

ЗАКОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИЛИ

Розглянуті особливості розрахунків сил Лоренца, Ампера, взаємодії паралельних струмів та моменту електричних машин. Вони мають винятки у застосуванні і є правилами, що випливають із закону електромагнітної сили, як похідної по координаті від енергії робочого магнітного потоку. Запропонований додаток до напрямку дії електромагнітної сили. Розглянуті вимоги до проектування явнопольної електричної машини.

Рассмотрены особенности расчетов сил Лоренца, Ампера, взаимодействия параллельных токов и момента электрических машин. Они имеют исключения при применении и являются правилами, которые вытекают из закона электромагнитной силы, как производной по координате от энергии рабочего магнитного потока. Предложено дополнение к направлению действия электромагнитной силы. Рассмотрены требования к проектированию явнополюсной электрической машины.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для всіх електромагнітних систем завжди виправдовується відомий закон, згідно якому електромагнітна сила дорівнює похідній від повної енергії магнітного поля по координаті

$$F = -(\partial W_M / \partial g), \quad (1)$$

де W_M – енергія магнітного поля; g – координата.

Формула (1) – це єдина причина виникнення електромагнітної сили і вона є законом не лише для електротехніки, але й для будь-яких систем з власними методами накопичення енергії, включаючи пневматичні, механічні чи хімічні.

Миттєва потужність p_L , яка надходить у індуктивність L без втраг, пов'язана з процесом зростання чи зменшення енергії магнітного поля W_L і дорівнює добутку миттєвої напруги u_L та струму i :

$$p_L = u_L i = Li \frac{di}{dt}.$$

Накопичена енергія магнітного поля дорівнює

$$W_L = \int_0^t p_L dt = \int_0^t Li \cdot di = \frac{Li^2}{2} = \frac{\Psi^2}{2L}, \quad (2)$$

де Ψ – потокозчеплення.

Таким чином, електромагнітна енергія в електромагнітній системі залежить від величини магнітного поля (електричні поля не розглядаються).

Тому, для підкреслення точної основи фізичного виникнення сили, формули для її розрахунку бажано було б пов'язувати з величиною магнітного поля якщо не прямим введенням магнітної індукції чи магнітного потоку у формули, то хоча б у вигляді пояснення.

Цього у фаховій літературі явно бракує. При наявності феромагнітного магнітопроводу принципова нелінійність феромагнетиків та їх гістерезис не допускають використовувати прямі пропорційні співвідношення. Численні формули для розрахунку електромагнітної сили часто наводяться без посилання на закон (1) і на додаток охоплюють ряд взаємопов'язаних фізичних величин без прямого урахування магнітної індукції та магнітного поля. В результаті стає незрозумілою фізична сутність виникнення сили, що з чим взаємодіє: "струм зі струмом?", "магнітна індукція з магнітною індукцією?", "магнітна індукція з напруженістю магнітного поля?" Назва (за традицією) законами частки з цих формул лише погіршує становище.

Прикладом у цьому відношенні є твердження: "Згідно закону Ампера $F = BIL$ сила – це результат взаємодії провідника зі струмом і магнітним полем" [11, с. 131].

Правильне по своїй суті традиційне твердження, що сила Лоренца не виконує роботу, а лише змінює напрям руху зарядженої частинки [4, с. 373; 12, с. 241] без відповідних пояснень стає мало не фізичним чудом: "чи не суперечить закону фізики твердження, що сила, яка прикладена до матеріальної частинки і внаслідок цього змінює її траєкторію, не виконує роботу?", "навіщо тоді космонавти витрачають паливо на зміну траєкторії ракети?", "чому на основі сили Ампера (яка все ж виконує роботу) отримується сила Лоренца [6, с. 152] та навпаки – на основі сили Лоренца отримується сила Ампера [4, с. 372]?"

В фаховій літературі також недостатньо уваги приділено питанню зв'язку формул по розрахунку сили із законом (1) і особливостями їх застосування при використанні феромагнітних магнітопроводів.

Процес визначення електромагнітної сили складається з двох частин:

1. Розрахунку величини сили.

2. Визначення напрямку дії сили за правилом лівої руки чи по введеному Фарадеєм поняттю пружності магнітних силових ліній (трубок одиничного магнітного потоку), що мають властивості натягнутих пружних елементів: вздовж магнітних силових ліній вони намагаються скоротитись за рахунок зменшення їх довжини та спрямування викривлень, а у поперечному напрямку – відштовхнуться [11, с. 29].

Деяке "протириччя" між вказаними двома частинами процесу визначення електромагнітної сили полягає у тому, що фізичне тлумачення напрямку дії сили ґрунтується на поясненні взаємодії пружних магнітних силових ліній, а розрахунок сили виконується за множиною формул, у які входить ряд взаємопов'язаних величин – магнітний потік, магнітна індукція, струм, напруженість магнітного поля.

2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

В електромагнітних системах електромагнітну силу звичайно розраховують не за виразом (1), а по ряду наведених нижче формул (перелічені не всі формули), зручних для використання на практиці:

$F_L = qvB \cdot \sin \alpha$ – сила Лоренца, яка діє на частинку із зарядом q , що рухається зі швидкістю v в однорідному магнітному полі з магнітною індукцією B (ми розглядаємо взаємодію заряду лише з магнітним полем), де $B = \mu_0 H$ – модуль магнітної індукції; μ_0 – абсолютна магнітна проникність вакууму; H – напруженість магнітного поля; v – модуль швидкості руху

частинки з позитивним зарядом q ; α – кут між векторами магнітної індукції та вектором швидкості руху частинки із зарядом q ;

$F_A = BL_{II}I \sin \alpha$ – сила Ампера, яка діє на провідник довжиною L_{II} зі струмом I в однорідному магнітному полі з магнітною індукцією B , де α – кут між векторами магнітної індукції та напрямком струму;

$F_{II} = \mu' L_{II} I_1 I_2 / (2\pi d)$ – сила взаємодії паралельних струмів (тут $\mu' = \mu \mu_0$ – абсолютна магнітна проникність середовища; μ – відносна магнітна проникність середовища; I_1, I_2 – струми провідників; d – відстань між провідниками);

$F_{EM} = 0,5 B_{II} H_{II} = 0,5 B_{II}^2 / \mu_0$ – формула Максвелла для визначення сили (сила магнітного тяжіння трубки потоку), що діє на одиницю феромагнітної поверхні з магнітною індукцією у повітряному проміжку B_{II} та напруженістю магнітного поля H_{II} [2, с. 13, 11, с. 97];

