

УДК 621.313

УТОЧНЕННЯ РІВНЯННЯ МОМЕНТІВ ОБЕРТОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПРИСТРОЇВ НАВИГАЦІЇ

О. В. Шефер, Д. М. Нелюба

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
просп. Першотравневий, 24, м. Полтава, 36011, Україна. E-mail: k45pntu@ukr.net

З метою усунення суперечливості ряду вимог Державних стандартів України, що стосуються обертових електричних машин, теоретично обґрунтовано неправильність поданого в них запису рівняння моментів і його трактування. Для цього розглянуто втрати в обертовій електричній машині на прикладі машини постійного струму. Використовуючи теоретичні розрахунки проаналізовано та доведено, що втрати потужності у обертовій електричній машині визначаються сумою електричних та магнітних втрат. При цьому встановлено, що ця сума втрат більша, ніж механічні втрати. Проведено порівняння отриманих результатів на основі машини постійного струму із асинхронними та синхронними машинами. Відзначено необхідність врахування електричних і магнітних втрат при аналізі роботи електричних мікромашин пристроїв навігації. На основі проведеного аналізу запропоновано коректний запис рівняння моментів обертових електричних машин та обґрунтовано правильне тлумачення моменту перебіжного ходу електричної машини.

Ключові слова: обертові електричні машини, рівняння моментів, момент механічних втрат, момент перебіжного ходу, неробочий хід.

УТОЧНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ МОМЕНТОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН УСТРОЙСТВ НАВИГАЦИИ

А. В. Шефер, Д. Н. Нелюба

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка
просп. Первомайский, 24, г. Полтава, 36011, Украина. E-mail: k45pntu@ukr.net

С целью устранения противоречивости ряда требований Государственных стандартов Украины, касающихся вращающихся электрических машин, теоретически обосновано неправильность представленной в них записи уравнения моментов и его трактовки. Для этого рассмотрены потери во вращающейся электрической машине на примере машины постоянного тока. Используя теоретические расчеты проанализировано и доказано, что потери мощности в вращающейся электрической машине определяются суммой электрических и магнитных потерь. При этом установлено, что эта сумма потерь больше, чем механические потери. Проведено сравнение полученных результатов на основе машины постоянного тока с асинхронными и синхронными машинами. Отмечена необходимость учета электрических и магнитных потерь при анализе работы электрических микромашин устройств навигации. На основе проведенного анализа предложена корректная запись уравнения моментов вращающихся электрических машин и обосновано правильное толкование момента мимолетного хода электрической машины.

Ключевые слова: вращающиеся электрические машины, уравнение моментов, момент механических потерь, момент мимолетного хода, на холостом ходу.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. У діючих стандартах України по обертовим електричним машинам у рівнянні моментів використано поняття моменту механічних втрат ротора. Шляхом теоретичних розрахунків обчислені втрати у якорі двигуна постійного струму і показано, що сума електричних і магнітних втрат у якорі більша, ніж механічні втрати. Запропоновано коректний запас рівняння моментів обертових електричних машин та тлумачення моменту перебіжного ходу.

У навчальному процесі вищих навчальних закладів стосовно дисципліни «Електричні машини» на сьогоднішній день створилась досить дивна ситуація. У 1994–1999 р.р. в Україні введені в дію ряд Державних стандартів, що стосуються обертових електричних машин:

– ДСТУ 2886-93. Машини електричні обертові. Терміни та визначення.

– ДСТУ 2818-94. (ГОСТ-30149-95). Машини електричні обертові. Позначення літерні та одиниці виміру.

– ДСТУ 3827-98. Обертові електричні машини. Характеристики машин. Терміни та визначення.

– ДСТУ 3788-98. Обертові електричні машини. Елементи конструкції, магнітні та електричні. Терміни та визначення.

– ДСТУ 3804-98. Обертові електричні машини. Системи охолодження, види захисту від зовнішнього середовища, випробування та експлуатація. Терміни та визначення.

