (fazalar yuki bo‘ylab)
• O‘lchov birligi:	W/m ²

Xulosa: Elektromagnit to‘lqinda energiya $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ yo‘nalishida tarqaladi. $\vec{E}$ va $\vec{B}$ bir-biriga perpendikulyar bo‘lib, ular bilan $\vec{S}$ ham o‘zaro perpendikulyar (o‘ng qo‘l qoidasi bo‘yicha).

3-rasm. Umov–Poynting vektori: E , B va energiya oqimi yo‘nalishlarining o‘zaro perpendikulyarligi

Tekis vakuum to‘lqinida:

$$\mathbf{S} = \mathbf{EB}/\mu_0 = \epsilon_0 c \mathbf{E}^2$$

Sinusoidal to‘lqin uchun davr bo‘yicha o‘rtacha intensivlik:

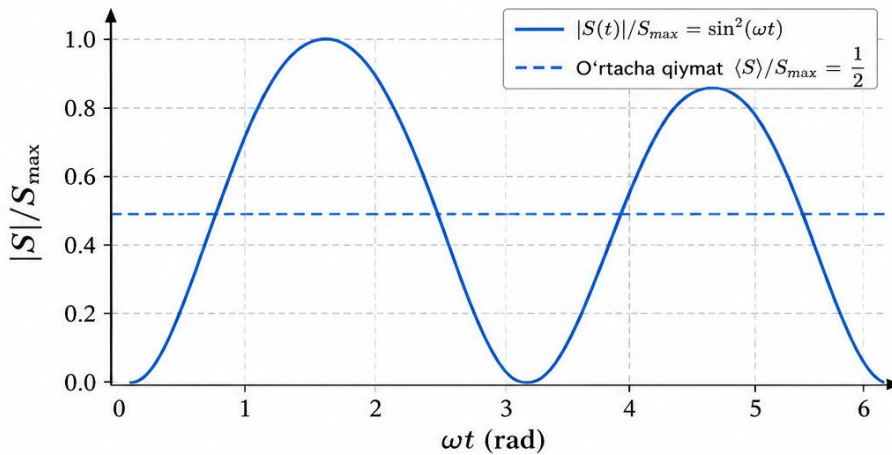
$$\langle \mathbf{S} \rangle = (1/2)\epsilon_0 c E_0^2 = c B_0^2 / (2\mu_0)$$

7. Intensivlik va energiya oqimini hisoblash

Sinusoidal to‘lqinda $E = E_0 \cos(kx - \omega t)$ bo‘lsa, Poynting vektori $\cos^2$ qonun bo‘yicha o‘zgaradi. Uning bir davrdagi o‘rtacha qiymati maksimal qiymatning yarmiga teng.

Sinusoidal elektromagnit to'qlinda o'rtacha energiya oqimi

Sinusoidal tekis elektromagnit to'qlinda (E va B vaqt bo'yicha sinusoidal o'zgaradi) energiya oqimi (Poynting vektori moduli) va uning o'rtacha qiymati.



Nazariy ma'lumotlar

Tekis EM to'qlinda

$$S = E \times H \quad (\text{W/m}^2)$$

Agar

$$E = E_m \sin(\omega t - kx)$$

$$H = H_m \sin(\omega t - kx)$$

bo'lsa, unda

$$|S(t)| = EH = E_m H_m \sin^2(\omega t - kx)$$

$$S_{\max} = E_m H_m = \frac{E_m^2}{\eta} = \eta H_m^2$$

bu yerda $\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \, \Omega$ – bo'shliq (vakuum) to'liq qarshiligi.

O'rtacha energiya oqimi

Bir xil yo'nalishda vaqt bo'yicha o'rtacha qiymat:

$$\langle S \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T S_{\max} \sin^2(\omega t) dt = \frac{S_{\max}}{2}$$

$$\langle S \rangle = \frac{S_{\max}}{2}$$

Grafikdan ko'rinadi

- $|S| = 0$ bo'ladi: $\omega t = n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)
- Maksimum: $|S|_{\max} = S_{\max}$ ($\omega t = \frac{\pi}{2} + n\pi$)
- O'rtacha qiymat doimiy: $\langle |S| \rangle = \frac{1}{2} S_{\max}$
- Davriy: $T = \frac{2\pi}{\omega}$

Fizik ma'no

Sinusoidal EM to'qlinda energiya oqimi vaqt bo'yicha nol va maksimum qiymatlar orasida tebranadi, lekin uzoq muddatda o'rtacha qiymat $\frac{1}{2} S_{\max}$ ga teng bo'ladi. Bu qiymat to'liq tashiyotgan o'rtacha energiya zichligiga to'g'ri keladi.