$T_{II} = \mu_0 (H_{II} \mathbf{H} - 0,5 n H_{II}^2)$ – тензор магнітного тяжіння трубок потоку, через який визначають електромагнітну силу, де \mathbf{H} – вектор напруженості магнітного поля; H_{II} – складова вектора \mathbf{H} у напрямку орта \mathbf{n} [7, с. 89];

$M_1 = c_M \Phi_{11} I$ – електромагнітний момент машини постійного струму (тут c_M – стала величина, Φ_{11} – робочий магнітний потік головних полюсів, I – струм якоря), що отримується на основі сили Ампера $F_A = BL_{II}I \sin \alpha$;

$M_E = 0,5 t M (i_\beta^s i_\alpha^r - i_\alpha^s i_\beta^r)$ – електромагнітний момент машини змінного струму, де t – кількість фаз; M – взаємна індуктивність; $i_\beta^s, i_\alpha^r, i_\alpha^s, i_\beta^r$ – проекції струмів обмоток статора s та ротора r по осях α та β [7, с. 91].

3. ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є розгляд на макроскопічному рівні особливостей застосування закону фізики (1) по визначенню сили в електротехнічних пристроях.

У фаховій літературі всі численні формули по розрахунку електромагнітної сили звичайно розглядаються розрізнено і не об'єднані єдиним тлумаченням – впливом на силу закону накопичення енергії магнітного поля згідно формули (1). Наприклад, у деяких сучасних фахових виданнях:

- "силу Ампера" $F_A = BL_{II}I \sin \alpha$, яка впливає із "сили Лоренца", зуть за традицією "законом Ампера" [1, с. 112; 2, с. 13; 4, с. 368-369; 6, с. 146; 7, с. 89; 11, с. 131; 12, с. 237];

- "силу взаємодії паралельних струмів" $F_{II} = \mu' L_{II} I_1 I_2 / (2\pi d)$ зуть "законом взаємодії струмів" [12, с. 238].

При цьому не згадуються випадки неможливості застосування формули "сили Ампера" F_A (а, отже, неможливості застосування пов'язаної з нею формули "сили Лоренца" F_L), а також "сили взаємодії паралельних струмів" F_{II} у електромагнітних системах з феромагнетиками. І це в той час, коли закон (1) діє завжди, а сили (F_A, F_L, F_{II}) прямо впливають із закону (1).

Можливість заміни в наведених формулах магнітної індукції на напруженість магнітного поля дезорієнтує не лише стосовно фізики явища, але й стосовно проектування електричних машин. Приклад для машини постійного струму: чи не можна замінити в відомій формулі електромагнітного моменту $M_I = c_M \Phi_{11} I$ струм якоря I на робочий магнітний потік реакції якоря Φ_{21} (який в усій фаховій літературі розглядається лише з точки зору негативного впливу на комутацію) та уточ-

нити розрахунок магнітної системи з метою збільшення моменту $M_2 = c_M \Phi_{11} \Phi_{21}$ та поліпшення показників використання електротехнічних матеріалів?

4. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

4.1. Загальне. Аналіз закону електромагнітної сили розглянемо на базі машин постійного струму, які є зручними та наочними пристроями.

Тому що деякі з наведених формул для розрахунку електромагнітної сили зветься "силами" чи "правилами", але до них також застосовується й назва "закони", то далі, щоб не підтримувати цю незручність у термінології, будемо вважати, що "закон" повинен виконуватись завжди і у будь-яких пристроях, а "сила" та "правило" у вигляді зручних формул для розрахунку електромагнітної сили можуть мати винятки при конкретному застосуванні і можуть у деяких випадках не підтверджуватись експериментами.

4.2. Розглядаємо закон електромагнітної сили для електромагнітної системи.

4.2.1. Розрахунок величини електромагнітної сили. При розрахунку сили електромагнітна система (вона складається з окремих елементів у вигляді котушок з незмінним струмом та феромагнітних тіл як з котушками зі струмом так і без котушок) знаходиться у незмінному "замороженому" стані, бо зміна положення елементів у просторі чи струмів у котушках може змінити величину та напрямок сили. Частка елементів системи є нерухомою (зветься індуктором), а інша частка є рухомою (зветься якорем). Теоретично в електромагнітній системі можуть бути кілька індукторів та кілька якорів. Але між одним конкретним рухомим якорем та всією іншою часткою системи створюється лише одне результуюче "заморожене" робоче магнітне поле, фізична природа виникнення якого не має значення.

Конкретні пристрої електромагнітної системи мають повітряний проміжок між індуктором і якорем і їх можна розділити на дві групи:

1. При постійній величині намагнічуючої сили лінійне переміщення якоря чи його обертання на деякий кут спрямоване на зміну величини еквівалентного повітряного проміжку, внаслідок чого змінюється робочий магнітний потік та накопичена електромагнітна енергія.

2. Обертання якоря відбувається при постійній величині повітряного проміжку і спрямоване на зміну результуючої намагнічуючої сили, внаслідок чого змінюється робочий магнітний потік та накопичена електромагнітна енергія. В подібній системі діє електромагнітний момент, а сили тяжіння між індуктором та якорем урівноважені симетричністю якоря.

В таких умовах фізичний закон по створенню сили (1) можна розглядати і у більш практичному та конкретному сенсі: "Електромагнітна сила чи електромагнітний момент дорівнює похідній по координаті від електромагнітної енергії результуючого робочого магнітного поля індуктора та якоря електромагнітної системи"

$$F = -(\partial W_{PM} / \partial g), \quad (2)$$

де W_{PM} – енергія результуючого робочого магнітного поля індуктора та якоря; g – координата.

З метою отримання чітких результатів аналізу ми будемо застосовувати умовний розділ єдиного магнітного поля електромагнітної системи на частки з використанням принципу суперпозиції по відношенню до магнітної індукції [6, с. 147].

Це є звичайною практикою у розрахунках електромагнітних систем, про яку далі не будемо згадувати. Будемо вважати, що у загальному випадку магнітні потоки індуктора $\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12}$ та якоря $\Phi_2 = \Phi_{21} + \Phi_{22}$ складаються з робочих магнітних потоків Φ_{11} та Φ_{21} (вони взаємодіють між собою і утворюють єдиний робочий магнітний потік Φ_{01}) та магнітних полів розсіяння Φ_{12} та Φ_{22} .