Не дивлячись на те, що їх вимоги є обов'язковими для використання в навчальній літературі, ні один навчальний посібник чи підручник «Електричні машини» надрукований після 1999 р. з грифом Міністерства освіти і науки України не відповідає їх вимогам [1]. Однією з причин такої парадоксальної ситуації є те, що деякі вимоги цих державних стандартів суперечать один одному. Не вдаючись до аналізу причин такого стану відмітимо, що давно назріла необхідність у використанні вимог стандартів з однієї сторони, а з іншої – випуск ВНЗ навчальної літератури, що відповідає вимогам наявних, навіть недосконалих стандартів. Деякі спроби в цьому напрямку вже зроблені, наприклад, в НТУ «ХПІ» кафедрою «Електричні машини» випущений стандарт ВНЗ, а в Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка

випущений навчальний посібник [2], в яких зроблені спроби узгодити існуючі протиріччя.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування не-правильності запису рівняння моментів обертової електричної машини і його трактування, поданих у державному стандарті та у роботі [2] і пропозиція правильного запису і трактування рівняння.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ. У МПС мають місце електричні, магнітні й механічні втрати (це основні втрати), а також додаткові втрати [3–10].

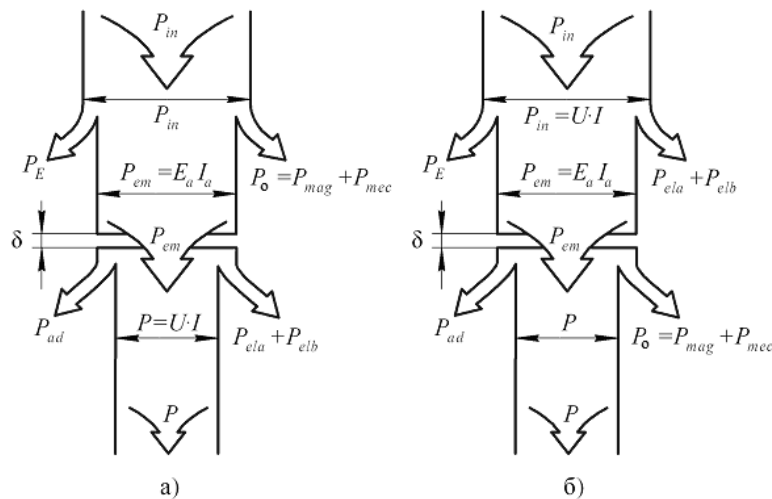


Рисунок 1 – Енергетична діаграма МПС: а) для генератора; б) для двигуна

послідовна обмотка збудження ОЗ_с:

$$P_E = U_{Es} I_{Es} = I_{Es}^2 R_{Es}; \quad (2)$$

– втрати потужності в колі якоря

$$P_{ela} = I_a^2 \sum R, \quad (3)$$

де $\sum R$ – сумарний опір усіх обмоток, під’єднаних у коло якоря, приведених до робочої температури θ_w

$$\sum R = \sum R_{20} [1 + \alpha(\theta_w - 20^0)], \quad (4)$$

де R_{20} – опір обмоток при кімнатній температурі; α – температурний коефіцієнт дроту обмоток;

– електричні втрати потужності в щітках

$$P_{elb} = \Delta U_b I_a, \quad (5)$$

де ΔU_b – перехідне падіння напруги на пару щіток, що залежить від типу щіток.

Падіння напруги в щітках у довідниках подається на пару щіток і знаходиться в межах 0,5...3,2 В. Оскільки щітки являють собою складну композицію з коксу, вугілля, графіту та домішок металу, яка запікається при $\theta \approx 2000^\circ C$, то опір щіток є нелінійним і не підпорядковується закону Ома. Для щіток прийнято вважати $\Delta U_b = const$ при довільному струмові. Тому $P_{elb} = \Delta U_b I_a$, тоді як для втрат на активних опорах $\sum R$

$$P_{ela} = I_a^2 \sum R. \quad (6)$$

Основні електричні втрати залежать від електричного режиму (струму якоря I_a), і тому вони називаються змінними.

