

2. Склярів С. А. Математические модели и информационные технологии автоматизированного управления системами противокоррозионной защиты магистральных трубопроводов: дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.13.06/ Склярів Станіслав Александрович.- X., 2002 – 168с.
3. Бешта О.С. Сумісна робота станцій катодного захисту підземних металевих трубопроводів від електрохімічної корозії / О.С. Бешта, О.О.Азюковський // Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Матеріали наук.-техн. конф. – Севастополь: Сев. НТУ, 2013. – С. 17-19.
4. Aziukovskiy A. The electrochemical cathodic protection stations of underground metal pipelines in uncoordinated operation mode / A. Aziukovskiy // CRC Press. Balkema is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, London, UK 2013– P. 47 – 55.
5. Стрижевский И. В. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения./ И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1967 – 227с.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Слесаревим В.В.

УДК 371.315:621.3

А.С. Головченко, канд. техн. наук

(Україна, м. Дніпропетровськ, Державний ВНЗ “Національний гірничий університет”)

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИКЛАДАННЯ НАВЧАЛЬНИХ ДИСЦИПЛІН “ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ” ТА “ЕЛЕКТРОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВО”

Дисципліни “Електротехнічні матеріали” та “Електроматеріалознавство” є нормативними в навчальних планах за напрямками підготовки “Електротехніка та електротехнології” і “Електромеханіка”, що потребує приділяти достатньо велику увагу методології викладання цих дисциплін, особливо для тих студентів, які мають намір навчатися потім за спеціальністю “Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії”. Вже сама назва цієї спеціальності свідчить про актуальність пошуку новітніх науково-технічних рішень та необхідність глибокого розуміння процесів, що протікають в електротехнічних матеріалах. Важливою умовою якісного навчання студентів за цими дисциплінами є їх попередня і достатньо ґрунтовна підготовка з фундаментальних дисциплін – з фізики, основ електротехніки та вищої математики. Мається на увазі знання найбільш важливих фізичних явищ, які відбуваються в електротехнічних матеріалах як складовій частині будь-якого електротехнічного чи електронного обладнання, закономірності фізичних явищ та математичне формулювання цих закономірностей. На жаль, багато студентів обмежуються знаннями лише математичних формул, за допомогою яких описуються ті чи інші фізичні закони та процеси. Розглянемо типові ситуації, в яких опиняється викладач під час викладання згаданих раніше дисциплін.

Закономірність процесу переміщення зарядів

Почнемо з найбільш важливого для вивчення електротехнічних матеріалів фізичного явища – переміщення заряджених частинок, що звичайно називають електричним струмом. Перше питання, яке при цьому виникає: що ж таке електричний струм? Типова і по суті правильна відповідь студентів на це питання складається з трьох слів – упорядковане переміщення зарядів. На жаль у більшості випадків студенти не в змозі чітко відповісти, що ж означає кожне з цих слів. Викладач може пояснити це таким чином:

- заряди чи заряджені частинки можуть бути негативними або позитивними (бажано пояснити це за допомогою спрощеної моделі атома);

- переміщення зарядів чи заряджених частинок в принципі може бути будь-якого виду, у тому числі обертання електрона як складової частини атома навколо ядра чи навколо своєї осі;

5. - упорядкованість процесу переміщення зарядів залежить від поставленої задачі (у найбільш простих випадках упорядкованим вважається переміщення вільних електронів у замкненому електричному колі в межах покритих ізоляцією провідників).

Яка ж закономірність процесу переміщення заряджених частинок? Студенти не завжди називають у відповідь відомий ще зі школи закон Ома, інтегральна форма якого для окремої ділянки електричного кола $I = \frac{U}{R}$ показує залежність електричного струму від електричної напруги U та електричного опору R

цієї ділянки. У даному випадку електричний струм розглядається як параметр процесу переміщення зарядів і означає кількість зарядів q , які пройшли через відповідну зону спостереження за одиницю часу t .

Миттєве значення електричного струму $i = \frac{dq}{dt}$ – це швидкість зміни електричного заряду.