Також потрібно урахувати, що в реальній електромагнітній системі якір при зміні повітряного проміжку може мати механічні обмеження у переміщенні (реле, електромагніти), або якір з постійним повітряним проміжком та обертанням може мати примусову зміну струмів у котушках (електричні машини).

4.2.2. Напрямок дії електромагнітної сили. На додаток до введених Фарадеєм сил тяжіння пружних магнітних силових ліній у закон електромагнітної сили введемо наступне твердження, яке впливає з даних практики застосування електромагнітних систем: "При відсутності обмежень у русі та відсутності змін електричних струмів в котушках, кожний якір електромагнітної системи через тяжіння магнітних силових ліній переміщується у стан, який має максимальні значення робочого магнітного потоку і накопиченої енергії та рівну нулю рушійну електромагнітну силу".

При такому переміщенні якоря по координаті, яка є жорстким параметром для електротехнічних пристроїв, корисно виділити три стани електромагнітної системи:

1. Стан сталої рівноваги якоря, координати якого забезпечують максимальні значення робочого магнітного потоку і накопиченої енергії та рівну нулю електромагнітну силу, спрямовану у бік збереження стану при відхиленні сили від нульового значення.

2. Стан несталої рівноваги якоря, координати якого забезпечують мінімальні значення робочого магнітного потоку і накопиченої енергії та мінімальну електромагнітну силу, спрямовану у бік стану сталої рівноваги.

3. Стан максимальної сили якоря, координати якого знаходяться між координатами станів сталої та несталої рівноваги і забезпечують максимальне значення похідної по координаті від накопиченої енергії магнітного поля, тобто максимальну електромагнітну силу, яка спрямована у бік стану сталої рівноваги.

З наведеного огляду видно, що, крім формули (1), для всіх електромагнітних систем теоретично неможливо отримати єдину точну загальну формулу для розрахунку електромагнітної сили через використані дані (із-за відмін у величинах і напрямках електричних струмів в котушках; різниці у кількості, координатах, магнітних зв'язках та взаємному розміщенні елементів електромагнітної системи; відмін форми їх магнітопроводів та феромагнітних матеріалів).

Розглянуті три стани електромагнітної системи корисні тим, що вони допомагають у визначенні напрямку сили у випадках, коли введена Фарадеєм пружність магнітних силових ліній спостерігається нечітко.

Наприклад, компенсаційна обмотка компенсує н.с. реакції якоря машини постійного струму і виправляє несиметрію магнітних силових ліній у повітряному проміжку відносно зубця. За теорією пружності магнітних силових ліній це повинно звести електромагнітний момент до нуля, або принаймні його зменшити. Але у дійсності цього не відбувається, і розрахунок такої машини змінюється незначно. Пояснюється це тим, що в індукторі умовно виникають два магнітних поля:

- одне поле створюється обмоткою збудження (з ним і взаємодіє магнітне поле ротора у стані максимальної сили);

- взаємодія магнітного поля компенсаційної обмотки з магнітним полем обмотки ротора створює електромагнітний момент у стані несталої рівноваги, який із-за практично нульового значення не впливає на роботу машини.

Для ілюстрації створення статором двох умовних магнітних полів, автором був виконаний двигун постійного струму рис. 1, який має на статорі "компенсаційну" обмотку 1 (назва надана із-за конструктивної схожості), обмотку збудження 2 та безобмотковий явнополюсний ротор 3.

Ротор 3 намагнічується обмоткою збудження 2 і має магнітні полюси N та S. Робочий магнітний потік 4 показаний пунктирною лінією. Якщо б ротор 3 обертався, то він би автоматично змінював полярність, і ми б отримали двигун постійного струму без колектора.

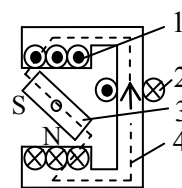


Рис. 1. "Двигун" постійного струму

Насправді ротор жорстко зупиняється у показаному на рис. 1 положенні, з якого видно, що статор створює два умовних магнітних поля – обмоткою збудження 2 та "компенсаційною" обмоткою 1. Зсув частки (50 %) явнополюсного ротора на 90° по відношенню до іншої частки ротора не змінює загальне становище: зменшується лише електромагнітна сила фіксації положення ротора.

У будь-якому положенні ротора 3 взаємодія його магнітного потоку з магнітними силовими лініями, викликаними струмами компенсаційної обмотки 1, є тотожною з взаємодією у звичайній машині постійного струму магнітного поля головних полюсів з магнітним полем, що створює обмотка ротора. Двигун не обертається і тому можна зробити висновок, що у даному випадку також не підтверджується явище пружності магнітних силових ліній у повітряному проміжку.

Але при розгляді взаємодії з ротором двох умовних магнітних потоків статора можна підтвердити вплив тяжіння магнітних силових ліній й для двигуна рис. 1:

- магнітне поле обмотки збудження статора створює стан сталої рівноваги з ротором у вертикальному положенні його полюсів;

- магнітне поле компенсаційної обмотки створює стан сталої рівноваги з ротором у горизонтальному положенні його полюсів.

Накладання цих двох станів із зустрічним спрямуванням сил, кожне з яких урахує тяжіння магнітних силових ліній, викликає положення ротора у стані сталої рівноваги, яке співпадає з результируючим магнітним полем.

4.3. Для закону електромагнітної сили (1) у деяких електромагнітних системах.

4.3.1. Сила Лоренца та Ампера як наслідок дії закону електромагнітної сили (1). Відомо, що рух навіть одиничного заряду у вакуумі створює магнітне поле (досліді фізика США Г. Роуанда, 1878), яке взаємодіє з магнітним полем індуктора. З цієї точки

зору електромагнітна сила Лоренца $F_L = qvB \cdot \sin\alpha$, яка діє на одиничний заряд, що переміщується у магнітному полі, є частним випадком електромагнітної сили Ампера $F_A = BL_{\Pi}I \cdot \sin\alpha$, що діє на провідник із переміщенням множини зарядів у магнітному полі.

Це підтверджується також виведенням формули Ампера з формули Лоренца [5, с.277] та навпаки [6, с.277]. Показаний на рис. 2 умовний контур з рухомих одиничним зарядом q збільшує свої розміри для створення максимального магнітного потоку та максимального накопичення енергії і рухається у напрямді дії сили F_L до виходу з магнітного поля індуктора, де електромагнітна сила "дорівнює нулю" і створюється стан сталої рівноваги.