Основні магнітні втрати потужності в МПС мають місце в наконечниках головних полюсів та в

Процес перетворення енергії в МПС зручно ілюструвати енергетичною діаграмою (рис. 1).

Основні електричні втрати в МПС зумовлюються опорами обмоток і щіткового контакту. Розрізняють такі електричні втрати потужності:

- втрати потужності в обмотці збудження:
- паралельна обмотка збудження ОЗ_р:

$$P_E = U_E \cdot I_E = I_{Ep}^2 (R_{Ep} + R_E), \quad (1)$$

якорі. В загальному випадку основні втрати потужності в сталі дорівнюють:

$$P_{mag} = \left[p_{h1,0/50} \frac{f}{50} B^2 + p_{F1,0/50} \left(\frac{f}{50} \right)^2 B^2 \right] m_{Fe}, \quad (7)$$

де $p_{h1,0/50}$ – питомі втрати потужності від гістерезису при $B = 1$ Тл і $f = 50$ Гц, Вт/кг; $p_{F1,0/50}$ – питомі втрати потужності від вихрових струмів при $B = 1$ Тл та $f = 50$ Гц, Вт/кг; m_{Fe} – маса сталі, кг.

Для зменшення магнітних втрат осердя якоря та наконечники головних полюсів виконують шихтованим. Величину питомих втрат потужності наводять у підручниках із проектування.

Механічні втрати потужності P_{mec} складаються з

$$P_{mec} = P_{mecs} + P_{mecp} + P_v; \quad (8)$$

– втрат потужності на тертя щіток об колектор:

$$P_{mecs} = K_{mec} S_b T_b v_c, \quad (9)$$

де K_{mec} – коефіцієнт тертя щіток; S_b – площа доторкання щіток із колектором; T_b – питомий тиск щіток на колектор, Н/м²; v_c – колова швидкість колектора;

– P_{mecp} – втрати потужності на тертя в підшипниках;

– P_v – втрати потужності на вентиляцію.

Звичайно сума основних магнітних та механічних втрат потужності становить утрати неробочого ходу й позначається P_o :

$$P_o = P_{mag} + P_{mec} \quad (10)$$

Сума основних магнітних і механічних втрат потужності не залежить від навантаження й тому може знаходитись експериментально у досліді НХ. У досліді НХ вимірюється струм НХ I_o і тоді можна скласти рівняння втрат потужності у режимі НХ

$$U \cdot I_o = P_{elao} + P_E + P_{elb} + P_{mag} + P_{mec} = I_o^2 \sum R_a + U \cdot I_E + \Delta U_b \cdot I_o + P_{mag} + P_{mec} \quad (11)$$

У Державному стандарті та у роботі [2] рівняння моментів обертових електричних машин записано у такому вигляді.

$$M_{em} = J \frac{d\Omega_m}{dt} + M_d + M_l, \quad (12)$$

де M_{em} – електромагнітний момент;

J – момент інерції вала машини;

Ω_m – механічна кутова швидкість;

M_d – момент механічних втрат ротора;

M_l – момент навантаження.

Момент втрат трактується як механічний момент, що обумовлюється тільки механічними втратами у роторі.

Розглянемо детальніше втрати потужності у якорі двигуна постійного струму серії 2П із ступенем захисту IP22 і способом охолодження IC1001, номінальною потужністю $P_N = 75$ кВт, номінальною частотою обертання $n_N = 1500$ об/хв, напругою $U_N = 220$ В, збудження паралельне, клас нагрівостійкості ізоляції F. Втрати потужності у двигуні, які не залежать від режиму навантаження складаються [2, 5, 11] з:

– втрат потужності на тертя щіток об колектор

$$R_{mec c} = 0,5 \cdot S_b \cdot v_c = 0,5 \cdot 8000 \cdot 14,1 \cdot 10^{-3} = 56 \text{ Вт}, \quad (13)$$