Незважаючи на зовнішню простоту закону Ома, труднощі починаються при поясненні поняття опору R . Більшість студентів сприймають це поняття як числову характеристику. Наприклад, при $R=20$ Ом,

$U=220$ В вони дуже швидко визначають величину електричного струму $I=11$ А. Інші студенти сприймають R ще як елемент, який можна увімкнути в електричне коло. Для таких студентів корисно запропонувати визначити електричний струм у розетці з напругою 220 В, у яку нічого не увімкнено, тобто R як елемент відсутній. Деякими студентами це сприймається помилково як $R=0$, що призводить їх до абсурдного результату $I=\infty$ (!?). Цей приклад допомагає студентам краще зрозуміти, що відсутність чогось не завжди означає нуль. Далі, викладачу дуже корисно звернути увагу студентів і на третій варіант сприймання опору R як процесу, розглядаючи його з крайніх точок зору. Можна на прикладі повітря спочатку показати, що процес розрідження повітря, навіть до стану майже вакууму, кардинально не впливає на його електроізоляційну властивість, а потім показати, що вакуум в принципі не здатний створювати опір процесу переміщення заряджених частинок. Це означає, що сильно розріджене повітря чи вакуум в одній ситуації можна розглядати як звичайний електричний ізолятор, а в іншій – як ідеальний провідник чи надпровідник. Далі, на прикладі міді можна спочатку показати, що охолодження міді, навіть до майже абсолютного нуля, кардинально не впливає на її провідникову властивість, а потім показати, що навіть при дуже низькій температурі мідь створює деякий опір електричному струму на відміну від надпровідника при цій же температурі, і тому має в безкінечне число разів більший питомий опір відносно надпровідника. Це означає, що сильно охолоджену мідь в одній ситуації можна розглядати як звичайний провідник, а в іншій – як ідеальний електричний ізолятор для надпровідника. Наведені приклади допомагають студентам зробити важливий для себе висновок: діелектрик, провідник, надпровідник, напівпровідник, магнетик, струм, опір, напруга, електрорушійна сила – це доволі умовні поняття та терміни, суть яких потрібно глибоко розуміти при вивченні властивостей електротехнічних матеріалів.

З точки зору аналізу причинно-наслідкових зв'язків корисно звернути увагу студентів на всі три варіанти формул згаданого раніше закону Ома $I = \frac{U}{R}$, $U = IR$ та $R = \frac{U}{I}$, які математично є еквівалентними, а

з точки зору фізики процесу – суттєво відрізняються. Стосовно першого варіанта формули студенти зазвичай швидко приводять приклади виникнення електричного струму внаслідок подачі електричної напруги на відповідну ділянку електричного кола та залежності струму від величини опору R . Стосовно ж другого варіанта формули, то часто виникають труднощі з прикладами, в яких струм стає причиною (аргументом), а напруга – наслідком (функцією). Найбільші ж труднощі виникають під час тлумачення третього варіанта формули, в якому опір стає наслідком (функцією), а напруга та струм – причинами (аргументами). У цій ситуації доцільно показати різновиди вольт-амперних характеристик окремих ділянок електричного кола для електроізоляційних, провідникових та напівпровідникових матеріалів, серед яких лінійна залежність при $R=const$ – це результат спрощення реальних властивостей матеріалів. Після цього можна закріпити цей пізнавальний матеріал таким простим прикладом: потрібно розрахувати потужність звичайної лампи розжарювання, яка використовується для освітлення житла, у разі зменшення напруги вдвічі, якщо лампа розрахована на напругу 220 В і потужність 100 Вт. Багато студентів, на жаль, звикли у подібних випадках керуватися відомими ще зі школи пропорціями, а не фізичними законами. Дехто зі студентів, враховуючи зменшення напруги вдвічі, визначають потужність також вдвічі меншу, тобто 50 Вт. Інші студенти все ж звертають увагу на квадратичну залежність потужності від напруги і визначають потужність величиною в 25 Вт. Після цього викладачу потрібно звернути увагу на відсутність вольт-амперної характеристики лампи, через що таку задачу взагалі неможливо вирішити без додаткової інформації.

