

4 - дәріс

Тақырып: Электростатикалық өріс энергиясы

Дәріс мазмұны: 1. Электр зарядтарының энергиясы. 2. Зарядталған конденсатордың энергиясы. 3. Өзара әсерлесуші зарядтардың энергиясы. 4. Зарядталған өткізгіштің энергиясы.

1. Электр зарядтарының энергиясы

Оңашаланған өткізгішке q зарядын берейік. Онда оның айналасында электр өрісі пайда болады және өрістің потенциалы φ болады. Өткізгіштің зарядын dq шамаға арттыру үшін ол зарядты шексіздіктен өткізгіштің бетіне әкелу керек, оған қажетті

$$dA = (\varphi - \varphi_{\infty})dq = \varphi dq = \frac{q dq}{C},$$

жұмыс жасау керек, егер $\varphi_{\infty} = 0$ деп есептесек. Бұл жұмыс өткізгіштің электр өрісінің күштеріне қарсы жұмыс жасайтын сыртқы күштердің көмегімен орындалады. dq заряды керісінше, өткізгіштің бетінен шексіздікке орын ауыстырса, электр өрісінің күштері сондай мөлшердегі dA жұмыс атқарады. Демек, зарядталған өткізгіштерде разрядталу жұмысын W потенциалдық энергия болады. Өткізгіштің зарядын dq шамаға арттырғанда, оның потенциалды энергиясы dW шамаға өседі, ол сыртқы күштердің жасаған dA жұмысына тең:

$$dW = dA = \frac{1}{C} q dq. \quad (14.1)$$

Зарядталмаған ($q=0$ және $\varphi=0$), өзінің айналасында электр өрісі жоқ, өткізгіштің потенциалдық энергиясын нөлге тең деп есептейміз. Заряды біршамаға жеткен өткізгіштің W энергиясын (4.1) өрнегін интегралдау арқылы табуға болады:

$$W = \int_0^q dW = \int_0^q \frac{1}{C} q dq = \frac{1}{C} \int_0^q q dq = \frac{q^2}{2C}.$$

Өткізгіш заряды мен потенциалы арасындағы тәуелділікті пайдаланып, зарядталған өткізгіштің энергиясы үшін келесі түрдегі өрнекті алуға болады:

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{q\varphi}{2} = \frac{C\varphi^2}{2}. \quad (4.2)$$

Зарядталған өткізгіштің ішінде өріс жоқ. Өткізгішті зарядтағанда, электр өрісі тек өткізгішті қоршаған ортада болады. Сондықтан, зарядталған өткізгіштің электр энергиясы өткізгішті қоршаған ортадағы электр өрісінде шоғырланған және онда белгілі бір көлемдік тығыздықпен таралған, электр өрісінің кернеулігі өткізгішке дейінгі қашықтыққа тәуелді.

2. Зарядталған конденсатордың энергиясы

Енді жазық конденсатордың астарлары арасындағы біртекті өрісті қарастырайық. Мұндай конденсатордың зарядталу процесінде шексіз аз dq заряд біртіндеп бір пластинадан екінші пластинаға өтеді. Соның нәтижесінде бір пластина оң, ал екіншісі теріс зарядталады деп есептеуге болады және олардың арасында біртіндеп өсетін $U = \frac{q}{C}$ потенциалдар айырымасы пайда болады. Оңашаланған өткізгіш үшін дәлелденген қорытындыны қайталап, зарядталған конденсатордың толық электрстатикалық энергиясы үшін өрнекті жазуға болады:

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2}, \quad (4.3)$$

(4.3) өрнекке жазық конденсатордың сыйымдылығы мен потенциалдар айырымының мәндерін ($C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{S \cdot d}$ және $E = \frac{U}{d}$) қойсақ, түрлендірілгеннен кейін алатынымыз:

$$W = CU^2 / 2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2d} S \cdot E^2 d^2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} Sd = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} \cdot V. \quad (4.4)$$

Мұндағы E - конденсатордың ішіндегі электр өрісінің кернеулігі, ал $V = Sd$ – конденсатордың көлемі. Бірлік көлемдегі энергия немесе электр өрісінің энергиясының көлемдік тығыздығы:

$$\omega = W / V = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 / 2. \quad (4.5)$$

Бұдан – көлемдік тығыздық электр өрісінің кернеулігінің квадратына тура пропорционал екені шығады. (4.5) қатынас өріс кернеулігі E және энергия тығыздығы ω нүктеден нүктеге өзгертін біртекті емес кез келген өріс үшін орынды болып қала береді. Изотропты диэлектриктерде \vec{E} және \vec{D} векторларының бағыттары сәйкес келеді. Сондықтан энергия тығыздығы үшін формуланы былай беруге болады:

$$\omega = \vec{E} \vec{D} / 2 = \frac{E(\varepsilon_0 E + P)}{2} = \vec{E} \frac{\varepsilon_0}{2} + \vec{E} \vec{P} / 2. \quad (4.6)$$

Бірінші қосынды вакуумдағы \vec{E} өріс энергиясының тығыздығына, ал екінші қосынды диэлектрикті полярлауға (поляризациялауға) жұмсалатын энергияға сәйкес келеді.