де $S_b = 8000 \text{ мм}^2$ – загальна площа щіток;

$v_c = 14,1 \text{ м/с}$ – колова швидкість колектора;

– магнітних втрат потужності в сталі зубців якоря

$$P_{magt} = 2,3 \cdot p_{1,0/50} \left(\frac{f_a}{50} \right)^{1,3} B_{tr1}^2 \cdot m_t = 2,3 \cdot 1,6 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} \cdot 1,5^2 \cdot 37,1 = 307 \text{ Вт}, \quad (14)$$

де $p_{1,0/50} = 1,6 \text{ Вт/кг}$ питомі магнітні втрати потужності в сталі 2411 при частоті перемагнічування 50 Гц і магнітної індукції 1,0 Тл;

$f_a = 50 \text{ Гц}$ – частота перемагнічування осердя якоря;

$B_{tr1} = 1,5 \text{ Тл}$ – магнітна індукція в середньому перерізі зубця;

$m_t = 37,1 \text{ кг}$ – маса зубців;

– магнітних втрат потужності в ярмі якоря

$$P_{mag y} = 2,3 \cdot p_{1,0/50} \left(\frac{f_a}{50} \right)^{1,3} B_{yr1}^2 \cdot m_{Fey} = 2,3 \cdot 1,6 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} \cdot 0,9^2 \cdot 30,9 = 92 \text{ Вт}, \quad (15)$$

де $p_{1,0/50} = 1,6 \text{ Вт/кг}$; $f_a = 50 \text{ Гц}$;

$B_{yr1} = 0,9 \text{ Тл}$ – магнітна індукція у ярмі якоря;

$m_{Fey} = 30,9 \text{ кг}$ – маса ярма якоря;

– електричних втрат в обмотці головних полюсів

$$P_E = I_{EN}^2 \cdot R_{ep} = 7^2 \cdot 29,6 = 1450 \text{ Вт}, \quad (16)$$

де $I_{EN} = 7 \text{ А}$ – номінальний струм обмотки головних полюсів;

$R_{ep} = 29,6 \text{ Ом}$ – опір обмотки головних полюсів;

– суми механічних втрат на тертя в підшипниках і вентиляцію

$$P_{mec p} + P_v = 780 \cdot d^{3,6} \cdot \left(\frac{n_N}{1500} \right)^{1,8} \cdot 10^{-9} = 780 \cdot 245^{3,6} \cdot \left(\frac{1500}{1500} \right)^{1,8} \cdot 10^{-9} = 311 \text{ Вт}, \quad (17)$$

де $d = 245 \text{ мм}$ – зовнішній діаметр поверхні якоря;

$n_N = 1500 \text{ об/хв}$ – номінальна частота обертання.

Сума втрат потужності, які не залежать від режиму роботи, називається втратами потужності неробочого ходу, тобто при моменті навантаження $M_l = 0$:

$$P_o = P_{mec c} + P_{mag p} + P_{mag y} + P_E + P_{mec p} + P_v = 56 + 307 + 92 + 1450 + 311 = 2216 \text{ Вт}. \quad (18)$$

При цьому сума механічних втрат потужності неробочого ходу якоря складає:

$$P_{mec c} + P_{mec p} + P_v = 56 + 311 = 367 \text{ Вт}, \quad (19)$$

а сума магнітних втрат потужності в якорі

$$P_{magt} + P_{mag y} = 307 + 92 = 399 \text{ Вт}. \quad (20)$$

Звичайно у обертових електричних машин другого типу, наприклад, асинхронних або синхронних, чи в машинах постійного струму з іншими параметрами різниця між механічними втратами і сумою магнітних і електричних втрат потужності в роторі не буде такою великою, але з академічної точки зору це не змінює ситуацію.

