

XII тарау. Тұрақты электр тогы

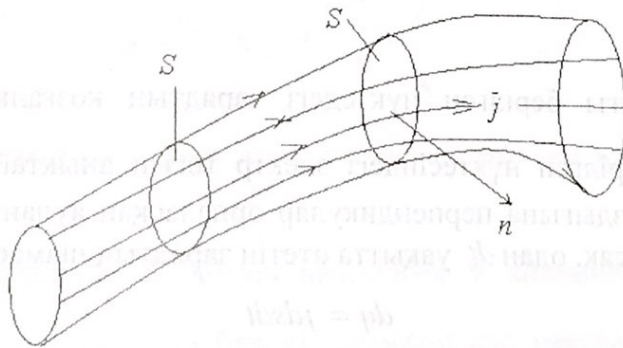
§12.1 Зарядтардың электр өрісіндегі қозғалысы. Электр тогының пайда болу шарттары және оның жалпы сипаттамасы

Электродинамикада электр зарядының немесе макроскопиялық зарядталған денелердің қозғалысынан туындайтын құбылыстарды зерттеуде электр тогы ұғымының енгізілуінің үлкен маңызы бар. Зарядтардың кез келген бағытталған қозғалысын электр тогы деп атайды. Металдарда электр электрондар, электролиттерде иондар, газдарда иондар және электрондар, шалаөткізгіштерде электрондар мен кемтіктер тасымалдайды. Токтың бағыты оң зарядтардың қозғалыс бағытымен сәйкес болатындығы келісіліп алынған. Электр тогының пайда болуы үшін мына шарттардың орындалуы қажет:

а. Бағытталған қозғалысқа қабілетті зарядталған бөлшектердің бар болуы.

ә. Энергиясы зарядтардың бағытталған қозғалысына жұмсалатын электр өрісінің болуы.

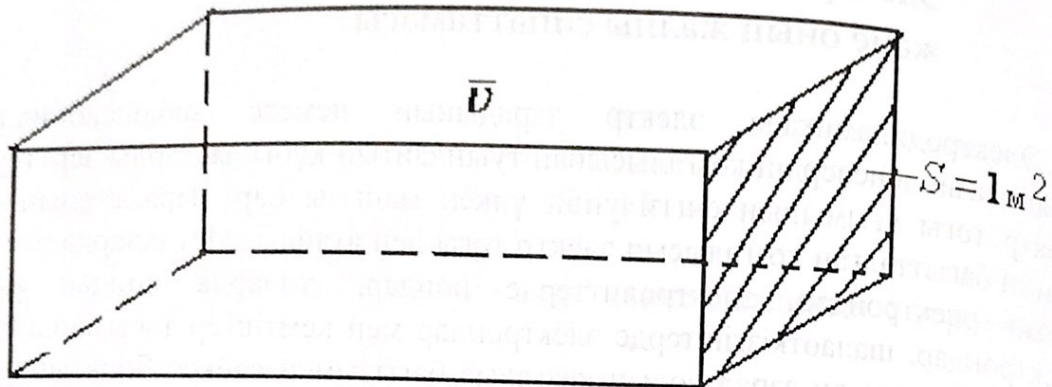
Бойымен зарядтар қозғалатын сызықтар ток сызығы деп аталады. Ток сызықтарын кескіндеу арқылы біз токты туғызатын электрондар мен иондардың қозғалыстарын жақсы елестете аламыз. Тоғы бар өткізгіштің ішінен бүйір беті ток сызықтарынан тұратын бөлініп алынған құбырдың бүйір бетін зарядталған бөлшектер қозғалыс кезінде қимаса және оның сыртында немесе ішінде орналаспаса, оны құбыр тогы деп атайды. Токтың мөлшерін сипаттау үшін ток тығыздығы және ток күші ұғымдары қолданылады. Ток күші шамасы жағынан бірлік уақытта ток сызығына перпендикуляр бірлік беттен өтетін зарядқа тең. (12.1.1-сызба)



12.1.1-сызба. Ток құбыры

Өткізгіштің ішінен ток сызықтарына перпендикуляр орналасқан бірлік бетті бөліп аламыз. Яғни, зарядталған бөлшектердің жылдамдығы бетке

перпендикуляр. Осы бетті пайдаланып, ұзындығы сан жағынан жылдамдыққа тең тік бұрышты параллелепипедті тұрғызайық (12.1.2-сызба).