Xulosa: Sinusoidal tekis elektromagnit to'qlinda Poynting vektori moduli $|S(t)| = S_{\max} \sin^2(\omega t)$ qonun bo'yicha o'zgaradi. Uning vaqt bo'yicha o'rtacha qiymati $\langle S \rangle = \frac{1}{2} S_{\max}$ ga teng.

4-rasm. Sinusoidal elektromagnit to'qlinda normallashtirilgan o'rtacha Poynting oqimi

7-misol

$E_0 = 120 \, \text{V/m}$ bo'lgan tekis vakuum to'liq uchun o'rtacha intensivlik $\langle S \rangle = (1/2)\epsilon_0 c E_0^2 \approx 19.1 \, \text{W/m}^2$.

8-misol

Yuzasi $A = 0.50 \, \text{m}^2$ bo'lgan sirt to'liq tarqalishiga perpendikulyar va $\langle S \rangle = 200 \, \text{W/m}^2$ bo'lsa, undan o'tuvchi o'rtacha quvvat $P = \langle S \rangle A = 100 \, \text{W}$.

Agar sirt normal bilan S orasida θ burchak bo'lsa, quvvat $P = \int S \cdot dA$; bir jinsli oqimda $P = SA \cos \theta$. Bu vektor xususiyat energiya oqimining faqat sirt normaliga proyeksiyasi hisobga olinishini ko'rsatadi.

$$P = \int S \cdot dA$$

8. Sferik to'liq, intensivlik va nurlanish bosimi

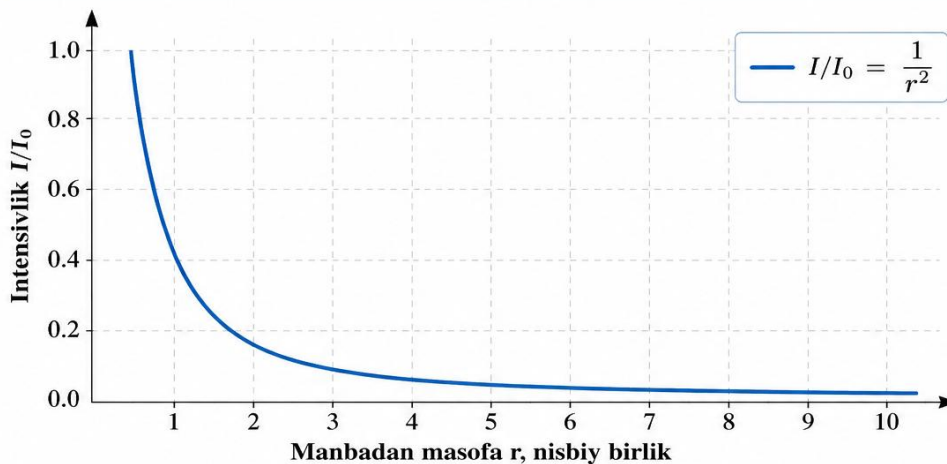
Izotrop nuqtaviy manba vakuumga P quvvat tarqatsa va yutilish bo'lmasa, energiya r radiusli sferaning $4\pi r^2$ yuzasiga taqsimlanadi:

$$I(r) = P/(4\pi r^2)$$

Shu sababli intensivlik masofaning kvadratiga teskari proporsional kamayadi. Bu natija energiya saqlanishining geometrik oqibatidir.

Sferik to'liq intensivligining $1/r^2$ bo'yicha kamayishi

Nuqtaviy manbadan tarqalgan sferik to'liq uzunlashgan sari intensivligi masofa kvadratiga teskari proporsional ravishda kamayadi.



Fizik ma'no

To'liq manbadan qancha uzoqlashsa, uning energiyasi katta sferik yuzaga tarqaladi, natijada birlik yuzaga tushadigan quvvat (intensivlik) $1/r^2$ qonun bo'yicha kamayadi.

Nazariy tushuntirish

Nuqtaviy manba (izotrop manba)ning to'liq quvvati P barcha yo'nalishlarda teng taqsimlanadi.

Radiusi r bo'lgan sfera yuzasi:

$$A = 4\pi r^2$$

Intensivlik:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Shunday qilib,

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{r^2}$$

bu yerda $I_0 - r = 1$ masofadagi intensivlik (boshlang'ich qiymat).