Для більш точного запису втрат неробочого ходу у рівняння (18) необхідно також включити електричні втрати у щітках та обмотці якоря, та в компенсаційній обмотці додаткових полюсів та компенсаційній обмотці (при наявності), які визначаються струмом якоря неробочого ходу, визначення якого є досить складною задачею.

Особливо важливим є врахування магнітних і електричних втрат при проектуванні і дослідженні роботи електричних мікромашин в складі схем автоматики, що викорисовуються в пристроях навігації, внаслідок їх особливостей (порівняно з електричними машинами середньої і великої потужності [12, 13]:

– зі зменшенням потужності зростають активні опори їх обмоток, а також відношення активних і індуктивних опорів обмоток до індуктивного опору взаємодукції;

– більшість електричних мікромашин в магнітному відношенні мало насичені, або зовсім ненасичені;

– в електричних мікромашинах втрати у сталі досить малі і ними можна нехтувати при розрахунках;

– в електричних мікромашинах допускаються більші щільності струмів в обмотках;

– через збільшення активних опорів обмоток, щільності струму, потужності намагнічування, а також механічних втрат на тертя економічні показники (К.К.Д. і коефіцієнт потужності) електричних мікромашин погіршуються зі зменшенням їх номінальної потужності.

Так, процес перетворення енергії в двофазному несиметричному асинхронному мікродвигуні можна проілюструвати за допомогою енергетичної діаграми, зображеної на рис. 2 [14].

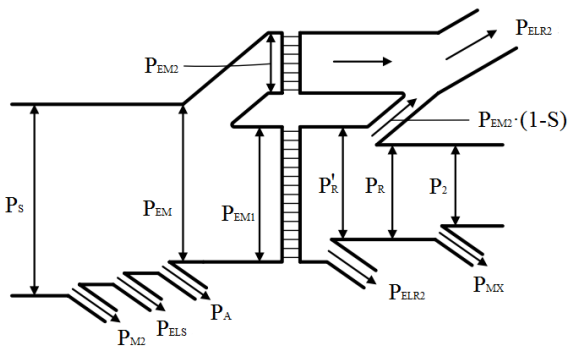


Рисунок 2 – Енергетична діаграма двофазного несиметричного асинхронного мікродвигуна

Тут прийняті наступні позначення:

P_S – потужність, що підводиться до двигуна;

P_{ML} – магнітні втрати, тобто втрати на гістерезис і вихрові струми, викликані, перемагнічуванням магнітопроводу;

P_{ELS} – електричні втрати в обмотках статора;

P_A – втрати в конденсаторі і додаткових опорах, включених послідовно з обмотками статора;

P_{EM} – повна електромагнітна потужність, що отримується ротором за посередництвом магнітного поля;

P_{EM1} – електромагнітна потужність прямої послідовності, що передається зі статора на ротор прямобертвим магнітним полем;

P_{EM2} – електромагнітна потужність зворотної послідовності, що передається зі статора на ротор зворотнообертвим магнітним полем;

P_{ELR1} – електричні втрати в обмотці ротора від струмів прямої послідовності;

P'_R – повна умовна механічна потужність, що відповідає електромагнітній потужності прямої послідовності;

P_R – дійсна механічна потужність двигуна;

P_{ELR2} – електричні втрати в обмотці ротора від струмів зворотної послідовності;

P_2 – корисна потужність на валу двигуна.

Безпосередньо з діаграми випливає, що

$$\begin{aligned} P_{ELR1} &= I_{RA1}^2 r_{RA} + I_{RB1}^2 r'_{RB} = 2I_{RA1}^2 r_{RA} = \\ &= P_{EM1} - P'_R = M_1 \Omega_1 - M_1 \Omega = \\ &= M_1 \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} \Omega_1 = M_1 \Omega_1 s, \end{aligned} \quad (21)$$

де I_{RA1} – струм обмотки ротора А прямої послідовності;

r_{RA} – активний опір обмотки ротора А;

I_{RB1} – струм обмотки ротора В, приведені до обмотки ротора А прямої послідовності;

r'_{RB} – активний опір обмотки ротора В, приведені до обмотки ротора А;

M_1 – електромагнітний момент обертання прямого поля;

Ω_1 – синхронна кутова швидкість;

Ω – кутова швидкість ротора;

s – ковзання.

