

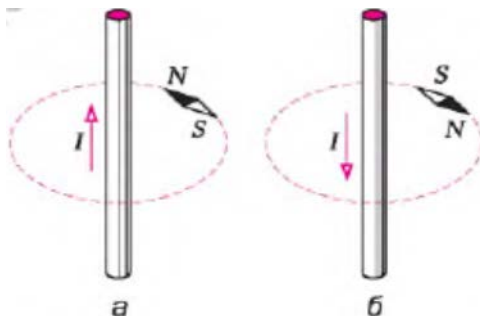
3.1. МАГНИТ ӨРІСІНІҢ НЕГІЗГІ ҚАСИЕТТЕРІ МЕН СИПАТТАМАЛАРЫ

Тоғы бар кез-келген өткізгіш айналасында магнит өрісі бар болады. Бұны тәжірибе жүзінде оңай дәлелдеуге болады.

Егер I тұрақты токқа ие түзу сызықтық өткізгішке магниттік тілшені жақындатсақ, онда тілше өткізгіш осының айналасындағы шеңберге жанама бағыт бойынша орнатылады (3.1-сурет, *а*).

Егер 3.1, *а* суретінде бейнеленген тәжірибеде өткізгіштегі токтың бағытын өзгертсек, онда магниттік тілшенің орналасуы қарама-қарсы бағытқа өзгереді (3.1-сурет, *б*).

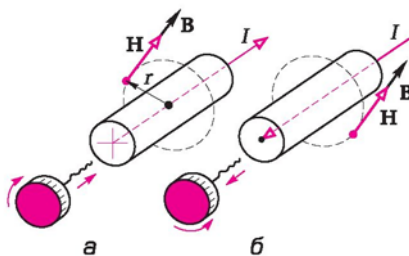
Белгілі бір бағыттағы магниттік тілшенің бағдарлануы, магнит өрісінде ***H*** магниттік кернеулік векторымен анықталатын магниттік күштер әсер ететіндігін білдіреді. Жоғары көрнекілік үшін, өрістің магниттік күштерінің әсерінің кеңістіктік таралымы мен бағыты - тұйықталған *магниттік*, немесе *күш* сызықтары жиынтығымен көрсетіледі. Олардың бағытын магниттік тілшенің *N* солтүстік полюсі көрсетеді.



3.1-сурет



3.2-сурет



3.3-сурет

Тоғы бар түзу сызықтық өткізгіштер үшін магниттік сызықтары концентрлік шеңберлердің жиынтығынан тұрады. Бұған қарапайым тәжірибемен көз жеткізуге болады. Темір үгінділері магнит өрісінде магниттеліп, тоғы бар түзу сызықтық өткізгіштің осыне перпендикулярлы жазықтықта, өткізгіш айналасындағы концентрлік шеңберлер бойынша орналасады (3.2-сурет).

Тоғы бар түзу сызықтық өткізгіштің магнит өрісінің күш сызықтарының бағыттарын бұрғы ережесі бойынша анықтайды. Өткізгіштің көлденең қимасын шеңбермен, ал өткізгіштегі ток бағытын – айқасқан сызықтармен немесе нүктемен (3.3-сурет, а және б), яғни ток бағытымен сәйкес келетін бағыттауыш түзудің ұшы немесе соңымен бейнелейік.

Бұрғы ережесі. Бұрғының ток бағытымен ілгерілемелі қозғалысы кезінде оның сабының айналу бағыты токтың магнит өрісінің күш сызықтарың бағытымен сәйкес келеді.

Магнит өрісінің кернеулігі, тоғы бар өткізгіш орналасқан заттың магниттік күйін өзгертеді. Магнит өрісінің элементар көздері (зат атомдары мен молекулалары тоғы) магниттік тілше секілді **H** кернеулік векторының бағыты бойынша бағдарланады. Зат *магниттеледі*, ал ондағы магнит өрісі, **H** магниттік кернеулік векторынан өзге, *магниттік индукция* векторы

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} = \mu_a \mathbf{H} \quad (3.1)$$

ретінде де анықталады, мұндағы $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ — магнит тұрақтысы; μ_0 — заттың салытырмалы магниттік өткізгіштігі (өлшемсіз шама); $\mu_0 = \mu_r \mu_0$ — абсолютті магниттік өткізгіштік. Вакуум үшін $\mu_0 = 17$.

Диаманитті ($\mu_0 < 1$), параманитті ($\mu_0 > 1$) және ферромагнитті ($\mu_0 \gg 1$) заттар деп бөлінеді. Соңғыларының салыстырмалы магниттік өткізгіштігі бірден айтарлықтай көп, және де магнит өрісінің кернеулігіне байланысты болады.

Кейбір ферромагнетиктер (темір, никель, кобальт пен басқа да элементтер) тұрақты ток жоқ болған кезде де өздерінің магниттілігін сақтап қалады. Олардан тұрақты магниттерді жасайды.

Тұйықталған контурмен шектелген бет арқылы өтетін **B** магниттік индукция векторының магниттік сызықтарының жиынтығы **F** магниттік ағын деп аталады.

Магнит өрісінің кернеулігінің СИ-дегі негізгі өлшем бірлігі— *ампердіметрге бөлу* (А/м); индукцияның өлшем бірлігі — *тесла* (Тл): $1 \text{ Тл} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}/\text{м}^2$; ағын өлшем бірлігі — *вебер* (Вб): $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$.

Тоғы бар өткізгіш түрлі пішіндерге мысалы дөңгелек (орам) түріне ие бола алады. Бірнеше тізбектей жалғанған орамдар *катушканы* түзеді. тоғы бар орам мен катушка айналасында, мысалға электромагниттерде қолданылатын магнит өрісі қоздырылады.

3.2.

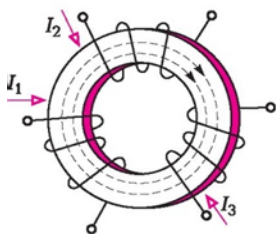
МАГНИТТІК ТІЗБЕК ЭЛЕМЕНТТЕРІ

Магниттік тізбек (магнит өткізгіш) деп электротехникалық құрылғылардың түрлі ферромагниттік және ферромагниттік емес бөліктерінің қажетті конфигурациялардағы және жиіліктегі магнит өрістерін туындатуға арналған жиынтығы. Электротехникалық құрылғылардың жұмыс істеу принципіне байланысты магнит өрісі, тұрақты магнитпен, немесе магниттік тізбектің қандайда бір бөлігінде орналасқан тоғы бар катушкамен қоздырылуы мүмкін.

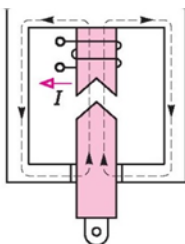
Қарапайым магниттік тізбектерге біртекті ферромагниттік материалдан жасалынған тороид жатады (3.4-сурет). Мұндай магнит өткізгіштер көпорамды трансформаторларда қолданылады.

3.5-суретте электромехникалық құрылғының күрделірек магниттік тізбегі көрсетілген, оның қозғалмалы бөлігі катушкадағы тұрақты (немесе айнымалы) ток кезінде электромагнитке тартылады. Тартылыс күші магнит өткізгіштің қозғалмалы бөлігінің орналасуына байланысты болады.

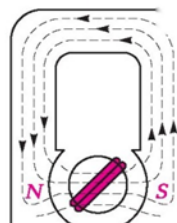
3.6-суретте магнит өрісі тұрақты магнитпен қоздырылатын магниттік тізбек бейнеленген. Егер ферромагнитті цилиндрде орналасқан қозғалмалы катушка тұрақты ток тізбегіне енгізілген болса, онда оған айналу моменті әсер етеді. Тоғы бар катушканы бұру арқылы магниттік тізбектің магнит өрісіне ешқандай әсер етпейміз.



3.4-сурет



3.5-сурет



3.6-сурет

Мұндай магниттік тізбек, мысалға магнит-электрлік жүйені өлшеу құралдарында бар болады.