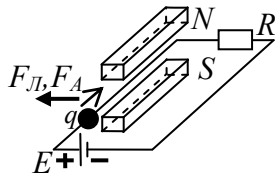


Рис. 2. Переміщення заряду у магнітному полі

Фізичною природою виникнення електромагнітної сили Ампера $F_A = BL_{\Pi}I$ є взаємодія магнітних потоків, а не взаємодія магнітної індукції зі струмом чи струму зі струмом (це не означає "заперечення" існуючих підтверджених практикою формул, а лише намагання наближення до фізики явища).

Вірне традиційне твердження, що сила Лоренца не виконує роботу, а лише змінює напрям руху зарядженої частинки [4, с. 373; 12, с. 241], на наш погляд, потребує більш детального пояснення, бо прямо суперечить другому закону Ньютона ("прискорення тіла в результаті дії на нього сили є пропорційним величині цієї сили та зворотно пропорційним масі тіла") та поняттю роботи (як добутку сили на переміщення по напрямку дії сили).

Насправді обидва ці закони діють при взаємодії магнітного поля із зарядженою частинкою, бо сила Лоренца спочатку виконує роботу по збільшенню накопиченої енергії магнітного поля, а потім споживає її при ідеальній пружності магнітних силових ліній. Тому робота дорівнює нулю.

Є неточним і твердження, наведене в літературі [4, с. 373]: "Оскільки сила Лоренца завжди напрямлена перпендикулярно до вектора швидкості частинки, яка летить, то вона не змінює модуля швидкості, а змінює тільки напрям руху". У дійсності, при входженні у рівномірне магнітне поле частинки із зарядом, виникає сила Лоренца, яка змінює напрям вектора швидкості частинки і збільшує його модуль порівняно з попереднім модулем вектора швидкості цієї частинки до входження у рівномірне магнітне поле. Тобто, можна сказати, що вектор швидкості до входження у рівномірне магнітне поле залишається незмінним як по модулю так і по напрямку у вигляді складової змінного по напрямку результуючого вектора швидкості у магнітному полі.

Дійсно, припустимо, що по умовному контуру $abcde$ (рис. 3) одиничний позитивний заряд q переміщується зі швидкістю v у рівномірному магнітному полі з індукцією B (її напрямок позначений знаком "+" у центрі кола радіусом R). Під дією сили Лоренца F_L заряд q починає обертатись по колу радіусом R . Замінімо рух заряду по колу рухом по квадрату $abfka$. Заряд q уявляємо у вигляді провідника невеликої до-

вжини dL зі "струмом", який залежить від швидкості переміщення заряду q вздовж прямої ab : в точці a "струм" дорівнює нулю, потім він зростає до середини відрізка ab і знову зменшується до нуля в точці b .

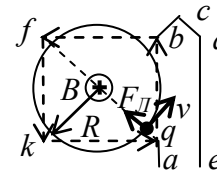


Рис. 3. Переміщення заряду у магнітному полі

Тобто при переміщенні від точки a до точки b вздовж прямої ab дія заряду q спочатку збільшує магнітне поле умовного контуру $abcde$ (електромагнітна сила має один знак), а потім зменшує його до початкової величини (електромагнітна сила змінює знак): робота виконується, але її підсумкове значення на прямій ab дорівнює нулю. Переміщення "провідника" по прямій bf не супроводжується зміною магнітного потоку контуру $abcde$.

Переміщення "провідника" зі "струмом" у зворотному напрямку по прямій fk супроводжується спочатку зменшенням магнітного потоку контуру $abcde$, а потім його збільшенням до початкової величини з рівним нулю підсумковим значенням виконаної роботи. Перехід заряду по прямій ka не супроводжується зміною магнітного потоку контуру $abcde$.

За визначений цикл переміщення по колу внаслідок рівності споживання та накопичення енергії "сила Лоренца не виконує роботу".

4.3.2. Пристрої, для яких сила Ампера відсутня (її, отже, сила Ампера не є законом, є правилом).

У пазах ротора звичайних машин постійного струму спостерігаються дуже малі значення магнітної індукції B , внаслідок чого для провідників зі струмом, розміщених в пазах, сила Ампера $F_A = BL_{\Pi}I$ приблизно дорівнює нулю [10, с. 212]. Це ставить також під сумнів фізичне тлумачення формули електромагнітного моменту машини постійного струму $M_1 = c_M \Phi_{11} I$, яка отримується на основі сили Ампера.

Аналогічні питання виникають й стосовно машин змінного струму, у яких провідники теж в основному розміщені у пазах.

Для уніполярного двигуна (рис. 4) в роботі [8] показано, що в експерименті є індукція B , є довжина провідника L_{Π} , є постійний струм I в ізольованій тороїдальній обмотці на статорі і немає лише одного – сили Ампера $F_A = BL_{\Pi}I = 0$, яка дорівнює нулю.

Пояснюється це тим, що переміщення ротору електромагнітної системи (рис. 4) не змінює результуючий робочий магнітний потік, тобто не змінює накопичену електромагнітну енергію згідно закону (1). Тому не створюються: ЕРС, електромагнітна потужність, електромагнітний момент, струм у режимі генератора.

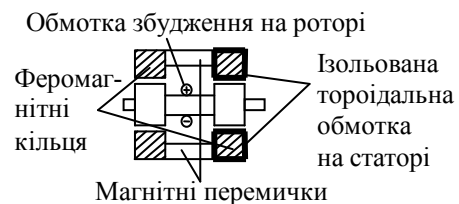


Рис. 4. Сила Ампера $F_A = BL_{\Pi}I$ не діє в уніполярному двигуні

Отже для двигуна на рис. 4 не діє й сила Лоренца, з якої впливає сила Ампера.

Тому сили Лоренца F_L , Ампера F_A , взаємодії паралельних струмів F_{Π} , силу магнітного тяжіння трубки потоку F_{EM} , формулу електромагнітного моменту машини постійного струму M_1 слід вважати частиними випадками відомого основного закону (1). Вони об'єднуються лише тим, що всі в конкретних умовах підкоряються закону (1).

Здавалося б, що все це не так вже й важливо, бо наведені формули для розрахунку сили є вірними у заданих умовах, експериментально підтвержені, можуть взаємно перетворюватись та традиційно використовуються у розрахунках.

Але якщо ці формули можуть "не працювати" в електричних машинах, то виникають питання: "чому закон Ампера F_A чи взаємодії паралельних струмів F_{Π} не завжди працює (і чому він зветься законом)?", "чому не завжди працює формула електромагнітного моменту для машин постійного струму $M_1 = c_M \Phi_{11} I$?"