Фізичну суть електрорушійної сили (ЕРС) E або напруги U як причини появи електричного струму I за законом Ома можна пояснити силами, які діють на заряджені частинки і можуть спричиняти їх переміщення (якщо вони вільні) або зміщення (якщо вони зв'язані). Ці сили можуть бути доволі різноманітними за своєю природою виникнення або створення:

- взаємодія між декількома зарядами чи зарядженими частинками (сила Кулона);
- звільнення хімічної енергії окисно-відновних реакцій (гальванічні елементи, акумулятори, електрохімічні паливні елементи);
- взаємодія між рухомими зарядами і джерелом магнітного поля (сила Ампера чи Лоренца);
- взаємодія між зарядами і джерелом змінного магнітного поля (електрорушійна сила взаємодукції або самоіндукції – закон Фарадея);
- силовий вплив світла на електрони (фотоелектронна емісія або фотоелектричний ефект);
- термоелектрорушійна сила, яка виникає внаслідок температурної та структурної неоднорідності електричного кола (ефект Зеебека).

Електрохімічні паливні елементи, фотоелектричний ефект та ефект Зеебека останнім часом привертають особливу увагу фахівців з питань пошуку відновлюваних джерел енергії та створення електротехнічних матеріалів з особливими властивостями. До речі, ефект Зеебека має фундаментальне значення навіть для існування всього живого на нашій планеті. Адже саме температурна та структурна неоднорідність Землі лежить в основі виникнення термоелектрорушійної сили в глобальних масштабах, що спричиняє постійний електричний струм в нашій планеті, а значить захисне магнітне поле Землі. Магнітне

поле Землі відхиляє рух швидких і тому високоенергетичних заряджених частинок Сонця на дальніх підступах до її атмосфери (сила Лоренца), і таким чином по суті зберігає на Землі повітря та воду, а значить життя. Адже кінетичної енергії заряджених частинок Сонця більш ніж достатньо для того, щоб в результаті зіткнення викинути молекули атмосферного повітря та вологи за межі земного тяжіння у відкритий космос.

Особливості електричного струму в провідникових матеріалах

Відносно велика електропровідність металевих провідників пояснюється настільки слабкими зв'язками електронів з атомами чи молекулами, що їх можна умовно вважати вільними. Така електропровідність називається електронною. Велика електропровідність важлива у тих випадках, коли бажано знизити втрати електроенергії в електричному колі або коли потрібно перетворити електричну енергію в теплову. Коли ж мова йде про напівпровідники, то інколи розглядають умовне переміщення звільненого від електрона місця – “дірки” з позитивним за знаком заряду. Насправді ж у твердому напівпровіднику фізично переміщуються лише електрони, які можуть бути вільними лише за виконання певних умов відповідно до особливих властивостей напівпровідникового матеріалу. Така електропровідність називається дірковою. Найбільш поширеними явищами, що супроводжують електричний струм в провідниках чи напівпровідниках, є:

– процес виділення в часі t теплової енергії $W_T = I^2 R t$;

– перерозподіл теплової енергії між неоднорідними елементами електричного кола, наприклад, нагрівання одних елементів і охолодження інших за рахунок ефекту Пельтьє (найбільш цікаво сприймається студентами застосування ефекту Пельтьє в холодильнику й електричній плиті як в невід’ємних частинах єдиного пристрою);

– створення магнітного поля та накопичення енергії $W_M = L \frac{I^2}{2}$ в цьому полі пропорційно індуктивності L провідника;

– виникнення електричної напруги U на окремих ділянках електричного кола, що спричиняє накопичення (конденсацію) зарядів аналогічно конденсатору ємністю C , а значить накопичення енергії $W_C = C \frac{U^2}{2}$ в електричному полі.

Особливістю електричного струму в електропровідній рідині чи розчині є можливість переміщення не тільки вільних електронів, але й набагато більших за розмірами заряджених частинок, зокрема, позитивних іонів, що по суті означає переміщення заряджених частинок рідини чи розчину в сторону, протилежну переміщенню вільних електронів. До речі, саме процес переміщення іонів розчину чи електроліту використовується для отримання чистої міді та чистого алюмінію за методом електролізу. Саме процес переміщення іонів з металевих конструкцій у вологий ґрунт під впливом ЕРС чи електричної напруги, що називають блукаючим струмом, суттєво прискорює корозію цих конструкцій.

У газі також можуть одночасно переміщуватися в протилежні сторони вільні електрони та позитивно заряджені частинки. Але для їх створення в газовому середовищі витрачається додаткова енергія. У таких випадках газ використовують як провідник електричного струму, а не як діелектрик, наприклад, для контролю іонізуючого випромінювання, створення електричного струму у дуже розрідженому повітрі вакуумних приладів, створення високотемпературної електрозварювальної дуги.