Шектелген көлемдегі магнит өрісінің шоғырлануы құрылғылардың жұмыс сипаттамаларын жақсартуға: катушкалардың магниттік әсерлесуін арттыруға (3.4-суретті қараңыз), тарту күшін көбейтуге (3.5-суретті қараңыз), бос ауа кеңістігінде магнит өрісінің біртектігін арттыруға (3.6-суретті қараңыз) мүмкіндік береді.

Қарастырылған магниттік тізбектер, басқа да мүмкін құрылымдарды секілді, тізбектің кез-елген қимасындағы магнит ағыны бірдей болатын, *тармақталмаған магниттік тізбектерге* (3.4 және 3.6-суреттерді қараңыз) және тізбектің әртүрлі қималарындағы магнит ағындары түрлі болатын *тармақталған магниттік тізбектерге* (3.5-суретті қараңыз) бөлуге болады. Жалпы жағдайда тармақталған магниттік тізбектер, мысалға электр қозғалтқыштарында, генераторларда және басқа да құрылғыларда күрделі конфигурациялы болуы мүмкін.

Электр тізбегіне (2.2-бөлімшені қараңыз) ұқсас магниттік тізбектер үшін «тармақ», «түйін», «контур» түсініктері қолданылады.

Көп жағдайларда магниттік тізбекті сызықтық емес деп, тек белгілі бір рұқсаттарда және белгілі жұмыс режимінде ғана – сызықтық деп есептеген жөн.

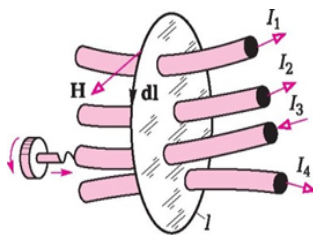
3.3. ТОЛЫҚ ТОК ЗАҢЫ. МАГНИТТІК ТІЗБЕК КҮЙІНІҢ ТЕҢДЕУІ

Толық ток заңы. *Кез-келген тұйықталған контур (вектор циркуляциясы) бойынша магнит өріс кернеулігінен алынған интеграл, осы контурмен ілістірілген токтардың алгебралық қосындысына тең:*

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum I = F$$

(3.2)

сонымен қатар, егер бұрғы сабының айналымы сағат тілінің бағыты бойынша контурды айналу бағытына сәйкес, бұрғының ілгерілемелі қозғалысымен бағыты сәйкес келетін (бұрғы ережесі), токтарды оң деп санауға болады. Дара жағдайда 3.7-суреттегі контур үшін толық ток заңы бойынша:



3.7-сурет

$$\oint H dl = I_1 + I_2 - I_3 + I_4.$$

(3.2)-гі $\sum I$ шамасы l тұйықталған контурдағы *магниттік қозғаушы күш* (МҚК) деп аталады.

МҚК-ң СИ-дегі негізгі өлшем бірлігі — *ампер* (А).

Егер ұзындығы l тұйықталған контурдағы әрбір нүктеде H магнит өрісінің кернеулігі контурға қатысты жанама бағытталған және тұрақты болса, онда толық ток заңы келесі түрді қабылдайды:

$$HI = \sum I$$

(3.3)

3.1-мысал. $I = 3$ А тұрақты токқа ие түзу сызықтық өткізгіштен $r = 1$ м арақашықтықтағы магнит өріс кернеулігін анықтаңыз (3.3, a суретін қараңыз).

Шешімі. Шеңбердің осынен $r = 1$ м қашықтықтағы әрбір нүктесіндегі магнит өрісінің кернеулігі тұрақты және (3.3) бойынша:

$$H = I/l = 3/6,28 = 0,477 \text{ А/м},$$

тең, мұндағы $l = 2\pi r = 2 \cdot 3,14 \cdot 1 = 6,28$ м — шеңбер ұзындығы.

Көптеген электротехникалық құралдардың магниттік тізбегін, әрқайсысының шегінде магнит өрісін біртекті, яғни тұрақты кернеулікке ие деп санауға болатын, ұзындығы l_k бөлігінің орта сызығының бойындағы H_k магнит өрісіне тең, бөліктер жиынтығынан тұрады деп қарауға болады.

Егер бұл ретте магнит өрісі, w орамы бар I тогына ие катушкамен қоздырылатын болса, онда орамдарға тіркестірілген және n бөліктерден тұратын магниттік тізбек контуры үшін (3.2) орнына:

$$\sum_{k=1}^n H_k I_k = Iw$$

деп жазуға болады. Егер контур тогы бар катушканың m орамымен тіркестірілген болса, онда:

$$\sum_{k=1}^n H_k I_k = \sum_{p=1}^m I_p w_p \quad \text{немесе} \quad \sum_{k=1}^n U_{mk} = \sum_{p=1}^m F_p \quad (3.4)$$

мұндағы $F_p = I_p w_p$ — МҚК; $U_{mk} = H_k l_k$ — магниттік тізбек бөлігінің *магниттік кернеуі*.

Осылайша, толық ток заңы бойынша, *магниттік тізбектің кез-келген контурының МҚК алгебралық қосындысы оның бөліктерінің магниттік кернеулерінің алгебралық қосындысына тең*, бұл тұрақты токты электр тізбектеріне арналған Кирхгофтың екінші заңы (2.11) шамаларының белгіленуіне ұқсас.

Тұрақты токтың электрлік тізбегімен салыстырылуын жалғастыра отырып, оның магниттік кернеуінің ондағы магниттік ағынға қатынасы түріндегі

$$U_M = R_M \Phi \quad (3.5)$$

магниттік тізбек бөлігінің *магниттік кедергісі* түсінігін енгіземіз, бұл Ом заңының (2.1) шамаларының белгіленуіне дейін тура ұқсас болып келеді.

Сонымен, магниттік сызықтардың үздіксіздігі есебінен, *магниттік тізбек түйініндегі магниттік ағындардың алгебралық қосындысы нөлге тең*:

$$\sum_{k=1}^n \Phi = 0 \quad (3.6)$$

мұндағы n — түйіндерде жалғанатын тармақтар саны, бұл тұрақты токты электр тізбектеріне арналған Кирхгофтың бірінші заңы (2.9) шамаларының белгіленуіне тура ұқсас.

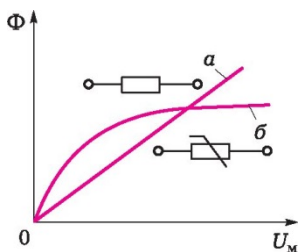
Магниттік тізбек күйлерінің теңдеуі (3.4) — (3.6), оны тұрақты ЭҚК мен сызықтық және сызықтық емес магниттік резистивті элементтер көзінің жиынтығынан тұратын, алмастыру схемасымен бейнелеуге мүмкіндік береді.

Сызықтық магниттік резистивті элемент, магниттік ағыны магниттік кернеуге пропорционалды болатын, магниттік тізбек бөліктерінің алмастыру схемасы болып табылады. Оның параметрі ретінде магниттік кедергі $R_M = \text{const}$ қызмет атқарады.

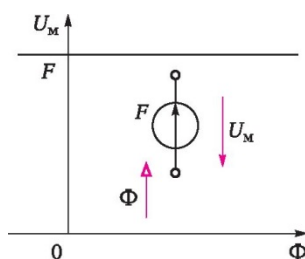
Сызықтық емес магниттік резистивті элемент, магниттік ағынның магниттік кернеуден тәуелділігі сызықтық емес болатын және сызықтық емес $\Phi(U_M)$ вебер-амперлік сипаттамасымен берілетін магниттік тізбек бөлігінің алмастыру схемасы болып табылады.

Магниттік кедергінің СИ-дегі негізгі өлшем бірлігі — *ампердің веберге қатынасы* (А/Вб): $1 \text{ А/Вб} = 1 \text{ А}/(\text{В} \cdot \text{с}) = 1 (\text{Ом} \cdot \text{с})^{-1}$.