У цьому відношенні є двозначними і підручники з електричних машин, у яких разом з використанням формули електромагнітного моменту машини постійного струму $M_1 = c_M \Phi_{11} I$ (без аналізу і протиставлення її навіть не наведеної в них формулі $M_2 = c_M \Phi_{11} \Phi_{21}$) стверджується:

1. По фізиці процесу: "Взаємодія магнітних полів індуктора та якоря лежить в основі фізичних принципів перетворення енергії в електричних машинах" [2, с. 56]. Але для реальних розрахунків пропонується формула $M_1 = c_M \Phi_{11} I$ [2, с. 148].

2. "Нерухомі відносно один одного поля ротора і статора створюють результуюче поле та електромагнітний момент" [7, с. 37]. Слово "поле" у даному випадку можна тлумачити і як "поле намагнічуючої сили", бо згідно [7, с. 37] "у природі не буває струмів без магнітних полів" та навпаки, а в [7] у ряді пояснень "поле" стабільно не зветь "магнітним", а електромагнітний момент відображується і через взаємодію магнітного поля зі струмом, і через взаємодію струмів, і через тензор тяжіння магнітних трубок потоку; також вказується, що електромагнітна сила визначається за законом Ампера [7, с. 89].

Безумовно, в формулі $M_1 = c_M \Phi_{11} I$, внаслідок функціональної залежності між робочим магнітним потоком реакції якоря Φ_{21} та струмом якоря I , можна не використовувати вираз $M_2 = c_M \Phi_{11} \Phi_{21}$, але при цьому, якщо залежність $M_2 = c_M \Phi_{11} \Phi_{21}$ все ж фізично існує, то при проектуванні електричних машин втрачається мета та вводиться невірна орієнтація, бо невідомо, що потрібно збільшувати для збільшення моменту: струм I , чи робочий магнітний потік якоря Φ_{21} ?

Відомо, що при проектуванні електричних машин постійного струму ураховують магнітний потік головних полюсів та лінійне навантаження, тобто ураховується струм якоря I , а не потік Φ_{21} [3].

Електричні машини постійного струму з явнополюсним або неявнополюсним статором чи з порожністим ротором мають ротор який (якщо не перемикає струми секцій колектором) проектується на роботу у стані максимальної сили. Ротор шляхом повернення на 90° (електричних) намагається зайняти положення, що створює максимальний магнітний потік та максимальну накопичену енергію при рівній нулю електромагнітній силі, що відповідає стану сталої рівноваги.

4.3.3. Взаємодія феромагнітного тіла з котушкою з постійним струмом та феромагнітним осердям (рис. 5).

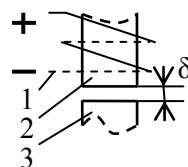


Рис. 5. Котушка індуктивності

Котушка 1 з постійним струмом $I = \text{const}$ та феромагнітним осердям 2 складає індуктор, а феромагнітне тіло 3 – яркір. Між осердям 2 та яркером 3 існує повітряний проміжок δ . Індуктивність котушки дорівнює $L_K = w_K^2 A$, де w_K – кількість її витків. Система проектується на роботу у ділянці стану максимальної сили при наявності обмежень у переміщенні.

При вмиканні струму котушки 1 яркір 3 переміщується і зменшує величину повітряного проміжку δ до нуля. Яркір 3 є поворотним і тому при $\delta = 0$ магнітна провідність системи A є максимальною. При зменшенні повітряного проміжку індуктивність котушки $L_K = w_K^2 A$ збільшується, що збільшує її накопичену електромагнітну енергію $W_1 = 0,5 L_K I^2$.

Якщо б не було механічної перепони у вигляді феромагнітного осердя 2, то яркір 3 продовжував би переміщення до середини котушки 1, бо у середньому положенні дотримуються всі вимоги закону електромагнітної сили у стані сталої рівноваги: створюються максимальний магнітний потік та отримується максимальна накопичена енергія, а електромагнітна сила дорівнює нулю.

4.4. Вимоги до конструкції машини постійного струму.

4.4.1. Модель машини постійного струму. Для отримання вимог до "оптимальної" конструкції машини постійного струму (під цю модель підпадають і деякі машини змінного струму), розглянемо фізичну модель індуктивного електромеханічного перетворювача як ідеалізовану індуктивність (рис. 6) з рівномірним повітряним проміжком між статором та ротором. Загальна кількість послідовно з'єднаних витків дорівнює $w_0 = w_1 + w_2 = \text{const}$ (тут w_1 – витки обмотки статора; $w_2 = w_1$ – витки обмотки ротора), по яких протікає постійний струм $I = \text{const}$.

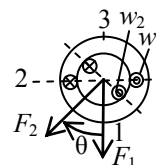


Рис. 6. Модель машини постійного струму

По осях концентрованих обмоток з повним кроком статора w_1 та ротора w_2 створюються намагнічуючі сили $F_1 = w_1 I$ та $F_2 = w_2 I = w_1 I$. Намагнічуюча сила F_2 при обертанні ротора на деякий кут $\theta = 0 \dots 180^\circ$ може займати положення 1, 2, 3: в положенні 1 результуюче поточкозчеплення максимальне, а в положенні 3 – теоретично дорівнює нулю. Потоки розсіяння не розглядаються.

З рис. 6 випливає, що якщо кількість витків однієї з обмоток (w_1 чи w_2) дорівнює нулю, то електромагнітна енергія, що накопичується в машині, не залежить від положення якоря, і тому похідна по куту повороту якоря від цієї енергії дорівнює нулю: тобто, електромагнітний момент дорівнює нулю при будь-якому куті θ . Можна вважати, що при поступовому зменшенні значення w_2 до нуля, все більша частка енергії, накопиченої в індуктивності машини, використовується неефективно, бо не приймає участі у створенні електромагнітного моменту.

Тому що обмотки індуктора w_1 та якоря w_2 є рівнозначними (якір можна розглядати як індуктор та навпаки), то з урахуванням ідентичності конструкції індуктора та якоря (див. рис. 6) можна вважати, що відхилення від рівності $w_2=w_1$ у цілому погіршує роботу машини. А тому що їх н.с. є однаковими, то для їх робочого магнітного потоку підсумковий магнітний опір індуктора повинен дорівнювати підсумковому магнітному опору якоря.