Особливості електричного струму в діелектриках та конденсаторах

Головною особливістю електричного струму в діелектриках у звичайних умовах є майже повна відсутність вільних зарядів, і тому мова може йти в основному про зміщення зв'язаних зарядів під дією електричної напруги або електрорушійних сил. Такий струм прийнято називати струмом зміщення, а процес зміщення зв'язаних зарядів – поляризацією діелектрика. Цей процес призводить до накопичення (конденсації) додаткових зарядів на обкладинках електричних конденсаторів. Найбільші труднощі студенти відчувають стосовно розуміння фізичної суті поляризації діелектрика. Зокрема, їм непросто зрозуміти, чому при змінній напрузі в електричному колі, розділеному діелектриком конденсатора, може виникати значний електричний струм, незважаючи на начебто повний розрив електричного кола.

Сутність поляризації діелектриків корисно пояснювати студентам у декілька етапів. Спочатку важливо показати, що додаткові заряди на металевих обкладинках конденсатора накопичуються не за рахунок їх переміщення з діелектрика на обкладинки, а завдяки їх наведенню під впливом зв'язаних зарядів діелектрика, зокрема, під впливом сил Кулона. Зрозуміло, що накопичення зарядів на обкладинках конденсатора та періодичне перезарядження конденсатора неможливе без їх переміщення, тобто без електричного струму в електричному колі за межами діелектрика. Причому, чим більше здатність конденсатора накопичувати заряди (чим більше ємність C конденсатора) і чим частіше заряд конденсатора змінюється (чим більше частота ω зміни електричної напруги), тим більше діюча величина електричний стру-

му: $I = U\omega C$. Ось чому електрична ізоляція інколи вважається умовною, особливо при високій частоті ω . Миттєві значення зарядно-розрядного струму, електричного заряду та напруги між обкладинками конденсатора пов'язані між собою формулою: $i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}$.

Далі, корисно звернути увагу студентів на таку особливість: під час періодичного перезарядження конденсатора в електричному колі заряди у деякий момент часу виходять з обкладинки конденсатора (з електричного вузла) в бік електропровідної частини кола, але при цьому не входять в цей вузол з боку діелектрика, і навпаки. Це може створити враження про “порушення” першого закону Кірхгофа. Насправді ж заряди входять в електричний вузол обкладинки конденсатора не з боку діелектрика, а з різних ділянок цієї ж обкладинки, на що студенти зазвичай не звертають уваги.

Для більш глибокого розуміння наслідків періодичного перезарядження конденсатора змінним струмом та періодичної зміни величини електричного поля між обкладинками конденсатора корисно розглянути конденсатор, в якому суттєво (до будь-яких значень!) збільшена відстань між його обкладинками. При цьому, як діелектрик може розглядатись повітря чи вакуум. Важливо відзначити, що внаслідок цього змінний струм в електричному колі за межами діелектрика конденсатора не зникає, а лише відповідно зменшується, і тому може бути контрольованим. Це дозволяє безпроводно передавати контрольовані електричні сигнали чи інформацію на велику відстань. У таких випадках періодичні сигнали називають радіосигналами, а обкладинки конденсатора – антенами передавача і приймача радіосигналів. Розповсюдження радіосигналів обумовлене передачею у просторі силової взаємодії між зарядами обкладинок конденсатора чи антен і відбувається зі швидкістю світла (близько 300000 км/с). До речі, студентам корисно нагадати про “порушення” першого закону Кірхгофа під час зарядження конденсатора, але тепер вже на прикладі антени радіоприймача, і таким чином обґрунтувати факт існування електричного струму в антені і приймальному контурі приймача при видимій відсутності електрорушійної сили як причини цього струму.

Якщо між передавачем і приймачем радіосигналів знаходиться додаткова “обкладинка” конденсатора, то в ній переміщення заряджених частинок відбувається аналогічно переміщенню електронів в антені передавача, а це приводить до розповсюдження радіосигналів від додаткової “обкладинки” в інші сторони, тобто зі зміною напрямку передачі радіосигналів. Завдяки цьому радіозв'язок можливий на основі використання так званих відбитих радіосигналів. Роль додаткової “обкладинки” може виконувати будь-який об'єкт з достатньо великою кількістю вільних зарядів, наприклад, іоносфера Землі чи літак. Процес контролювання об'єкта відбитих радіосигналів звичайно називають радіолокацією.