3.8-суретте алмастыру схемаларындағы сызықтық (a сызығы) және



3.8-сурет



3.9-сурет

сызықтық емес (*б* сызығы) магниттік резистивті элементтердің, ал 3.9-суретте – тұрақты МҚК көзінің шартты белгілері мен вебер-амперлік сипаттамалары келтірілген.

3.4. ФЕРРОМАГНИТТІК МАТЕРИАЛДАРДЫҢ МАГНИТТІК ҚАСИЕТТЕРІ

Ферромагниттік материалдардың магниттік қасиеттерін тәжірибелік зерттеу үшін, барлық өлшеу жұмыстарын магнит өрісі біртекті үлгіде жүргізу қажет. Осындай үлгі ретінде тороидты қарастыруға болады (3.10-сурет), ондағы магниттік сызықтар ұзындығы оның көлденең өлшемдерінен айтарлықтай көп және w орамдар санына ие орамалар бірқалыпты оралған.

Жұқа қабырғалы тороидтағы магнит өріс кернеулігін және магнит өрісінің индукциясын есептеу кезінде, барлық магниттік сызықтар, ортаңғы сызықтың $2\pi r$ ұзындығына тең, бірдей ұзындыққа ие. 3.10 суретте оның бір нүктелеріндегі орташа магниттік сызық пен $\mathbf{H}$ кернеулік және $\mathbf{B}$ индукция векторы көрсетілген.

Жұқа қабырғалы тороидтың ферромагниттік материалы толығымен магнитсізделген жөн орамада ток жоқ ($B = 0$ және $H = 0$) деп болжайық. Егер орамадағы I тұрақты токты ақырындап арттыратын болсақ, онда ферромагниттік материалда толық ток заңы (3.3) бойынша кернеулікке ие магнит өрісі туындайды:

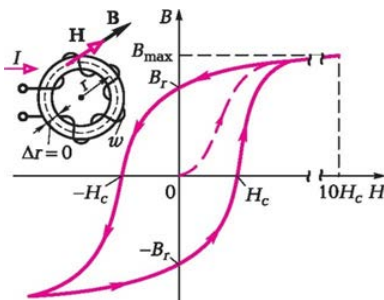
$$H = Iw/2\pi r. \quad (3.7)$$

Жұқа қабырғалы тороидтың магнит өрісінің әрбір H кернеулік мәніне ферромагниттік материалдың белгілі бір магниттелуі, демек, B магниттік индукцияның сәйкес мәндері сәйкес келеді.

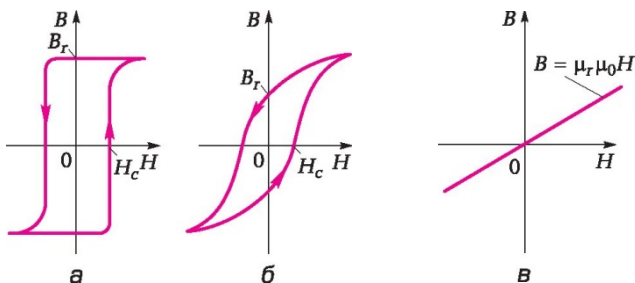
Егер жұқа қабырғалы тороидтың материалының бастапқы магниттік күйі $H = 0$, $B = 0$ мәндерімен сипатталатын болса, онда токтың бірсарынды өсуі кезінде, *бірінші ретті магниттелу қисығы* (3.10-суретті қараңыз, штрих сызық) деп аталатын $B(H)$ сызықтық емес тәуелділігін аламыз. Магнит өрісінің H кернеулігінің қандайда бір мәндерінен бастап, жұқа қабырғалы ферромагниттік тороидтағы B индукциясы тіптен өсуін тоқтатып, $B_{\max}$ тең болып қалады. Бұл $B(H)$ тәуелділік аумағы *техникалық қанығу аумағы* деп аталады.

Егер қанығуға қол жеткізіп, орамадағы тұрақты токты бірсарынды азайта бастасақ, яғни өрістің кернеулігін азайтсақ (3.7), онда индукция да азая бастайды. Алайда, $B(H)$ тәуелділігі енді бірінші ретті магниттелу қисығымен сәйкес келмейді. Орамадағы ток бағытын өзгертіп және оның мәнін арттырып, жаңа $B(H)$ тәуелділік аумағын аламыз. Магнит өрісінің айтарлықтай теріс мәндерінде ферромагниттік материалдың техникалық қанығуы қайта орын алады. Егер тәжірибені жалғастыратын болсақ: алдымен кері бағыт тоғын азайтып, содан кейін тура бағыттағы токты қанығуға дейін арттырсақ және т.с.с., онда қайта магниттелудің бірнеше циклінен кейін $B(H)$ тәуелділігі үшін симметриялы қисықты аламыз (3.10-суретті қараңыз, тұтас сызық) Бұл тұйықталған $B(H)$ циклі ферромагниттік материалдың *шектік статикалық гистерезис ілмегі* (немесе шектік статикалық гистерезис циклі) деп аталады. Егер симметриялық қайта магниттеу кезінде техникалық қанығу аумағына қол жеткізілмейтін болса, онда $B(H)$ симметриялық қисығы ферромагниттік материалдың *симметриялы дарагистерезис ілмегі* деп аталады.

Ферромагниттік материалдардың шектік статикалық гистерезис циклы: H_c – *коэрцитивті күш*; B_r – *қалдық индукциясы* және $k = B_r/B_{H=10H_c}$ – *тікбұрыштық коэффициенті* параметрлерімен сипатталады (3.10-суретті қараңыз).



3.10-сурет



3.11-сурет

H_c коэрцитивті күштерінің мәндері бойынша ферромагниттік материалдар екі топқа бөлінеді:

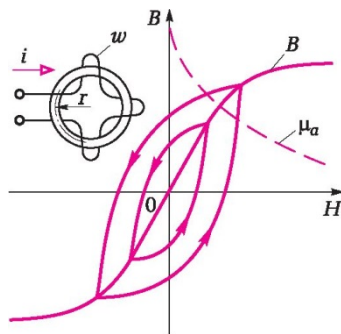
- *магнитті-жұмсақ* — коэрцитивті күштерінің мәндері өте аз магниттік материалдар ($H_c < 50—100$ А/м);
- *магнитті-қатты* — коэрцитивті күштерінің мәндері өте үлкен магниттік материалдар ($H_c > 20—30$ кА/м).

Магнитті-қатты материалдар тұрақты магниттерді дайындауға, ал магнитті-жұмсақ — шектік немесе дара циклдер бойынша қайта магниттелу тәртібінде жұмыс жасайтын электротехникалық құралдарды даярлау үшін қолданылады.

Магнитті-жұмсақ материалдар үш типке бөлінеді

- тікбұрышты шектік статикалық гистерезис ілмегімен (ТШГ, тікбұрыштық коэффициенті $k \sim > 0,95$) (3.11-сурет, а);
- тікбұрышты емес шектік статикалық гистерезис ілмегімен (ТШГ, $0,4 < k \sim < 0,7$) (3.11-сурет, б);
- $B(H)$ тәуелділігі сызықтық дерлік болатын, сызықтық қасиеттерге ие: $B = \mu_r \mu_0 H$ (3.11-сурет, в).

Магнитті-жұмсақ магниттік сипаттамаларының барлық типтері, ферромагнитті қорытпалардан немесе ферромагнитті керамикадан (ферритерден) жасалынған үлгілерде алынуы мүмкін. Ферромагниттік қорытпаларға қарағанда ферритердің ең құнды қасиеті — олардың жоғары меншікті электрлік кедергісі.



3.12-сурет



Литая сталь – құйылған болат; Чугун – шойын; Листовая сталь – табак болат
3.13-сурет

ТШГ ие ферромагниттік материалдардан жасалынған магниттік өткізгіштер автоматака құралдарында, ал ТЕШГ ие – электрлік машиналарда және аппараттарда қолданылады, олардың магниттік өткізгіштері көбінесе симметриялы дара циклдер бойынша қайта магниттелу тәртібінде жұмыс атқарады.