Тому що по обох обмотках протікає постійний струм $I = \text{const}$, це явище можна моделювати зміною кількості еквівалентних витків w_E , що отримуються з рівняння результуючої намагнічуючої сили $F_E = w_E I$. Результуюча н.с. обмоток індуктора та якоря з однаковим струмом дорівнює $F_E^2 = w_E^2 I^2 = F_2^2 \sin^2 \theta + (F_1 + F_2 \cos \theta)^2 = F_1^2 + F_2^2 + 2F_1 F_2 \cos \theta$, звідки при $I = \text{const}$ отримуємо вираз

$$F_E = I \sqrt{w_1^2 + w_2^2 + 2w_1 w_2 \cos \theta} = w_E I,$$

де $w_E = \sqrt{w_1^2 + w_2^2 + 2w_1 w_2 \cos \theta}$.

Тоді еквівалентна індуктивність котушки дорівнює $L_E = w_E^2 L$, де $L = \text{const}$ – магнітна провідність.

При нехтуванні насиченням магнітної системи електромагнітна енергія магнітного поля котушки дорівнює

$$W_2 = \frac{L_E I^2}{2} = \frac{1}{2} \Lambda I^2 (w_1^2 + w_2^2 + 2w_1 w_2 \cos \theta).$$

Енергія, отримана від електричної машини, дорівнює

$$W_3 = P_E t = M_E \omega t = M_E \theta,$$

де P_E – електромагнітна потужність; t – час; M_E – електромагнітний момент; ω – циклічна частота обертання; $\theta = \omega t$ – кут обернення.

Електромагнітний момент машини є пропорційним похідній від електромагнітної енергії по координаті θ

$$M_E = -\frac{dW_3}{d\theta} = -\frac{dW_2}{d\theta} = -w_1 w_2 \Lambda I^2 \sin \theta.$$

Добуток $k = w_{10} w_{20}$ при зміні числа витків (w_{10} , w_{20}) при умові $w_0 = w_{10} + w_{20} = \text{const}$ стає максимальним, коли похідна

$$\frac{dk}{dw_{20}} = \frac{d[(w_0 - w_{20})w_{20}]}{dw_{20}} = w_0 - 2w_{20} = 0,$$

звідки визначаємо оптимальну кількість витків $w_{20} = 0,5w_0$; $w_{10} = w_0 - w_{20} = 0,5w_0$.

Таким чином, максимально можливий момент дорівнює

$$M_{Em} = -w_{10} w_{20} \Lambda I^2 \sin \theta = 0,25 w_0^2 \Lambda I^2 \sin \theta.$$

"Оптимальна" по моменту модель машини постійного струму (при $\theta = 90^\circ$, без розгляду комутації та потоків розсіяння) має такі особливості:

1. Повітряний проміжок між статором та ротором є рівномірним та мінімальним (для збільшення магнітної провідності системи Λ).

2. Обмотки статора w_1 та ротора w_2 є концентрованими з повним кроком, зсунуті на кут 90° (електричних), мають однакову кількість витків ($w_1 = w_2$) та однакову н.с.

3. У номінальному режимі еквівалентні робочі магнітні потоки обмоток статора w_1 і ротора w_2 та відповідні підсумкові магнітні опори є однаковими.

4. Якщо будь-яка з н.с. (F_1 чи F_2) дорівнюватиме нулю, то електромагнітний момент теж дорівнює нулю, бо електромагнітна енергія не змінюється при зміні кута θ .

Визначені особливості належать неявнополюсній машині постійного струму, описаній у роботі [9], яка має ліпші показники по використанню міді. Тому при проектуванні машин постійного струму з явнополюсним статором слід конструктивно наблизитись до цієї машини і намагатись отримати максимальне значення добутку робочих магнітних потоків головних полюсів та реакції якоря аналогічно показникам "ідеальної" конструкції [9]. Твердження у фаховій літературі лише про негативний вплив реакції якоря на комутацію є односторонніми.

4.4.2. Доведення необхідності урахування взаємодії магнітних потоків індуктора та якоря.

Розглянемо питання розрахунку величини сили на прикладі взаємодії двох паралельних провідників зі струмом. Згідно фізичних уявлень вектор магнітної індукції B є силовою характеристикою магнітного поля, яка служить для визначення сили Лоренца, що діє на заряджену частку, яка рухається у магнітному полі.

Силу Лоренца можна застосувати для визначення сили взаємодії двох паралельних провідників зі струмом $F_{II} = \mu' L_{II} I_1 I_2 / (2\pi d)$ (один вважаємо індуктором, другий – якорем) і представити її у вигляді рівноцінних для вакууму формул: $F_{II1} = k_1 I_1 I_2$, $F_{II2} = k_2 B_1 I_2$, $F_{II3} = k_3 I_1 B_2$, $F_{II4} = k_4 B_1 B_2$, де k_1, k_2, k_3, k_4 – постійні коефіцієнти; B_1 – індукція, яка створюється струмом I_1 у місці розташування провідника зі струмом I_2 ; B_2 – індукція, яка створюється струмом I_2 у місці розташування провідника зі струмом I_1 . Всі ці формули є вірними з точки зору їх математичного обґрунтування і дають тотожні результати для вакууму ($F_{II1} = F_{II2} = F_{II3} = F_{II4}$). Експериментами доведено, що навіть розміщення феромагнітного листа між паралельними провідниками не впливає на діючу силу.

Але разом з тим при наявності феромагнітного магнітопроводу спостерігається нерівність $k_1 I_1 I_2 \neq k_4 B_1 B_2$ внаслідок нелінійної залежності між намагнічуючою силою та магнітною індукцією.

Взаємодія між двома паралельними провідниками зі струмом при наявності феромагнітного магнітопроводу згідно рис. 7 докорінно змінюється у порівнянні з їх взаємодією у вакуумі:

- сила діє не на провідники, а на феромагнетики;
- відстань між електричними провідниками замінюється відстанню між феромагнетиками. Це – революційна особливість феромагнетиків, яку неможливо досягнути для звичайних провідників. Вірність цього твердження збільшується із зростанням магнітної проникності феромагнетиків: коли вона дорівнює нескінченності, то пази з провідниками можна замінити розташованими на поверхні феромагнетиків двома нескінченно тонкими стрічками – провідниками з відстанню між ними, рівною повітряному проміжку;
- сила залежить від величини єдиного загального робочого магнітного потоку між феромагнетиками, який (при однакових значеннях струмів) змінюється у залежності від матеріалу феромагнетиків, розмірів і форми магнітопроводу та величини повітряного проміжку;
- сила, яка стягує феромагнетики 3, не зменшується до нуля, якщо струм одного з провідників дорівнюватиме нулю;

- відстань між розміщеними в пазах провідниками 1 та 2 практично не впливає на силу їх взаємодії;
- магнітне поле в пазах приблизно дорівнює нулю;
- для рис. 7 існує нелінійна залежність між намагнічуючою силою (струмом) та магнітною індукцією (чи силою).