Звідси електромагнітний момент обертання прямого поля

$$M_1 = \frac{P_{ELR1}}{\Omega_1 s} = \frac{2I_{RA1}^2 r_{RA}}{\Omega_1 s}. \quad (22)$$

Відносно зворотного поля ротор машини обертається з ковзанням $s_2 = 2 - s$, що при $0 < s < 1$ відповідає режиму електромагнітного гальма. При цьому обертання ротора проти зворотного поля відбувається за рахунок моменту M_1 , обумовленого прямобертвим полем. Саме цією обставиною пояснюється зменшення механічної потужності прямої послідовності від P'_R до P_R (рис. 2). Це зменшення потужності йде на покриття частини електричних втрат в роторі від струмів зворотної послідовності, причому

$$\begin{aligned} P'_R - P_R &= M_1 \Omega - M \Omega = M_1 \Omega - (M_1 - M_2) \Omega = \\ &= M_2 \Omega = M_2 \Omega_1 (1 - s) = P_{EM2} (1 - s). \end{aligned} \quad (23)$$

Тут $M = M_1 - M_2$ – результуючий обертальний момент двигуна, що дорівнює різниці моментів від прямого (M_1) і зворотного (M_2) полів.

Електричні втрати в роторі від струмів зворотної послідовності покриваються за рахунок електромагнітної потужності зворотної послідовності лише частково. Інша частина цих втрат покривається за рахунок електромагнітної потужності прямої послідовності. В результаті маємо

$$\begin{aligned} P_{ELR2} &= I_{RA2}^2 r_{RA} + I_{RB2}^2 r_{RB} = 2I_{RA2}^2 r_{RA} = \\ &= P_{EM2} + P_{EM2} (1 - s) = P_{EM2} (2 - s) = \\ &= M_2 \Omega_1 (2 - s), \end{aligned} \quad (24)$$

звідки момент, що відповідає зворотно обертвому полю

$$M_2 = \frac{P_{ELR2}}{\Omega_1 (2 - s)} = \frac{2I_{RA2}^2 r_{RA}}{\Omega_1 (2 - s)}. \quad (25)$$

Результуючий обертальний момент двофазного несиметричного двигуна можна представити у вигляді

$$M = M_1 - M_2 = \frac{2I_{RA1}^2 r_{RA}}{\Omega_1 s} - \frac{2I_{RA2}^2 r_{RA}}{\Omega_1 (2 - s)}. \quad (26)$$

ВИСНОВКИ. Отже, втрати потужності, які визначають момент у рівнянні моментів (1) практично визначаються не тільки механічними втратами, а сумою магнітних і електричних втрат потужності, які більші його, академічно доцільно назвати моментом неробочого ходу M_0 так, як це було прийнято у всіх підручниках «Електричні машини» раніше.

Тоді рівняння моментів (12) для обертових електричних машин треба записати у вигляді

$$M_{em} = J \frac{d\Omega_m}{dt} + M_0 + M_l = 0, \quad (27)$$

де момент неробочого ходу визначається рівнянням

$$M_0 = 9,55 \frac{P_0}{n_0}, \quad (28)$$

де n_0 – частота обертання неробочого ходу;

P_0 – сумарні втрати потужності неробочого ходу.

Саме такий запис рівняння (27) і моменту неробочого ходу (28) прийнято у посібнику [2].