Осындай магниттік өткізгіштерді есептеу кезінде, жұқа қабырғалы ферромагниттік тороидтардың, орамадағы төменгі жиілікті синусоидалық ток кезіндегі симметриялық дара циклдерінің шындығының геометриялық орынын бейнелейтін (3.12-сурет), ферромагниттік материалдың *магниттелуінің негізгі қисығын* қолданады.

Ферромагниттік материалды магниттеудің негізгі қисығы бойынша абсолютті магниттік өткізгіштің магнит өрісінің H кернеулігінен тәуелділігін анықтайды (3.12-суретті қараңыз, штрих сызық):

$$\mu_a = B / H \quad (3.8)$$

3.13-суретте, электр машиналарда, трансформаторларда және басқа да құрылғыларда қолданылатын кейбір электротехникалық болаттардың, шойынның және пермаллойдың магниттелуінің негізгі қисықтары келтірілген.

Сызықтық қасиеттері бар ферромагниттік материалдардан жоғары төзімділікке ие тербелмелі контурлардың индуктивтілік катушкаларының магниттік өткізгіштері даярланады. Мұндай контурларды, мысалы, радиотезникалық құрылғыларды (қабылдағыштарда, таратқыштарда) қолданады.

Тармақталмаған магниттік тізбекті есептеудің міндеті, көп жағдайда, магниттік өткізгіштің (көбінесе бос ауа кеңістігінде) қандайда бір бөлігіндегі магниттік ағынның немесе магниттік индукциясының берілген мәндерін алу үшін қажет болатын, $F = Iw$ МҚК анықтау болып табылады.

3.14-суретте тармақталмаған магниттік тізбектің – бос ауа кеңістігіне ие магниттік өткізгіш мысалы келтірілген және көлденең қимасының ауданы S_1 ферромагниттік материалдан жасалынған орташа магниттік сызықтың ұзындығы l_1 мен көлденең қимасының ауданы S_2 бос ауа кеңістігінің ұзындығы l_2 (3.14-суретте көрсетілмеген) берілген. Ферромагниттік материалдың магниттік қасиеттері $B(H)$ магниттеудің негізгі қисығы (3.12-суретті қараңыз) және сонымен (3.8) бойынша $\mu_a(H)$ тәуелділігі арқылы берілген.

(3.4)-ші толық ток заңы бойынша:

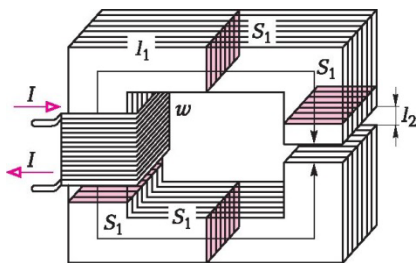
$$\sum_{k=1}^2 H_k I_k = H_1 I_1 + H_2 I_2 = U_{M1} + U_{M2} = Iw = F \quad (3.9)$$

тармақталмаған магниттік өткізгіштің кез-келген көлденең қимасындағы магниттік ағынның тұрақтылығынан шығатыны

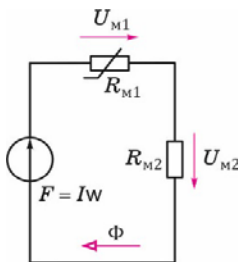
$$\Phi = B_1 S_1 = B_2 S_2, \quad (3.10)$$

мұндағы H_1 , B_1 мен H_2 , B_2 — ферромагнитті материал мен бос ауа кеңістігінен тұратын магнит өрісі кернеулігі мен магниттік индукциясы.

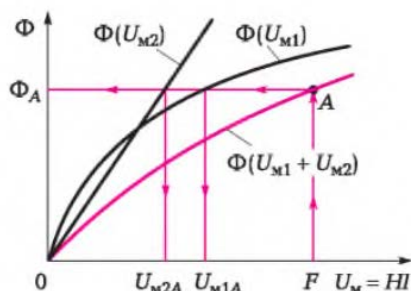
Сызықтық және сызықтық емес резистивті магнит элементтерге (3.8-суретті қараңыз) сызықтық емес $\Phi(U_{M1})$ және сызықтық $\Phi(U_{M2})$ вебер-амперлік сипаттама (3.16-сурет) сәйкес келетін тармақталма-



3.14-сурет



3.15-сурет



3.16-сурет

$$R_{M1} = \frac{U_{M1}}{\Phi} = \frac{H_1 L_1}{B_1 S_1} = \frac{I_1}{\mu_a(U_{M1}) S_1};$$

$$R_{M2} = \frac{U_{M2}}{\Phi} = \frac{H_2 L_2}{B_2 S_2} = \frac{I_2}{\mu_0 S_2} = \text{const.}$$

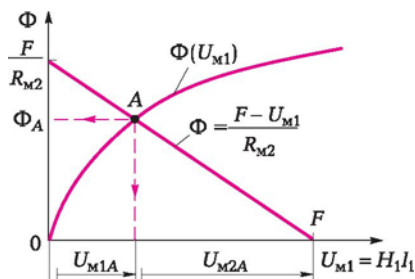
ған магниттік тізбекке (3.14-суретті қараңыз) алмастыру схемасы (3.15-сурет) (3.9) және (3.5) теңдеулеріне сәйкес келеді.

3.15-суреттегі тармақталмаған магниттік тізбектің алмастыру схемасы, элементтері тізбектей жалғанған тұрақты токты сызықтық емес электр тізбегінің алмастыру схемасының элементтерінің параметрлерін белгілеуге дейін ұқсас (2.31-суретті қараңыз).

Демек, тұрақты МҚК ие тармақталмаған магниттік тізбектерді (сонымен қатар, тармақталған магниттік тізбектерді де) талдау үшін тұрақты токты сызықтық емес электр тізбегін есептеудің барлық графикалық әдістерін қолдануға болады (2.15-бөлімшені қараңыз).

Тармақталмаған магниттік тізбекті есептеу үшін (3.14-суретті және 3.15-суреттегі алмастыру схемасын қараңыз) вебер-амперлік сипаттамаларды және жүктемелік сипаттамаларды қосу әдістерін қолданайық.

Бірінші әдіске сәйкес, бүкіл тармақталмаған магниттік тізбектің $\Phi(U_{M1} + U_{M2})$ вебер-амперлік сипаттамасын, оның екі бөлігінің вебер-амперлік сипаттамасын магниттік кернеуі бойынша графикалық қосу арқылы тұрғызайық (3.16-суретті қараңыз). Белгілі МҚК кезінде $F = I\omega$ бүкіл магниттік тізбектің вебер-амперлік сипаттамасы бойынша А жұмыс нүктесін, яғни Φ_A магниттік ағынын, ал магниттік өткізгіштің бөліктерінің вебер-амперлік сипаттамасы бойынша – олардың әрқайсысындағы магниттік кернеуді анықтайық.



3.17-сурет

Екінші әдіске сәйкес,

$$\Phi = U_{M2} / R_{M2} = (F - U_{M1}) / R_{M2},$$

тендеуі бойынша жүктемелік сипаттаманы (3.17-сурет), яғни абсцисс осында F нүктесі және ординат осында F/R_{M2} нүктесі арқылы өтетін түзуді тұрғызайық. Жүктемелік сипаттаманың $\Phi(U_{M1})$ тізбектің ферромагниттік бөлігінің вебер-амперлік сипаттамасымен A қиылысу нүктесі тізбектегі Φ_A магниттік ағынын және U_{M1A} ферромагниттік бөліктегі және U_{M2A} бос ауа кеңістігіндегі магниттік кернеуді анықтайды. Бос ауа кеңістігіндегі индукцияның мәні $B_{2A} = \Phi_A/S_2$.

3.6.