3. Өзара әсерлесуші зарядтардың энергиясы

Электр өрісі электр зарядтарымен үздіксіз байланысқандықтан, W өріс энергиясын өзара әсерлесуші зарядтардың энергиясы деп қарастыруға болады. Бір-бірінен r_{ij} қашықтықта, вакуумда орналасқан екі q_i және q_j нүктелік зарядтар үшін жасалынған жұмыс:

$$A_{ij} = W_{ij} - W_{\infty}.$$

Егер кеңістікте N нүктелік әртүрлі заряд болса, онда жүйенің толық потенциалды энергиясы жүйеге кіретін барлық зарядтар жұбының өзара энергияларының қосындысына тең болады:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i,j}^N W_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{i,j}^N q_i \cdot q_j / 4\pi\epsilon_0 r_{ij}, \quad i \neq j. \quad (4.7)$$

мұндағы $1/2$ көбейткіш барлық i және j бойынша 1-ден N -ге дейін қосқанда әрбір әсерлесу екі рет ескерілетінін көрсетеді. Нүктелік зарядтардың өзара әсерлесу энергиясының өрнегін пайдалана отырып, тыныштықтағы зарядтар жүйесінің тепе-теңдігін (орнықтылығын) сараптау қажет. Екі нүктелік заряд жүйесінің тепе-теңдікті сақтай алмайтындығы (орнықсыз екендігі) белгілі. Әр аттас зарядтар түйісіп бейтарапталғанша тартылады, ал аттас зарядтар шексіздікке дейін бір-бірінен тебіледі. Кез келген жүйенің тепе-теңдікте тұру (орнықтылық) шарты олардың потенциалдық энергиясының минималдығында болады. Қарастырылып отырған екі нүктелік зарядтар жүйесі үшін бұл минимум жүйе - толық бұзылғанда ғана орындалады.

Үш нүктелік зарядтан тұратын жүйені қарастырайық. Бұл жағдайда үш заряд тепе-теңдікте тұратын, бірақ бұл тепе-теңдік орнықсыз болатын конфигурация мүмкін болады.

Мұндай тепе-теңдік мүмкін болады, егер:

- 1) зарядтардың таңбалары бірдей болмаса;
- 2) зарядтар бір түзудің бойында орналасса
- 3) зарядтардың шамасы белгілі бір қатынаста болса.

Зарядтардың конфигурацияларының әртүрлі өзгерістерін қарастыра отырып, олардың ішінде потенциалды энергияларының өзгерісі кейде оң, кейде теріс, кейде нөлге тең екендігіне көз жеткізуге болады. Сонымен, жекелеген зарядтар орнықты статикалық жүйе құра алмайды, олар электр зарядтарының динамикалық жүйесі бола алмайды.

4. Зарядталған өткізгіштің энергиясы

Q заряды бар өткізгішті қарастырайық. Оны нүктелік q зарядтар жүйесі ретінде қарастыруға болады. Жоғарыда N нүктелік зарядтар жүйесінің өзара әсерлесу энергиясы өрнегін жазғанбыз:

$$W = \frac{1}{2} \sum q_i \varphi_i. \quad (4.8)$$

Мұндағы φ_i - заряд q орналасқан нүктедегі q -ден басқа барлық зарядтардың тудырған потенциалы. Өткізгіштің беті - эквипотенциал бет. Сондықтан Δq_i нүктелік зарядтар тұрған нүктелердің потенциалдары бірдей және өткізгіштің φ потенциалдарына тең болады. (4.8) формуласын пайдаланып, зарядталған өткізгіштің энергиясы үшін:

$$W = \frac{1}{2} \sum \varphi_i \cdot q_i = \frac{1}{2} \cdot \varphi \sum_{i=1}^n q_i = \frac{1}{2} \varphi \cdot q \quad (4.9)$$

өрнегін аламыз. Төмендегі өрнектер кез келген, зарядталған өткізгіштің энергиясын анықтайды:

$$W = \frac{1}{2} \varphi q = q^2 / 2C = C \cdot \varphi^2 / 2. \quad (4.10)$$

"Энергия қайда жинақталған, энергияны тасымалдаушы зарядтар ма, әлде өріс пе?" - деген сұрақ енді орынды. Уақыт бойынша тұрақты тыныштықтағы зарядтың өрісін зерттейтін электрстатикалық өрісте оған жауап беру мүмкін емес. Тұрақты өріс және оны тудыратын зарядтар бір-бірінен (заряд пен өріс) оңашаланып өмір сүре алмайды. Бірақ, уақыт бойынша өзгеретін өріс өзін тудырған зарядқа тәуелсіз өмір сүре алады және электромагниттік толқын түрінде таралады. Электромагниттік толқындар энергияны тасымалдайтынын тәжірибе көрсетеді. Осы айғақтар энергия тасымалдаушы өріс екенін мойындатады.

Әдебиеттер:

Нег. 4 [187-233], 5 [224-246].

Қос. 12 [209-263].

Бақылау сұрақтары:

1. Диэлектриктердің қандай түрлері бар? Олардың айырмашылықтары қандай?
2. Поляризациялану деп қандай физикалық шаманы айтады?
3. Электрлік ығысу векторының мағынасы қандай.
4. Зарядталған өткізгіштің энергиясын қалай есептеуге болады?