ЛІТЕРАТУРА

1. Яцун М.А. Електричні машини – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2001. – 428 с.
2. Онушко В.В., Шефер О.В. Електричні машини – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – 536с.
3. Chapman S.J. (2012), *Electric Machinery Fundamentals*, McGraw-Hill, New York, United States.
4. Hughes A. (2006), *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications*, Elsevier, Oxford, GB.
5. Hindmarsh J. and Renfrew A. (1997), *Electrical Machines and Drives*, Elsevier, Oxford, GB.
6. Gieras J.F. (2016), *Electrical Machines: Fundamentals of Electromechanical Energy Conversion*, CRC Press, Boca Raton, Florida, United States.
7. Gupta J.B. (2009), *Theory & Performance Of Electrical Machines*, S.K. Kataria & Sons, New Delhi, India.
8. James L. and Kirtley Jr. (2005), *Electric Machines*, MIT, Cambridge, United States.
9. Strangas E.G. (2005), *Notes for an Introductory Course On Electrical Machines and Drives*, Michigan State University, East Lansing, Michigan, United States.
10. Fitzgerald A.E., Kingsley Ch., Jr., and Umans S. D. (2003), *Electric machinery*, McGraw-Hill, New York, United States.
11. Проектирование электрических машин / О.Д. Голдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 431с.
12. Степанковский Ю.В. Преобразующие устройства приборов. Т1. Электродвигатели (Силовые микромашини). – Киев: «Корнійчук», 2002. – 207 с.
13. Павлович С.Н. Электрические микромашини и их особенности // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 14-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2016. – Т. 1. – С. 281.
14. Лифанов В.А. Электрические машины систем автоматики и бытовой техники. – Челябинск: изд. ЮУрГУ, 2006. – 237 с.
15. Mahmoudi A., Soong W.L., Pellegrino G., and Armando E. (2015). "Efficiency maps of electrical machines", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE, Montreal, QC, 20-24 Settembre 2015*. pp. 2791–2799.
16. Gross C.A. (2006), *Electric Machines*, CRC Press, Boca Raton, Florida, United States.
17. Vukosavic S.N. (2012), *Electrical Machines*, Springer Science & Business Media, Berlin/Heidelberg, Germany.
18. Mukhopadhyay A.K. (2007), *Matrix Analysis of Electrical Machines*, New Age International, New Delhi, India.
19. Hammond P. (2013), *Electrical Machines & Drives*, Elsevier, Oxford, UK.
20. Bakshi U.A. and Godse A.P. (2009), *Electrical Machines & Electronics*, Technical Publications, Maharashtra, India.
21. Bhattacharya S.K. (2011), *Electrical Machines*, PHI Learning Pvt. Ltd., New Delhi, India.

ACCURATE DEFINITION EQUATION OF MOMENTS OF ROTATING ELECTRICAL MACHINES OF NAVIGATION DEVICES

O. Shefer, D. Neliuba

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

prosp. Pershotravnevyi, 24, Poltava, 36011, Ukraine. E-mail: k45pntu@ukr.net

Purpose. Incorrectness of rotating electric machines torque equation notation and its interpretation, presented in Ukraine standard, theoretical justification and proposing the equations correct notation and interpretation. **Methodology.** Mathematical apparatus is used to describe the physical processes that cause electrical machines idling losses, operating mode independent, including electric losses in brushes and armature winding, in additional poles compensation winding and in compensation winding (if available), which are determined by idling armature current. **Results.** The article discusses State Standards of Ukraine, which concern rotating electric machines, requirements series inconsistency. Losses in rotating electric machine are determined using DC machine example. Using theoretical calculations was analyzed and proved that power losses are determined by sum of electrical and magnetic losses in rotating electrical machine. It was established that this sum of losses is greater than mechanical losses. Obtained results are compared on basis of DC machine with asynchronous and synchronous machines. Necessity to take into account electrical and magnetic losses in navigation devices electric micromachines operation analysis is noted. Questions of correct notation of rotating electric machines torque equation are revealed. Correct interpretation of electric machine fleeting move torque justified. **Originality.** For the first time, attempt was made to solve inconsistency problem of State Standards of Ukraine requirements series, concerning rotating electric machines, by proposing torque equation notation for rotating electric machines using the concept of idling moment, taking into account not only mechanical but also magnetic and electric power losses. **Practical value.** By way of power losses in DC motor armature detailed consideration, for ex-