ЭЛЕКТРМАГНИТТІК КҮШТЕР

Магнит өрісіне орнатылған тогы бар өткізгішке, бағытын: алақанды магнит өрісіндер бағытына қарсы орналастырып, ток бағытында өткізгіш бойымен төрт саусақты шығару қажет, сонда бас бармақ өткізгішке әсер ететін күштің бағытын көрсететін, *сол қол ережесімен* (3.18-сурет) анықтайтын күш әсер етеді. Бұл күш ток пен магнит өрісінің өзара әсерлерінің салдары болып табылатындықтан, оны *электрмагниттік күш* деп атайды.

Электрмагниттік күш I токтың, B магнит индукциясының және магнит өрісінде орналасқан өткізгіштің l ұзындығының көбейтіндісіне тең. Ол сонымен қатар, B магниттік индукция векторының бағытына қатысты тогы бар өткізгіштің бағытына да тәуелді.

Егер ұзындығы l түзу сызықтық өткізгіш I тогы бағытында, өзі орналасқан біртекті магнит өрісінің магниттік сызықтарымен α бұрыш түзетін болса, онда өткізгішке әсер ететін электрмагниттік күш:

$$F = BIl \sin \alpha \quad (3.11)$$

тең болады.

Егер өткізгіш өрістің магниттік сызықтарының бағытына перпендикуляр орналасса, яғни. $\sin \alpha = 1$ (3.18-сурет) болса, бұл көптеген электр машиналары мен аппараттарда орын алатын жағдай, онда

$$F = BIl \quad (3.12)$$

СИ-де электрмагниттік күшті магниттік индукцияның бірлігін — тесла (Тл) анықтау үшін қолдануға болады. 1Тл, 1 м ұзындыққа және 1 А токқа ие түзу сызықтық өткізгішке 1Н күш әсер ететін, біртекті магнит өрісінің индукциясына тең. Бұл ретте өткізгіштің бағыты магниттік сызықтар бағытымен $\alpha = \pi / 2$ бұрышын түзеді.

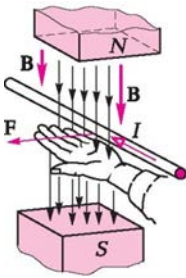
Электрмагниттік күштер айналу моментін түзу үшін барлық электрқозғалтқыштарында қолданылады. Олар генераторларда, бірінші ретті қозғалтқыш өте алатын тежеуіш моментін тудырады. Сонымен қатар электрмагниттік күштер тогы бар әртүрлі өткізгіштер арасында, мысалы екі өткізгішті желінің 1-ші және 2-ші өткізгіштері арасында да туындайды (3.19-сурет).

Толық ток заңы (3.3) бойынша, 1-ші өткізгіштің осынен a арақашықтықта, осы өткізгіштің сымы тудыратын магнит өрісінің кернеулігі:

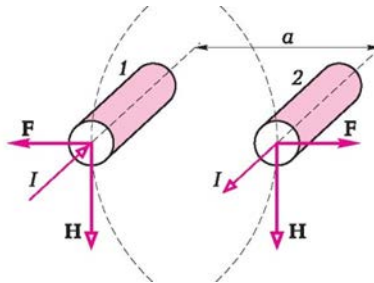
$$H = I / 2\pi a$$

магниттік индукциясы —

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$



3.18-сурет



3.19-сурет

1-өткізгіш өрісінің магниттік сызықтары 2-өткізгіштің бағытына перпендикуляр. Демек, 2-ші өткізгішке

$$F = BIl = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi a}$$

электрмагниттік күші әсер етеді.

Осындай, бірақ қарама-қарсы бағыттағы күш 2-өткізгіштегі токтың магнит өрісінің 1-өткізгішке әсерінен туындайды. Екі күштің де әсер ету бағыты сол қол ережесімен анықталады (3.18-суретті қараңыз). Токтардың қарама-қарсы бағытталуы кезінде өткізгіштер бірін-бірі тебеді, келісілген кезде – тартылады.

Электротехникалық құрылғылардың қалыпты жұмыс жағдайында электрмагниттік күштер салыстырмалы түрде аз. Алайда, тізбектегі қысқаша тұйықталу кезінде токтар жүз есе, ал ток квадратына пропорционалды электрмагниттік күштер – он мыңдаған есе артады. Бұл құрылғылардың бұзылуына әкелуі мүмкін.

3.7.

ЭЛЕКТРМАГНИТТІК ИНДУКЦИЯ

Электрмагниттік индукция заңы көптеген тәжірибелер негізінде шығарылған.

Біртекті магнит өрісінде **B** магниттік индукция векторына перпендикуляр ұзындығы *l* өткізгіш орналасқан деп алайық. Вольтметрге қосылған, қозғалмайтын бағыттауыштар бойымен тұрақты *v* жылдамдықпен өткізгіштің алдымен бір (3.20-сурет, *a*), содан кейін қарама-қарсы (3.20-сурет, *б*) бағытта жылжуы кезінде, вольтметрдің көрсеткіші тепе-теңдік күйінен алдымен бір, содан кейін қарама-қарсы жаққа қарай ығысады.

Демек, магнит өрісінде қозғалатын өткізгіш, *индукцияланған* деп аталатын ЭҚК көзі болып табылады.

Электрмагниттік индукция заңы. *Біртекті магнит өрісінде орналасқан, B магниттік индукция векторына перпендикуляр және v жылдамдығымен қозғалып келе жатқан, ұзындығы l түзу сызықтық өткізгіште ЭҚК индукцияланады, оның мәні мынаған тең:*

$$E = Blv \quad (3.13)$$

Бұл ретте ЭҚК бағыты: алақанды магниттік сызықтар бағытына қарсы қойып, бас бармақты өткізгіш қозғалысының бағытымен бағыттау қажет, сонда созылған төрт саусақ өткізгіште индукцияланған ЭҚК бағытын көрсететін *оң қол ережесімен* (3.21-сурет) анықталады.

Егер ұзындығы l түзу сызықтық өткізгіш, өзі v жылдамдықпен қозғалып келе жатқан, біртекті магнит өрісінің B магниттік индукциясы бағытымен α бұрышын түзсе, ендеше ондағы индукцияланған ЭҚК

$$F = Blv \sin \alpha \quad (3.14)$$

тең болады.

Электрмагниттік индукция заңын басқа формуламен де өрнектеуге болады. Φ магниттік ағынымен тіркестірілген тұйықталған контурда ЭҚК индукцияланады, оның мәні

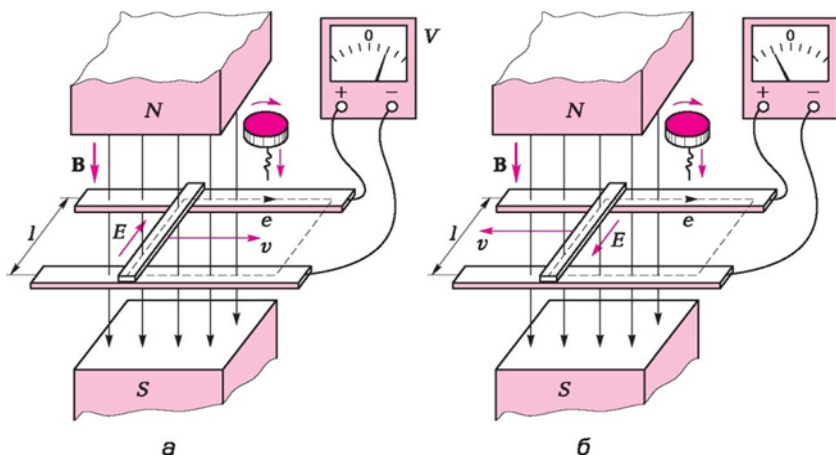
$$e = -d\Phi / dt \quad (3.15)$$

тең.

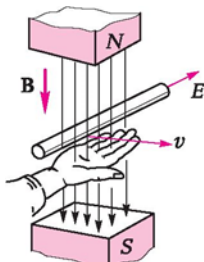
Бұл ретте ЭҚК бағыты бұрғы ережесімен анықталады: бұрғының магниттік сызықтар бойымен ілгерілемелі қозғалысы кезінде оның сабының айналу бағыты индукцияланған ЭҚК бағытын анықтайды.