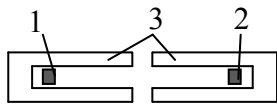


Рис. 7. Взаємодія двох провідників при наявності феромагнітного магнітопроводу

Деякі з вказаних особливостей є вірними і для магнітопроводів ЕМ, що впливає на їх електромагнітний момент.

Сили які виникають в електромагнітній системі, пов'язані лише з магнітними потоками, бо лише вони накопичують енергію, зміна якої супроводжується виникненням сили по координаті.

Для звичайних машин постійного струму В.Ф. Миткевич, посилаючись на дані дослідників, писав, що "...магнітна індукція в місці розташування провідників в пазах якоря може бути в сотні разів меншою у порівнянні з ротором без зубців". Але якщо електромагнітна сила, що прикладена до провідників, є дуже малою, то як виникає нормальний обертовий момент? "Пояснення цьому полягає у несиметрії магнітного поля відносно зубця, у тяжінні магнітних силових ліній". І далі: "...зусилля електромагнітного походження у значній мірі перекладаються з провідників на залізні зубці" [10, с. 212]. Тут явно роль струму якоря у створенні "сили" замінено на взаємодію умовних робочих магнітних потоків – індуктора Φ_{11} та якоря Φ_{21} . Хоча у даному випадку розглянута лише фізична модель створення сили, але її одночасно можна вважати прямою вказівкою на необхідність дослідження впливу величини магнітного потоку якоря на електромагнітний момент. Але в усіх фахових виданнях цього "не помічають" і використовують відому формулу $M_1 = c_M \Phi_{11} I$.

4.4.3. Особливості двигуна постійного струму з введеними феромагнетиками по геометричній нейтралі.

З метою порівняння формул $M_1 = c_M \Phi_{11} I$ та $M_2 = c_M \Phi_{11} \Phi_{21}$ та дослідження можливості удосконалення машини постійного струму з явнополюсним статорм автор виконав наступний експеримент. У двигуна постійного струму рис. 8 були відрізані кінці полюсних башмаків 1 головних полюсів N та S, що дало змогу при введенні по геометричній нейтралі двох феромагнітних мас 2: зменшити вплив на роботу машини зміни потоків розсіяння головних полюсів N та S; збільшити феромагнітні маси 2 для збільшення зміни магнітного потоку реакції якоря при їх введенні та вилученні; обмежити вплив на величину електромагнітного моменту зубців ротора та положення ротора у просторі. Електромагнітний момент вимірювався при введених феромагнітних масах та без них. Комутація не розглядалась.

Введенні феромагнітні маси 2:

1. Імітують магнітопроводи додаткових полюсів.
2. Збільшують потоки розсіяння головних полюсів N та S.
3. Збільшують магнітний потік реакції якоря.
4. По відношенню до обмотки якоря створюють "явнополюсний статор".

Проведений експеримент показав, що введення

та виведення феромагнітних мас 2 практично не впливає на електромагнітний момент: різниця між моментами склала 1,6 %, що можна віднести до похибок вимірювання. (експериментальна величина моменту в умовних одиницях: $M_1=252$ (без феромагнетиків 2); $M_2=248$ (з феромагнетиками 2).

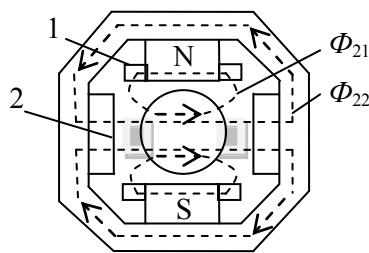


Рис. 8. Явнополюсний двигун постійного струму з введенням та виведенням феромагнетиків по геометричній нейтралі

Отримано, на перший погляд, парадоксальний результат: частка ортогонального (по відношенню до магнітного поля головних полюсів) магнітного потоку якоря не взаємодіє з робочим магнітним потоком головних полюсів і замикається по станині машини, тобто є поток розсіяння реакції якоря. Робочий магнітний потік Φ_{21} та потік розсіяння Φ_{22} , створені обмоткою якоря, показаний на рис. 8 штриховими лініями. Якщо зменшити до нуля розміри головних полюсів, то магнітне поле реакції якоря цілком перетвориться на поле розсіяння.

Вказаний парадокс легко пояснюється, якщо окремо розглянути дію двох магнітних потоків якоря (Φ_{21} та Φ_{22}). Магнітний потік розсіяння якоря Φ_{22} сумісно з феромагнітними масами 2 статора створює стан сталості рівноваги, при якому відповідний електромагнітний момент дорівнює нулю і не впливає на роботу машини.

Електромагнітний момент машини створюється робочим магнітним потоком головних полюсів Φ_{11} сумісно з робочим магнітним потоком якоря Φ_{21} , який замикається через башмаки головних полюсів. Не магнітний потік Φ_{11} та струм I згідно формули $M_1 = c_M \Phi_{11} I$, а саме робочі потоки Φ_{11} та Φ_{21} створюють результуючий робочий магнітний потік машини, в якому запасасться електромагнітна енергія.

Дійсно, аналогічно взаємодії двох провідників рис. 7, електричний струм у пазах може бути малим, але за рахунок збільшення габаритів магнітної системи магнітний потік, створений струмом якоря, можна збільшити у багато разів і таким чином можна збільшити електромагнітний момент.

Тому при проектуванні машин постійного струму слід керуватись формулою для розрахунку електромагнітного потоку $M_2 = c_M \Phi_{11} \Phi_{21}$.

Отже при проектуванні явнополюсних машин постійного струму слід урахувати, що збільшення величини полюсного перекриття та вилучення з геометричної нейтралі феромагнітних мас у вигляді додаткових полюсів зменшує потік розсіяння якоря, збільшує електромагнітний момент і тим самим поліпшує використання електротехнічних матеріалів.

Основну увагу належить приділити збільшенню робочого магнітного потоку Φ_{21} , створеного обмоткою якоря, який заходить у полюсні башмаки головних полюсів.

Це вказує на те, що при проектуванні електричних машин постійного струму з явнополюсним статорм потрібно розглянути можливість максимального наближення до умов роботи машини постійного струму з

неявнополюсным статором [9]: збільшення коефіцієнта полюсного перекриття, збільшення перерізу полюсних башмаків, зменшення повітряного проміжку.