12.1.2-сызба. Өткізгіш ішінен бөлініп алынған тік бұрышты параллелепед

Бірлік беттен бірлік уақытта өтетін бөлшектер саны параллелепипедтің ішінде орналасқан бөлшектер санына тең.

Егер зарядталған бөлшектердің концентрациясын n арқылы белгілесек, параллелепипедтің ішінде орналасқан бөлшектер саны $n \cdot V$, олардың тасымалдайтын зарядының шамасы neV тең. Сондықтан ток тығыздығының шамасы мына формуламен есептеледі:

$$j = neV \quad (12.1.1)$$

Мұндағы, e электронның заряды. \vec{j} векторлық шама болғандықтан, (12.1.1.) теңдігі төмендегідей түрленеді:

$$\vec{j} = ne\vec{v} \quad (12.1.2)$$

\vec{v} жылдамдығы берілген нүктедегі зарядтың қозғалысын сипаттаса, \vec{j} өткізгіштің берілген нүктесіндегі электр тоғын анықтайды. Өткізгіштің ішінен ток тығыздығына перпендикуляр орналасқан ауданы өте кішкентай ds бетті бөліп алсақ, одан dt уақытта өтетін зарядтың шамасы мынаған тең:

$$dq = j ds dt$$

Егер ds ауданмен j ток тығыздығы бір-бірімен перпендикуляр орналаспаса, ток j_n тығыздығының ds -ке перпендикуляр құраушысын аламыз.

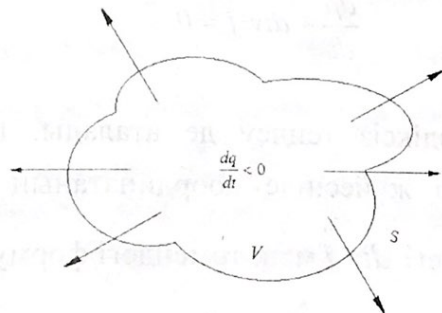
Қандай да бір өткізгіштегі ток күші i оның бірлік көлденең қимасынан бірлік уақытта өтетін зарядтың шамасына тең. dq өткізгіштің көлденең қимасынан dt уақытта өтетін зарядтың шамасы деп алсақ, ток күші төмендегі формуламен есептеледі:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (12.1.3)$$

dq және dt скалярлық шамалар. Сондықтан ток күші i скалярлық шама. Өткізгіштің әрбір нүктесіндегі ток тығыздығының \vec{j} векторын білу арқылы, ток күшін анықтаймыз:

$$i = \int_s \vec{j}_n ds \quad (12.1.4)$$

Интегралдау өткізгіштің кез келген қимасы бойынша алынады. Егер өткізгіштегі ток тығыздығы мен ток күші уақытқа тәуелді өзгермесе, онда өткізгіштегі ток тұрақты немесе стационарлы деп аталады. Тұрақты токта өткізгіштің барлық қималарындағы ток күштері бірдей. Шындығында, өткізгіштің екі S және S_1 қималарындағы ток күштері әртүрлі болса, онда осы қималардың арасында орналасқан зарядтар шамасы уақыт өтуіне байланысты өзгереді. S_1 бетіне енетін және S бетінен шығатын зарядтардың шамалары бірдей емес. Бұл жағдайда өткізгіштің ішіндегі электр өрісі тұрақты болмайды. Қандай да бір тоғы бар ортада тұйық S бетін қарастырайық. (12.1.3-сызба)



12.1.3-сызба. S бетпен шектелген V көлемнен шығатын зарядтың шамасы

$\oint_s \vec{j} d\vec{S}$ интегралы S бетпен шектелген V көлемнен бірлік уақытта шығатын зарядтың шамасын береді. Зарядтардың сақталу заңы бойынша бұл шама V көлемдегі зарядтың кему жылдамдығына тең:

$$\oint_s \vec{j} d\vec{S} = -\frac{dq}{dt}$$

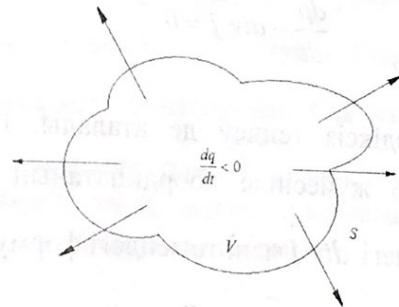
Қандай да бір өткізгіштегі ток күші i оның бірлік көлденең қимасынан бірлік уақытта өтетін зарядтың шамасына тең. dq өткізгіштің көлденең қимасынан dt уақытта өтетін зарядтың шамасы деп алсақ, ток күші төмендегі формуламен есептеледі:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (12.1.3)$$

dq және dt скалярлық шамалар. Сондықтан ток күші i скалярлық шама. Өткізгіштің әрбір нүктесіндегі ток тығыздығының \vec{j} векторын білу арқылы, ток күшін анықтаймыз:

$$i = \int_S \vec{j}_n ds \quad (12.1.4)$$

Интегралдау өткізгіштің кез келген қимасы бойынша алынады. Егер өткізгіштегі ток тұрақты немесе стационарлы деп аталады. Тұрақты токта өткізгіштің барлық қималарындағы ток күштері бірдей. Шындығында, осы қималардың арасында орналасқан зарядтар шамасы уақыт өтуіне байланысты өзгереді. S_1 бетіне енетін және S бетінен шығатын зарядтардың шамалары бірдей емес. Бұл жағдайда өткізгіштің ішіндегі электр өрісі тұрақты болмайды. Қандай да бір тоғы бар ортада тұйық S бетін қарастырайық. (12.1.3-сызба)



12.1.3-сызба. S бетпен шектелген V көлемнен шығатын зарядтың шамасы

$\oint_S \vec{j} d\vec{S}$ интегралы S бетпен шектелген V көлемнен бірлік уақытта шығатын зарядтың шамасын береді. Зарядтардың сақталу заңы бойынша бұл шама V көлемдегі зарядтың кему жылдамдығына тең:

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = -\frac{dq}{dt}$$

Зарядты $\int_V \rho dV$ түрінде жазсақ, төмендегі теңдеу шығады:

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (12.1.5)$$

Интегралдың ішіне ρ -ның уақыт бойынша дербес туындысын жаздық. Өйткені зарядтың тығыздығы уақытқа ғана тәуелді емес, сонымен қатар координатаға тәуелді болуы мүмкін ($\int_V \rho dV$ функциясы тек уақытқа тәуелді). (12.1.5) теңдігінің сол жағын Остроградский-Гаусс теоремасы бойынша түрлендірейік:

$$\int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{j} dV = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (12.1.6)$$

(12.1.6) теңдігі төмендегі шарт орындалғанда қанағаттанады:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (12.1.7)$$

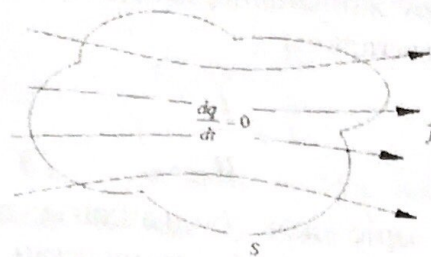
Немесе

$$\frac{d\rho}{dt} + \operatorname{div} \vec{j} = 0 \quad (12.1.8)$$

(12.1.8) қатынасы үздіксіз теңдеу де аталады. Егер \vec{j} векторлары декарттық координаталар жүйесінде координатаның функциясы ретінде берілсе, онда әрбір нүктедегі $\operatorname{div} \vec{j}$ мәні төмендегі формуламен есептеледі:

$$\operatorname{div} \vec{j} = \frac{dj_x}{dx} + \frac{dj_y}{dy} + \frac{dj_z}{dz}$$

Егер тоқ тұрақты болса, онда барлық электрлік шамалар уақытқа байланысты өзгермейді, яғни үздіксіз теңдеудегі $\frac{d\rho}{dt} = 0$. Олай болса, кез келген тұйық беттен өтетін \vec{j} векторының ағыны нөлге тең. Сондықтан тұрақты токтың сызықтары үзіліссіз тұйық болады. (12.1.4-сызба)



12.1.4-сызба. Тұрақты ток үшін зарядтың уақыт бойынша өзгерісі нөлге тең

Стационарлы ток үшін $\operatorname{div} \vec{j} = 0$ болғандықтан, \vec{j} векторының көзі жоқ. Яғни, ток сызықтары ешқайдан басталып ешқайда аяқталмайды.