Мысалы, 3.20, *a* және *б* суреттеріндегі тәжірибелерде, штрихты сызықтармен белгіленген контурлармен тіркестірілген магниттік ағындардың жылдамдығы $d\Phi/dt = -Blv$ (ағын азаяды) және $d\Phi/dt = Blv$ (ағын артады) тең, ал индукцияланған e ЭҚК бағыттары бұрғы ережесі бойынша осы контурларда бағыттауыш сызықтармен берілген.

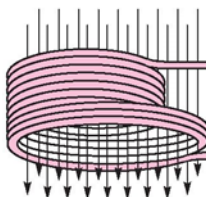
Электрмагниттік индукциясының заңының екі тұжырымы да бірдей сандық нәтиже береді. Алайда, (3.13) формуласы өткізгіштегі E ЭҚК индукцияланатын бөлігін анықтайды, ал (3.15) формуласы – анықтамайды.



3.20-сурет



3.21-сурет



3.22-сурет

3.2-мысал. 3.20, б суреттегі, $l = 1$ м, $v = 2$ м/с, $B = 0,5$ Тл параметрлері кезіндегі, қозғалып келе жатқан E өткізгіште және e тұйықталған контурда индукцияланған ЭҚК мәні мен әсерінің бағытын салыстырыңыз.

Шешімі. Қозғалып келе жатқан өткізгіште, оң қол ережесі бойынша әсер етуді бағыттау кезінде ЭҚК-і:

$$E = Blv = 0,5 \cdot 1 \cdot 2 = 1В$$

мәніне ие.

Тұйықталған контурда ЭҚК-і әсері бұрғы ережесі бойынша бағыттаған кезде (3.15):

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -Blv = -0,5 \cdot 1 \cdot 2 = -1В$$

мәніне ие болады.

E мен e ЭҚК-і бірдей абсолюттік мәнге 1В, әртүрлі таңбаға және қарама-қарсы әсер ету бағыттарына ие, яғни өзара тең.

Трансформаторлар, электрлік машиналар, өлшеу механизмдері мен басқа да электрлік құралдар, орамдарымен түрлі магниттік ағындар тіркесуі мүмкін катушкадан тұрады (3.22-сурет). егер магниттік ағындар уақыт барысында өзгертін болса, онда (3.15) бойынша катушканың әр орамында e_0 ЭҚК-і индукцияланады. Катушка орамдары тізбектей жалғанғандықтан, онда w оралымдар санына ие катушкда индукцияланатын ЭҚК, жеке орамдарда индукцияланатын ЭҚК-нің қосындысына тең,

$$e_K = \sum_{k=1}^w e_{ok} = -\left(\frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{d\Phi_2}{dt} + \dots + \frac{d\Phi_w}{dt}\right) = \frac{d\Psi}{dt}, \quad (3.16)$$

мұндағы k — орамның реттік саны;

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_w \quad (3.17)$$

— катушканың ағындық ілінісі.

e_K ЭҚК-нің бағыты бұрғы ережесі бойынша анықталады.

Егер катушканың барлық орамдарын Φ магниттік ағыны тесіп өтетін болса, онда катушканың ағындық ілінісі:

$$\Psi = w\Phi$$

болады, ал оның ішінде индукцияланған ЭҚК:

$$e_k = -\frac{d\Phi}{dt} = -w d\Phi / dt \quad (3.18)$$

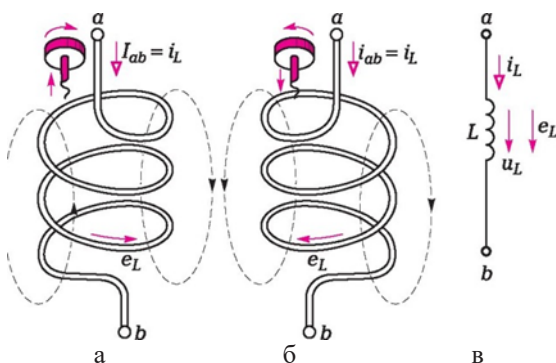
тең.

3.8. ӨЗІНДІК ИНДУКЦИЯ, ИНДУКТИВТІЛІК ЖӘНЕ ИНДУКТИВТІ ЭЛЕМЕНТ

ЭҚК-і катушкада тек сыртқы көздің өзеріп тұратын магнит өрісімен ғана емес, катушканың өзінің тогының өзгермелі магнит өрісімен де индукцияланады.

Әртүрлі бағытта оралынған катушканы қарастырайық және оралымның сымдарының кедергісін ескермейміз (3.23-сурет, а және б). Егер катушкадағы $i_{ab} = i_L$ ток тұрақты болса, онда 3.23, а мен б суреттерінде штрихты сызықтармен көрсетілген, **В** индукция векторының үздіксіз магниттік сызықтарының жиынтығымен сипаттауға болатын, магнит өрісі де орам айналасындағы кеңістікте тұрақты.

Орамдар айналасындағы магнит өрісінің конфигурациясы күрделі пішінге ие. Алайда катушканы электр тізбегінің элементі ретінде сипаттау үшін, көбінесе катушка ішіндегі және оны қоршап тұрған кеңістіктегі өрістің магниттік сызықтарының таралымын біліп қажет емес. Барлық w орамдарымен қоса Ψ ағын ілінстерін есептеу жеткілікті:



3.23-сурет

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_k + \dots + \Phi_w = \sum_{k=1}^w \Phi_k$$

мұндағы Φ_k — k -шы ораммен тіркестірілген магниттік ағын.

Қарастырылып отырған жағдайда катушканың орамдарымен ағындық ілініс осы катушкадағы токқа байланысты болғандықтан, ол *өзіндік ағындық ілініс* деп аталады.

Катушканың өзіндік ағындық ілінісінің катушканың $i_{ab} = i_L$ тогына қатынасы *өзіндік индуктивтілік* немесе *индуктивтілік* деп аталады:

$$L = \Psi / i_L \quad (3.19)$$

СИ-дегі индуктивтіліктің негізгі өлшем бірлігі — *генри* (Гн): $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А} = 1 \text{ В} \cdot \text{с/А}$.

Егер өзіндік ағындық ілініс токқа пропорционалды болса, онда индуктивтілік $L = \text{const}$. Кері жағдайда, индуктивтілік $L(i_L)$ токқа тәуелді болады. Индуктивтіліктің токқа тәуелділігі, мысалы, ферромагнитті материалдан жасалынған магниттік өткізгішке (білікке) ие катушкаларда байқалады.

Индуктивтілік катушкаларының шартты графикалық белгілері 3.1-кестеде келтірілген.

Егер катушка орамындағы ток өзгертін (артатын немесе кемитін) болса, өзіндік ағындық ілініс де өзгереді. Катушка орамларындағы ағындық іліністің өзгерісі кезінде, *электрмагниттік индукция заңына* сәйкес e_L өзіндік индукциясының ЭҚК индукцияланады.