Слід відзначити, що періодичне переміщення зарядів під час перезарядження обкладинок конденсатора чи антени супроводжується не тільки змінним електричним полем, але й змінним магнітним полем, силовий вплив якого розповсюджується у просторі також зі швидкістю світла. Силовий вплив змінного магнітного поля обумовлений електрорушійною силою відповідно до закону електромагнітної індукції – закону Фарадея. Змінні електричні і магнітні поля настільки тісно взаємопов'язані, що їх часто розглядають як єдине електромагнітне поле. Передача у просторі радіосигналів часто асоціюється з хвилями, враховуючи коливальний (синусоїдальний) характер перезарядження антени передавача та кінцеву швидкість розповсюдження у просторі електромагнітного поля. Тому радіосигнали ще називають електромагнітними хвилями. Їх розповсюдження у просторі є не що інше, як передача зі швидкістю світла силової взаємодії між зарядженими частинками, що знаходяться між собою на деякій відстані, і тому не супроводжується фізичним переміщенням у цьому просторі матеріальних частинок. У той же час, процес передачі силової взаємодії потрібно розглядати як процес передачі в просторі електромагнітної енергії, яка рано чи пізно вступить у взаємодію з зарядженими частинками. До речі, світлові промені, рентгенівські промені та гамма-промені також можна розглядати як електромагнітні хвилі, розповсюдження яких у просторі відбувається за тими ж законами. У більшості випадків вони виникають унаслідок коливаний електронів під дією різноманітних факторів, і навіть під час їх зникнення. Найбільш цікаво сприймається студентами приклад зникнення електрона внаслідок його анігіляції з позитроном, коли виникають два направлених у протилежні сторони гамма-кванти.

Особливості магнітного потоку в магнітних матеріалах

Студентам дуже важливо розуміти фізичну сутність явищ, які пов'язані з виникненням та проявами магнітного поля в різних умовах. Адже робота більшості електротехнічних та електронних пристроїв базується на використанні магнітного поля та відповідних магнітних матеріалів. Перш за все студентам слід знати, що магнітне поле виникає внаслідок будь-якого переміщення зарядів, тобто будь-якого електричного струму відповідно до закону повного струму, і може проявляти себе силовою взаємодією з зарядами в разі їх взаємної зміни в часі чи просторі. Історично так склалося, що спочатку була відкрита сила взаємодії постійного магнітного поля з постійним електричним струмом, яку назвали силою Ампера (1820 рік). Потім Фарадей відкрив силу взаємодії змінного магнітного поля із зарядами електричного контуру, яку назвали електрорушійною силою електромагнітної індукції (1831 рік). Нарешті, була відкрита

сила взаємодії постійного магнітного поля з окремими рухомими зарядами, яку назвали силою Лоренца (1892 рік). Більш загальною закономірністю силової взаємодії магнітного поля і зарядів можна вважати закон електромагнітної індукції – закон Фарадея. Формула цього закону має вигляд $e = -\frac{d\Phi}{dt}$, де e – мит-

тєве значення електрорушійної сили (ЕРС), яка виникає в замкненому контурі, діє на заряджені частинки в цьому контурі і тому здатна рухати ці частинки або гальмувати їх рух; Φ – магнітний потік, який пронизує цей контур і змінюється відносно нього в часі t деякою швидкістю. В окремих випадках зміна магнітного потоку Φ може відбуватися внаслідок його переміщення у просторі відносно замкненого контуру. Якщо використовується декілька послідовно з'єднаних контурів у складі єдиного електричного кола, що звичайно спостерігається на практиці у вигляді котушки з числом контурів чи витків W , то результуюча електрорушійна сила визначається як алгебраїчна сума електрорушійних сил кожного з цих контурів. Знак “мінус” у формулі закону Фарадея має принципово важливе значення з точки зору причинно-наслідкових зв'язків. Цей знак означає те, що напрям дії і зона прикладення сили відповідають принципу протидії фактору, що спричинив цю силу. Зокрема, в стаціонарних електромагнітних пристроях знак “мінус” визначає таку полярність ЕРС взаємоіндукції або самоіндукції в обмотках цих пристроїв, яка здатна через струм протидіяти процесу зміни магнітного потоку. У нестационарних електромагнітних пристроях виникають електромагнітні сили, які прикладені до їх рухомих частин, і тому здатні їх рухати або гальмувати відповідно до принципу протидії.