Ba'zi nuqtalarda nisbiy intensivlik qiymatlari ($I/I_0 = 1/r^2$)

r	1	2	3	4	5	6	8	10
I/I_0	1.000	0.250	0.111	0.0625	0.040	0.028	0.0156	0.010

- Xulosa:**
- Sferik to'liq intensivligi manbadan masofa r ortishi bilan $1/r^2$ qonuniga muvofiq kamayadi.
 - Bu bog'lanish nuqtaviy (izotrop) manba uchun haqiqiy bo'lib, energiyaning sferik sirt bo'yicha saqlanish qonunidan kelib chiqadi.

5-rasm. Sferik elektromagnit to'liq intensivligining masofaga bog'liqligi

9-misol

Izotrop manba $P=100$ W quvvat nurlatsa, $r=2$ m da $I=100/(4\pi \cdot 4) \approx 1.99$ W/m². $r=4$ m da intensivlik to'rt marta kamayib ≈ 0.497 W/m² bo'ladi.

Elektromagnit to'liq impuls ham tashiydi. Normal tushishda to'liq yutiluvchi sirt uchun nurlanish bosimi $p=I/c$, ideal qaytaruvchi sirt uchun $p=2I/c$. Bu effekt juda kichik bo'lsa-da, yuqori intensivliklarda va kosmik texnologiyalarda ahamiyatli.

Darsni tashkil etish metodikasi

Dars Maksvell tenglamalaridan to'liq tenglamasiga o'tish bilan boshlanadi. Keyin E , B va tarqalish yo'nalishi maket yoki vektor sxemada ko'rsatiladi. Elektromagnit spektr jadvali orqali λ va f bog'lanishi mustahkamlanadi. Energetik qismda $w_E = w_B$ natijasi chiqarilib, Umov–Poynting vektori yordamida energiya oqimi va intensivlik masalalari yechiladi.

9. Asosiy formulalar, mustaqil topshiriqlar va xulosa

Formula	Mazmuni
$\nabla^2 E - \mu_0 \epsilon_0 \partial^2 E / \partial t^2 = 0$	Elektr maydon to'liq tenglamasi
$c = 1/\sqrt{(\mu_0 \epsilon_0)}$	Vakuumdagi tarqalish tezligi
$c = \lambda f$	To'liq uzunligi–chastota bog'lanishi
$E_0 = c B_0$	Tekis vakuum to'liqini amplitudalari
$w_E = \epsilon_0 E^2 / 2$	Elektr energiya zichligi
$w_B = B^2 / (2\mu_0)$	Magnit energiya zichligi

$S=E \times H$	Umov–Poynting vektori
$\langle S \rangle = \epsilon_0 c E_0^2 / 2$	Sinusoidal to'lqin intensivligi
$I = P / (4\pi r^2)$	Izotrop manba intensivligi

Mustaqil topshiriqlar

1. $f=150$ MHz radio to'lqin uchun vakuumdagi λ ni hisoblang.
2. $\lambda=500$ nm yorug'likning f va ω qiymatlarini toping.
3. $E_0=200$ V/m bo'lgan tekis to'lqinning B_0 amplitudasini aniqlang.
4. $E_0=50$ V/m uchun o'rtacha Poynting intensivligini hisoblang.
5. $P=500$ W izotrop manbaning $r=5$ m masofadagi intensivligini toping.
6. E , B va S vektorlarining yo'nalishlarini o'ng vint qoidasi yordamida chizing va izohlang.
7. Elektromagnit to'lqinlarning qaytish, sinish, interferensiya, difraksiya va qutblanish xususiyatlarini optik misollar bilan tushuntiring.

Yakuniy xulosa

Elektromagnit to'lqinlar Maksvell tenglamalaridan tabiiy ravishda kelib chiqadigan, o'zaro bog'langan elektr va magnit maydonlarning fazoda tarqaluvchi holatidir. Vakuumda ular $c=1/\sqrt{(\mu_0\epsilon_0)}$ tezlik bilan tarqaladi, E va B bir fazada bo'lib, $E \perp B \perp k$ shartini bajaradi va $E_0=cB_0$ munosabat bilan bog'langan. Elektromagnit to'lqin energiya va impuls tashiydi; energiya oqimining lokal yo'nalishi hamda zichligi Umov–Poynting vektori $S=E \times H$ orqali tavsiflanadi. Sinusoidal tekis to'lqinning o'rtacha intensivligi maydon amplitudasining kvadratiga proporsional. Ushbu nazariya radioaloqadan optikagacha, radar, lazer, antennalar va zamonaviy axborot uzatish tizimlarigacha bo'lgan ko'plab texnologiyalarning fundamental fizik asosini tashkil etadi.

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. Purcell E. M., Morin D. Electricity and Magnetism. Cambridge University Press.