Өзіндік индукцияның ЭҚК-нің оң бағыты магниттік сызықтар бағыты бойынша бұралатын, бұрғы сабының айналу бағытымен, яғни токтың таңдап алынған оң бағытымен сәйкес келеді (3.23-сурет, *а, б*). Бұл ЭҚК анықтамасы бойынша мынаған тең:

$$e_L = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (3.20)$$

3.1-кесте. Индуктивтілік катушкаларының шартты графикалық белгілері

Атауы	Шартты белгісі
Индуктивтілік катушкасы (реактор):	
магниттік өткізгішсіз	
магниттік өткізгішпен	
Сызықтық емес өздігінен реттелетін, мысалы П параметріне байланысты	

немесе (3.19) ескергенде:

$$e_L = -L di_L / dt.$$

(3.20)-дан, уақыт қазіргі моментіндегі өзіндік индукцияның ЭҚК-нің нақты бағыты таңдап алынған оң бағыттан өзгеше болуы мүмкін және токтың уақы бойынша туындысы белгісімен анықталатындығы шығады. Өзіндік индукцияның ЭҚК токтың өзгерісіне әрқашан кедергі келтіретінін (*Ленц ережесі*) оңай көруге болады. Индуктивтілік катушкасында шығынсыз айнымалы ток болуы үшін, оның шықпаларының арасында абсолюттік мәні бойынша тең және уақыттың әрбір моментінде өзіндік индукция ЭҚК-нің бағыты бойынша қарама-қарсы болатын кернеу болуы қажет (3.23-сурет, в):

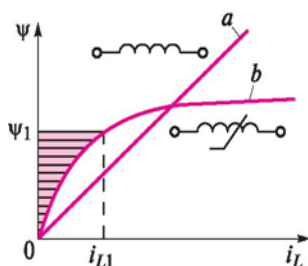
$$u_{ab} = u_L = -e_L = -L di_L / dt = d\Psi / dt. \quad (3.21)$$

Электр тогына әрқашан да магнит өрісі ілесіе жүретіндіктен, тогы бар электротехникалық құрылғының әрбір бөлігінің параметрі индуктивтілік болуы керек.

Сызықтық индуктивті элементі, өзіндік ағындық ілінісі токқа пропорционалды болатын электротехникалық құрылғының кез-келген бөлігінің алмастыру схемасы болып табылады. Оның параметрі ретінде $L = \text{const}$ индуктивтілігі қызмет атқарады.

Егер өзіндік ағындық іліністің токқа тәуелділігі сызықтық емес болса, онда алмастыру схемасы сызықтық емес индуктивті элементтен тұрады, ол сызықтық емес $\Psi(i_L)$ вебер-амперлік сипаттамамен беріледі. 3.24-суретте сызықтық (*a* сызығы) және сызықтық емес (*b* сызығы) индуктивті элементтердің вебер-амперлік сипаттамалары, сондай-ақ осындай элементтердің алмастыру схемаларындағы шартты белгісі келтірілген.

Егер t_1 уақыты аралығында индуктивті элементтегі ток нөлден i_{L1} дейін өзгереді болса, онда элементтің магнит өрісінде (3.23, в суретін қараңыз):



$$W_{m1} = \int_0^{t_1} i_L u_L dt$$

энергия жинақталады не (3.21) ескерсек:

$$W_{m1} = \int_0^{\Psi_1} i_L d\Psi = \int_0^{i_{L1}} i_L L(i_L) di_L \quad (3.22)$$

болады, мұндағы Ψ_1 — $i_L = i_{L1}$ мөк кезіндегі өзіндік ағындық іліністің мәні.

3.24-сурет

(3.22) бойынша $i_{L \text{ ток}}$ кезіндегі индуктивті элементтің магнит өрісінің энергиясы, вебер-амперлік сипаттама мен ординат осы арасына бекітілген ($i_{L \text{ ток}}$ кезінде сызықтық емес индуктивті элементтің магнит өрісіне пропорционал 3.24-суретте штрихталған аудан) сәйкес ауданға пропорционалды.

$i_{L \text{ ток}}$ кезіндегі сызықтық индуктивті элементтің магнит өрісінің энергиясы (3.19) ескергенде (3.22)-ден

$$W_M = Li_L^2 / 2 = \Psi i_L / 2 \quad (3.23)$$

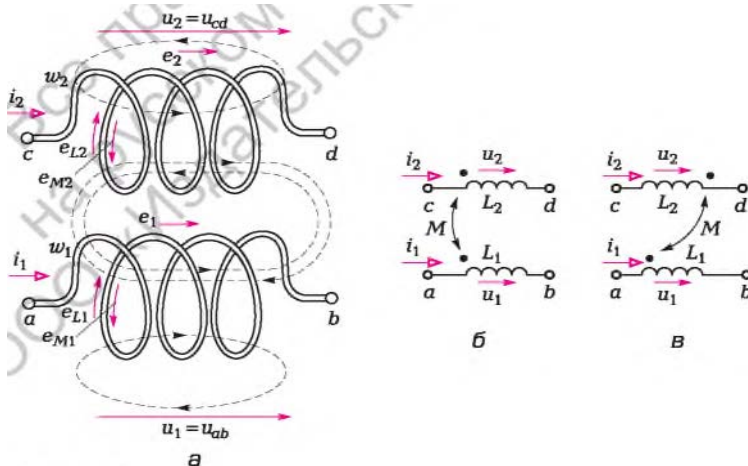
тең. Токты арттырған (азайтқан) кезде индуктивті элементтердің магнит өрісінің энергиясы артады (кемиді). Демек, индуктивті элементтерді энергия аккумуляторлары реінде қарастыруға болады.

3.8. ӨЗАРА ИНДУКЦИЯ МЕН ӨЗАРА ИНДУКТИВТІЛІК

Орамдар саны w_1 мен w_2 және токтары i_1 мен i_2 болатын, бір-біріне қатысты бір катушка өрісінің магниттік сызықтарының бір бөлігі екіншісінің орамдарымен тіркесетіндей жақын орналасқан, екі индуктивтілік катушкаларын қарастырайық (3.25-сурет, а). Сондықтан да, Ψ_{11} және Ψ_{22} өзіндік ағындық іліністен басқа

$$\Psi_{12} = \sum_{k=1}^{w_1} \Phi_{k12}$$

осындай тізбектерді есептеу кезінде бірінші және



3.25-сурет

$$\Psi_{21} = \sum_{k=1}^{w_2} \Phi_{k21}$$

екінші катушкалардың орамдарының қосымша ағындық іліністерін ескерген жөн, мұндағы Φ_{k12} — бірінші катушка — ның k -ші орамы арқылы екінші катушканың тогының ағыны, Φ_{k21} — екінші катушканың k -ші орамы арқылы бірінші катушканың тогының ағыны.

Бірінші және екінші катушкалардың *өзара индуктивтілігі* деп, Ψ_{12} бірінші катушканың қосымша ағындық ілінісінің екінші катушканың i_2 тогына қатынасын айтамыз

$$M_{12} = \Psi_{12} / i_2.$$

Осыған ұқсас екінші және бірінші катушкалардың өзара индуктивтілігі анықталады:

$$M_{21} = \Psi_{21} / i_1.$$

Тәжірибелер көрсеткендей:

$$M_{21} = M_{12} = M = k_{\kappa\delta} \sqrt{L_1 L_2},$$

мұндағы L_1 мен L_2 — бірінші және екінші катушкалардың индуктивтілігі; $0 \leq k_{\kappa\delta} \leq 1$ — катушкалардың байланыс коэффициенті.

Өзара индуктивтілік токтардың бағыты мен мәндеріне тәуелсіз, ол тек катушкалары құрылысымен және олардың өзара орналасуы арқылы анықталалы.

Әрбір индуктивті байланысқан катушкалардың Ψ *толық ағындық ілінісі*, катушкалардағы токтардың бағытына және олардың өзара орналасуына қатысты қосылатын немесе алына алатын екі құраушыдан тұрады. Бірінші жағдайда индуктивті байланысқан катушкаларды қосу, *келісілген*, екінші жағдайда — *қарама-қарсы* деп аталады. Индуктивті байланысқан катушкалардың үлгілік бейнесі (3.25, *а* суретін қараңыз) күрделі болғандықтан, индуктивті байланыстың сипатын суреттеу үшін шартты белгілерді қолданады.