ample 2P series DC motor, in practice was shown difference between mechanical losses and sum of magnetic and electric power losses in electric motor rotor. Ignoring these losses can affect electrical machines models accuracy during their behavior investigation as part of automation schemes. This is especially actual for electromechanical micromachines models due to their features. **Conclusions.** Power losses that determine torque in rotating electrical machines torque equation are practically determined not only by mechanical losses, but also by sum of magnetic and electric power losses, which, moreover, is academically expedient to call moment of idling, as was customary in all "Electric Machines" textbooks previously.

Key words: navigation device, rotating electrical machines, torques equation, mechanical losses torque, fleeting move torque, at idle.

REFERENCES

1. Yatsun, M.A. (2001), *Elektrichni mashini* [Electric machines], Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.
2. Onushko, V.V. and Shefer, O.V. (2015), *Elektrichni mashini* [Electric machines], Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine.
3. Chapman, S.J. (2012), *Electric Machinery Fundamentals*, McGraw-Hill, New York, United States.
4. Hughes, A. (2006), *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications*, Elsevier, Oxford, UK.
5. Hindmarsh, J. and Renfrew, A. (1997), *Electrical Machines and Drives*, Elsevier, Oxford, UK.
6. Gieras, J.F. (2016), *Electrical Machines: Fundamentals of Electromechanical Energy Conversion*, CRC Press, Boca Raton, Florida, United States.
7. Gupta, J.B. (2009), *Theory & Performance Of Electrical Machines*, S.K. Kataria & Sons, New Delhi, India.
8. James, L. and Kirtley, Jr. (2005), *Electric Machines*, MIT, Cambridge, USA.
9. Strangas, E.G. (2005), *Notes for an Introductory Course On Electrical Machines and Drives*, Michigan State University, East Lansing, Michigan, United States.
10. Fitzgerald, A.E., Kingsley, Ch.Jr., and Umans, S.D. (2003), *Electric machinery*, McGraw-Hill, New York, United States.
11. Goldberg, O.D., Gurin, Ya.S. and Sviridenko, I.S. (1984), *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Designing of electrical machines], Energoatomizdat, Moscow, Russia.
12. Stepankovskiy, Yu.V. (2002), *Preobrazuyuschie ustroystva priborov. T1. Elektrodvigateli (Silovyye mikromashiny)* [Converters devices. Vol.1. Electric motors (Power micromachines)], «Korniyuchuk», Kiev, Ukraine.
13. Pavlovich, S.N. (2016), "Electric micromachines and their features", *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike : materialyi 14-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Science for Education, Production, Economics: Materials of 14th International Scientific and Technical Conference], Minsk, BNTU, January 28-30, 2016, p.281.
14. Lifanov, V.A. (2006), *Elektricheskie mashiny sistem avtomatiki i byitovoy tehniki* [Electric machines of automation and household appliances], South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
15. Mahmoudi, A., Soong, W.L., Pellegrino, G., and Armando, E. (2015). "Efficiency maps of electrical machines", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE, Montreal, QC, 20-24 Settembre 2015*. pp. 2791-2799.
16. Gross, C.A. (2006), *Electric Machines*, CRC Press, Boca Raton, Florida, United States.
17. Vukosavic, S.N. (2012), *Electrical Machines*, Springer Science & Business Media, Berlin/Heidelberg, Germany.
18. Mukhopadhyay, A.K. (2007), *Matrix Analysis of Electrical Machines*, New Age International, New Delhi, India.
19. Hammond, P. (2013), *Electrical Machines & Drives*, Elsevier, Oxford, UK.
20. Bakshi, U.A. and Godse, A.P. (2009), *Electrical Machines & Electronics*, Technical Publications, Maharashtra, India.
21. Bhattacharya, S.K. (2011), *Electrical Machines*, PHI Learning Pvt. Ltd., New Delhi, India.

Стаття надійшла 15.05.2017.