У загальних випадках, коли можуть одночасно діяти декілька причин та факторів силової взаємодії, наприклад, сила Кулона і сила Лоренца, бажано користуватися найбільш узагальнюючим законом – законом збереження енергії. Адже будь-яка робота чи енергія A може проявити себе через переміщення X матеріального тіла у просторі під дією сили F : $A = \int_0^x F dX$. Значить, сила F може бути визначена через

градієнт роботи чи енергії, тобто $F = -\frac{dA}{dX}$. Знак “мінус” у цій узагальнюючій формулі сили, як і в електрорушійній силі за формулою Фарадея, відповідає філософському принципу протидії фактору, що спричинив цю силу.

Далі бажано розглянути зі студентами декілька найбільш характерних ситуацій та прикладів використання взаємного силового впливу магнітного поля і заряджених частинок (електронів).

Ситуація 1

Взаємодія нерухомого джерела змінного магнітного потоку $\Phi(t)$ з нерухомим електричним контуром, який власне і спричинив цей потік. У цьому контурі повинен існувати змінний електричний струм $i(t)$, який є причиною появи змінного магнітного потоку $\Phi(t) = Li(t)$, де L – індуктивність котушки зі струмом. Найбільш характерним прикладом такої ситуації може бути будь-який провідник змінного струму чи котушка індуктивності, в якій відповідно до закону Фарадея виникає електрорушійна сила самоіндукції $e = -W \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} = -u_L$, яка гальмує рух електронів і таким чином створює відповідне падіння напруги u_L у цій котушці.

Ситуація 2

Взаємодія нерухомого джерела змінного магнітного потоку $\Phi(t)$ з декількома нерухомими електричними контурами, які спричиняють цей потік. Найбільш характерним прикладом такої ситуації може бути трансформатор, в якому роль нерухомих електричних контурів виконують первинна і вторинні обмотки. Ці обмотки пов'язані основним магнітним потоком $\Phi(t)$ в магнітопроводі (осерді), який виготовлений з магнітного матеріалу. Згідно із законом Фарадея у всіх контурах виникають електрорушійні сили (ЕРС), причому в первинній обмотці трансформатора ЕРС гальмує рух електронів, а у вторинних обмотках чи контурах – навпаки, рухає електрони, створюючи електричний струм. Вторинні електричні контури можуть виникати, нажаль, і в середині магнітопроводу, що призводить до вихрових струмів у ньому і відповідних втрат електричної потужності. Тому для зменшення цих втрат всіляко намагаються зменшити електропровідність магнітного матеріалу і всього магнітопроводу в цілому.

Важливо відзначити, що взаємопов'язаність первинної і вторинних обмоток трансформатора досягається завдяки підвищеній властивості магнітопроводу трансформатора намагнічуватись та перемагнічуватись. Цю властивість можна пояснити здатністю електронних орбіт атомів, молекул чи більш великих частинок феромагнітного матеріалу (магнітних доменів) переорієнтовуватись під силовим впливом магнітного потоку. Внаслідок цього результуючий магнітний потік у магнітопроводі може суттєво (в сотні і навіть тисячі разів!) збільшуватись, що дозволяє відповідно зменшити витрати електричної енергії на

створення магнітного потоку. На жаль, зростання магнітного потоку чи індукції в магнітному матеріалі суттєво обмежується, коли практично всі електронні орбіти задіяні в процесі їх переорієнтації, тобто коли феромагнітний матеріал насичується. Згідно із законом Фарадея незмінність магнітного потоку у стані насичення магнітного матеріалу означає припинення умов виникнення ЕРС взаємоіндукції. Ось чому в трансформаторах існує межа стосовно робочого значення магнітної індукції та електричної напруги живлення, яку переходити небажано.