Тізбектердің алмастыру схемасында (3.25, *б* және *в* суреттерін қараңыз) әрбір катушканың аттас шықпаларын («басын») нүктемен белгілейді. Әрбір катушкадағы өзіндік және қосымша ағындық ілініс қосылады, яғни бірінші және екінші катушкалардың толық ағындық ілінісі мынаған тең болады:

$$\Psi_1 = \Psi_{11} + \Psi_{12}; \quad \Psi_2 = \Psi_{22} + \Psi_{21}$$

Егер токтар аттас шықпаларға қатысты әртүрлі бағытталған болса (3.25, *в* суретін қараңыз), онда катушкалар қарама-қарсы

қосылған, яғни:

$$\Psi_1 = \Psi_{11} - \Psi_{12}; \quad \Psi_2 = \Psi_{22} - \Psi_{21}$$

Бұл жерде, осыған дейін қарастырылғандай, ток бағыты деп олардың таңдап алынған оң бағытын түсіну қажет.

(3.18) формулаға сәйкес, бірінші және екінші катушкаларда

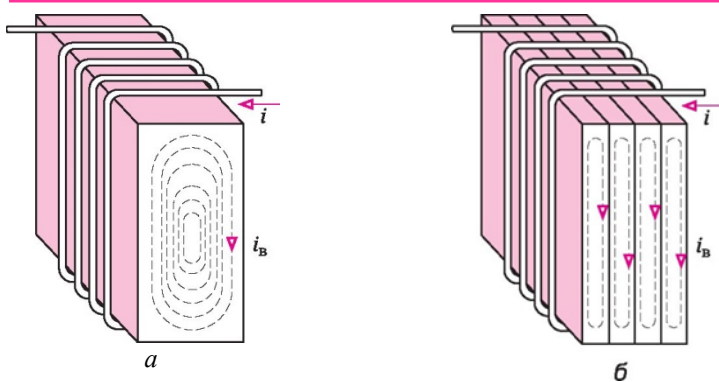
$$\begin{aligned} e_1 &= -\frac{d\Psi_1}{dt} = -\frac{d(\Psi_{11} \pm \Psi_{12})}{dt} = e_{L1} \pm e_{M1}; \\ e_2 &= -\frac{d\Psi_2}{dt} = -\frac{d(\Psi_{22} \pm \Psi_{21})}{dt} = e_{L2} \pm e_{M2} \end{aligned} \quad (3.24)$$

ЭҚК индукцияланатын болады, мұндағы $e_{L1} = -d\Psi_{11}/dt = -L_1 di_1/dt$ және $e_{L2} = -d\Psi_{22}/dt = -L_2 di_2/dt$ – бірінші және екінші катушкалардың өзіндік индукциясының ЭҚК; $e_{M1} = -d\Psi_{12}/dt = -M di_2/dt$ және $e_{M2} = -d\Psi_{21}/dt = -M di_1/dt$ – бірінші және екінші катушкалардың өзара индукциясының ЭҚК-і.

3.25, а суретінде катушканың ішіндегі өзіндік магниттік ағын мен басқа катушканың тогы тудырған магниттік ағын бір-біріне қарама-қарсы бағытталғандығы көрсетілген, бұл (3.24)-гі төменгі белгіге және 3.25, в суретіндегі шартты белгіге сәйкес келеді.

3.10. ҚҰЙЫНДЫ ТОКТАР

Электр машиналарының және аппаратарының айнымалы магнит өрісінде орналасқан массивті бөліктерінде, индукцияланған ЭҚК әсерінен (3.15) i_k құйынды токтар туындайды (3.26-сурет, а).



3.26-сурет

3.2-кесте. Индукцияның әртүрлі мәндеріндегі электротехникалық болат табағындағы шығынның меншікті қуаты

B_m , Тл	Болат маркасы, Вт/кг		B_m , Тл	Болат маркасы, Вт/кг	
	1511-0,35	1511-0,50		1511-0,35	1511-0,50
0,6	0,585	0,685	1,1	1,61	1,92
0,7	0,685	0,890	1,2	1,94	2,24
0,8	0,855	1,130	1,3	2,31	2,58
0,9	1,050	1,380	1,4	2,66	2,95
1,0	1,300	1,640	1,5	3,00	3,40

Олар энергияның қосымша шығынын және магниттік өткізгішінің қыздырылуын тудырады. Одан өзге, құйынды токтар магниттік өткізгішіне магнитсіздейтін әсер көрсетеді. Сондықтан да, құйынды токтарды ескерген кезде, магниттік ағын мен индукцияның бұрынғы мәндері өте үлкен магниттеуші ток және магнит өрісінің жоғары кернеулігінде алынады.

Магниттік өткізгіштердегі құйынды токтарды азайту үшін, біріншіден, құйынды токтар қамтитын контурлар ауданын азайтуға, екіншіден, материалдың өзінің меншікті электрлік кедергісін арттыруға болады.

Құйынды токтардың контурларының ауданын 20 кГц жиіліктерінде азайту үшін магниттік өткізгіштерді сырланып оқшауланған электротехникалық болаттың жұқа табағынан жинайды (3.26-сурет, б). Токтың 50 Гц өндірістік жиілігі кезінде, табақтардың қалыңдығы 0,35-0,50 мм тең. Одан да жоғары жиіліктерде табақтардың қалыңдығы 0,02-0,05 мм дейін кішірейтіледі.

Магнит өткізгіш материалының меншікті электр кедергісін арттыру үшін, оған 0,5-4,5% (Si) кремний қосады. Мұндай қоспа материалдың меншікті электр кедергісін айтарлықтай арттырып, оның магниттік қасиеттеріне шамалы әсер етеді.

Алайда құйынды токтар қолданыс табуда. Мысалы, металл балқыту үшін. Металл салынған тигелді, металлды балқытатын, металлдағы құйынды токтарды индукциялайтын айнаымалы магнит өрісіне қояды.

Магниттік өткізгішті қайта магниттеу, құйынды токтарға

кететін шығыннан басқа, гистерезис ілмегі ауданына пропорционал магнитті гистерезиске кететін энергия шығынымен қоса жүреді.

Электротехникалық құрылғыларды, электротехникалық болаттан жасалынған, магниттік өткізгіштердегі шығындардың қуатын анықтау үшін есептеу кезінде анықтама кестелері қолданылады, онда қосынды шығынның меншікті қуатының B_m магниттік индукция амплитудасына тәуелділігі (3.2-кесте) берілген.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Магнитті-жұмсақ және магнитті-қатты материалдардың айырмашылығы неде?
2. Катушканың өзіндік индуктивтілігінің анықтамасын беріңіз.
3. (3.15) және (3.18) формулаларда өзіндік индукцияның ЭҚК-нің оң бағыты қалай таңдалынады? Ленц ережесімен байланысын түсіндіріңіз.
4. Электр машиналар мен аппараттардағы магнит өткізгіштерде құйынды токтардың пайда болуының себебі неде?
5. Электр машиналар мен аппараттардағы магнит өткізгіштердің жұмысына құйынды токтар қандай кері әсерін тигізеді?

ӨЗІНДІК ШЫҒАРУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

1. Егер катушкалардың байланыс коэффициенті $k_{кб}=0,5$ болса, индуктивтілігі $L_1=0,12$ Гн және $L_2=3$ Гн тең, екі катушканың өзара индуктивтілігін анықтаңыз.
Жауабы: 0,3 Гн.
2. Параметрлерінің мәні: $l=1$ м, $v=2$ м/с, $B=0,5$ Тл кезінде, 3.20, а суреттегі тәжірибедегі e тұйықталған контурда және E қозғалып келе жатқан өткізгіште индукцияланған ЭҚК-нің мәні мен әсерінің бағытын салыстырыңыз.
3. Параметрлерінің мәні: $a=1$ см, $I=100$ А болатын, тұрақты токтың екі өткізгішті желісінің $l=1$ м ұзындықты сымына әсер ететін F күші (3.19-суретті қараңыз) неге тең?
Жауабы: 0,2 Н.
4. Егер өзіндік ағындық іліністері Ψ , 0,1 с уақыт аралығында 0,3 Вб-ден 0,1 Вб-ге дейін бір уақытта бірқалыпты азаятын болса, 3.23 а мен б суреттегі катушкаларда индукцияланатын ЭҚК неге тең?
Жауабы: 2 В.