При номінальному навантаженні величина магнітного поля, створеного обмоткою якоря, повинна дорівнювати величині робочого магнітного поля головних полюсів.

ВИСНОВКИ

1. Фізичний закон не може мати винятків. Тому сили Лоренца F_L , Ампера F_A , взаємодії паралельних струмів F_{\parallel} , силу магнітного тяжіння трубки потоку F_{EM} , формулу електромагнітного моменту машини постійного струму M_1 слід вважати частними випадками відомого основного закону створення електромагнітної сили (1). Вони об'єднуються лише тим, що всі в конкретних умовах підкоряються закону (1). Поняття "правила" нагадує, що воно може мати відхилення у застосуванні.

2. Вірне традиційне твердження, що "сила Лоренца не виконує роботу, а лише змінює напрям руху зарядженої частинки" потребує більш детального пояснення, бо прямо суперечить другому закону Ньютона та поняттю роботи.

3. Отримати, крім виразу (1), точну загальну формулу по розрахунку електромагнітної сили для всіх електромагнітних систем теоретично неможливо із-за відмін у величинах і напрямках електричних струмів в котушках; різниці у кількості, координатах, магнітних зв'язках та взаємному розміщенні елементів електромагнітних системи; відмін форми їх магнітопроводів та ферромагнітних матеріалів.

4. Будь-який конкретний пристрій має у номінальному режимі одне загальне для індуктора та якоря результуюче робоче магнітне поле. Тому фізичний закон по створенню електромагнітної сили (1) можна також розглядати у формулюванні: "Електромагнітна сила чи електромагнітний момент дорівнює похідній по координаті від електромагнітної енергії результуючого робочого магнітного поля індуктора та якоря електромеханічної системи".

5. У закон електромагнітної сили можна ввести додаткове твердження стосовно напрямку її дії: "При відсутності обмежень у русі та відсутності змін електричних струмів в котушках, рухомі частки електромагнітної системи через тяжіння магнітних силових ліній переміщуються у стан, який має максимальні значення робочого магнітного потоку та накопиченої енергії і рівну нулю рушійну електромагнітну силу" з урахуванням відповідних станів рівноваги та максимальної сили якоря.

6. Магнітний потік, що створюється обмоткою якоря і не заходить у полюсні башмаки головних полюсів, є потоком розсіяння. Таким чином, не всяке ортогональне магнітне поле по відношенню до магнітного поля головних полюсів створює корисний електромагнітний момент.

7. У електричних машин постійного струму з явнополюсным статором треба намагатись наближувати конструкцію до неявнополюсної машини [9] (з розглядом впливу полюсних наконечників, розмірів додаткових полюсів, коефіцієнта полюсного перекриття головних полюсів).

8. При проектуванні машин постійного струму слід керуватись формулою для розрахунку електромагнітного моменту $M_2 = c_M \Phi_{11} \Phi_{21}$, а не формулою $M_1 = c_M \Phi_{11} I$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Будішев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
3. Гольдберг О.Д., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2006. – 430 с.
4. Дмитрієва В.Ф. Фізика. – Київ: Техніка, 2008. – 646 с.
5. Евграфова Н.Н., Каган В.Л. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1987. – 487 с.
6. Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романішин Б.М. та ін. Курс фізики. – Львів: Вид-во Бескид Біт, 2002. – 376 с.
7. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Высш. шк., 2006. – 607 с.
8. Кутковецкий В.Я., Иванов В.К. Силы, действующий на проводник с током и ферромагнитные тела в магнитном поле // Электричество. – 1992. – №7. – С. 55-57.
9. Лушчик В.Д., Варванський А.Ю. Еволюція удосконалення машин постійного струму та перспективи їх подальшого розвитку // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №5. – С. 29-32.
10. Миткевич В.Ф. Магнитный поток и его преобразования. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1946. – 258 с.
11. Основы теории электрических аппаратов / И.С. Таев, Б.К. Буль, А.Г. Годжелло и др. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.
12. Чолпан П.П. Фізика. – Київ: Вища школа, 2004. – 567 с.

REFERENCES: 1. Budishchev M.S. *Elektrotehnika, elektronika ta mikroprotsesorna tekhnika*. Lviv: Afisha Publ., 2001. 424 p. 2. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory*. St.Petersburg, Piter Publ., 2008. 320 p. 3. Gol'dberg O.D., Sviridenko I.S. *Proektirovanie elektricheskikh mashin*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 430 p. 4. Dmitrieva V.F. *Fizyka*. Kyiv: Tekhnika Publ., 2008. 646 p. 5. Evgrafova N.N., Kagan V.L. *Kurs fiziki*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 487 p. 6. Zachek I.R., Kravchuk I.M., Romanishyn B.M. and others. *Kurs fizyky*. Lviv, Beskyd Bit Publ., 2002. 376 p. 7. Kopylov I.P. *Elektricheskie mashiny*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 607 p. 8. Kutkovetsky V.J., Ivanov V.K. Sily, dejstvujushhij na provodnik s tokom i ferromagnitnye tela v magnitnom pole. *Elektrichestvo*, 1992 no.7, pp. 55-57. 9. Lushchik V.D., Varvansky A.Yu. Evolution of DC machines improvement and prospect of their further development. *Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no.5, pp. 29-32. 10. Mitkevich V.F. *Magnitnyj potok i ego preobrazovaniya*. Moscow-Leningrad, Academy of Sci. of USSR Publ., 1946. 258 p. 11. Taev I.S., Bul' B.K., Godzhello A.G. and others. *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 352 p. 12. Cholpan P.P. *Fizyka*. Kyiv, Vyshcha shkola Publ., 2004. 567 p.

Надійшла (received) 25.10.2013

Кутковецкий Валентин Якович, д.т.н., проф.,
Чорноморський державний університет ім. Петра Могили,
кафедра інформаційних технологій та програмних систем,
54003, Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10,
тел/phone +38 0512 366578, e-mail: kb@kma.mk.ua

V.J. Kutkovetsky
Petro Mohyla Black Sea State University
10, 68-Desantnykiv Street, Mykolaiv, 54003, Ukraine

The law of electromagnetic force.

Calculation peculiarities for Lorentz force, Ampere force, interaction of parallel electric currents, and the moment of electrical machines are analyzed. They have exceptions on application, and they are the rules which result from the law of electromagnetic force as coordinate derivative of the operating magnetic flow. An addition to the direction of electromagnetic force action is proposed. Standards of salient-pole electrical machine designing are considered.

Key words – law of electromagnetic force, Lorentz, Ampere, moment of electrical machines.