Ситуація 3

Взаємодія нерухомого джерела постійного магнітного потоку $\Phi = const$ з рухомими електричними контурами, або взаємодія рухомого джерела постійного магнітного потоку з нерухомими електричними контурами відповідно до закону електромагнітної індукції. Найбільш характерним прикладом такої ситуації може бути електричний генератор постійного струму або синхронний генератор, в яких роль джерела постійного магнітного потоку виконує електромагніт чи індуктор, а роль електричних контурів – обмотка якоря чи ротора. Взаємопов'язаність електричних контурів у генераторі забезпечується, як і в трансформаторі, магнітопроводом. Відмінність магнітопроводу генератора полягає лише в тому, що він має рухому і нерухому частини, які розділені між собою повітряним проміжком. Ця відмінність є визначальною з точки зору визначення місця прикладення електромагнітної сили гальмування генератора. Причиною зміни магнітного потоку і виникнення ЕРС в обмотці якоря генератора є переміщення його магнітної системи, а не обмотки. А згідно з принципом протидії причині за законом Фарадея це означає, що гальмівна сила навантаженого генератора прикладена не до провідників обмотки якоря, а в основному до магнітної системи якоря генератора. Більшість же студентів, посилаючись на розповсюджене визначення сили Ампера, помилково вважають, що гальмівна сила прикладена безпосередньо до провідників зі струмом обмотки якоря генератора. Менш типовим прикладом може бути взаємодія нерухомого джерела постійного магнітного потоку $\Phi = const$ з рухомими електропровідними частинками, наприклад, з частинками золота на золотих копальнях. В цих частинках, які рухаються в лотку разом з водою і породою і відрізняються від породи підвищеною електропровідністю, виникає електрорушійна сила (ЕРС) відповідно до закону електромагнітної індукції. В свою чергу ЕРС спричиняє електричний струм і силу Ампера, яка додатково гальмує переміщення золотих частинок. Завдяки цьому підвищується ефективність виділення золота з золотоносної породи.

Ситуація 4

Взаємодія джерела магнітного потоку з рухомими зарядженими частинками або електричним струмом. Силу такої взаємодії прийнято називати силою Лоренца або силою Ампера. Прикладом такої ситуації може бути захисна взаємодія магнітного поля Землі з зарядженими частинками Сонця, що рухаються з великою швидкістю. Завдяки цій взаємодії більшість цих частинок відхиляється від Землі. Другим прикладом може бути електричний двигун, в якому електромагнітна сила виникає через силову взаємодію джерела магнітного потоку з обмоткою якоря чи ротора, в якій створюється електричний струм. Ця сила, як і у разі навантаженого електричного генератора, прикладена в основному до магнітної системи якоря (ротора), а не до його обмотки з електричним струмом, що відповідає філософському принципу протидії фактору, який спричинив цю силу. До речі, електричний струм в обмотці якоря (ротора) електричного двигуна може створюватись не тільки шляхом безпосереднього її приєднання до джерела електричної енергії, але й завдяки явищу електромагнітної індукції, як це відбувається в трифазному асинхронному двигуні. Третім прикладом може бути електродинамічна сепарація – розділення рухомих частинок на два чи більше потоків, які відрізняються між собою електропровідністю, за допомогою змінного (високочастотного) і неоднорідного у просторі магнітного поля. В цьому прикладі силова взаємодія змінного магнітного поля з провідниковими частинками подібна рухомій силі, що виникає в асинхронному двигуні.

Ситуація 5

Взаємодія джерела магнітного потоку з феромагнітним матеріалом. Силу такої взаємодії в принципі можна умовно назвати силою Лоренца або Ампера, якщо рух електронів в атомах, молекулах чи більш великих частинках феромагнітного матеріалу (в магнітних доменах) вважати впорядкованим. Прикладом такої ситуації може бути притягування до джерела постійного магнітного потоку зразку феромагнітного матеріалу завдяки здатності електронних орбіт частинок цього матеріалу переорієнтуватись відповідно до силового впливу джерела магнітного потоку. Всім студентам добре відоме це явище ще з дитинства, але мало хто з них знає про ефективне використання цього явища в деяких синхронних трифазних двигунах з явно вираженими полюсами, в яких взагалі відсутня обмотка збудження чи індуктор. Якщо феромагнітний матеріал має значну залишкову магнітну індукцію, то зразок такого матеріалу слід розглядати як постійний магніт. Напрямок силової взаємодії такого матеріалу з джерелом магнітного потоку залежить від орієнтації матеріалу у просторі, тобто може бути як взаємне протягування, так і взаємне відштовхування.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.