

УДК 629.429.3:621.313

DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-206-227

Олег Губаревич, Сергій Гулак, Олександр Горобченко, Інна Скляренко

УТОЧНЕНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКУ ВТРАТ ТЯГОВОГО ДВИГУНА ПУЛЬСУЮЧОГО СТРУМУ

Актуальність теми дослідження. Для визначення ККД і втрат у тяговому двигуні існує багато розрахункових методик, рекомендованих різними авторами. Наведені в методиках співвідношення для розрахунку деяких видів втрат мають відмінності. Крім того, рекомендуються для розрахунків різні діапазони, в яких змінюються нормувальні коефіцієнти в однакових розрахункових формулах, що призводить до значних варіацій кінцевих результатів. Для попередньої, якісної оцінки, будь-яка з методик цілком відповідає вимогам завдань. Однак для прийняття технічних рішень на етапі проєктування або модернізації конструкції і, особливо, аналізу впливу живлення, режимів роботи та управління на параметри двигуна, доцільно дотримуватися єдиного підходу при обліку втрат для адекватності порівняння отриманих результатів, проведених різними дослідниками на різних математичних моделях.

Постановка проблеми. Питання аналізу й уточнення розрахунку втрат у тягових двигунах в єдиному методичному порядку, а також уявлення про рівень відмінностей, одержуваних результатів для різних розрахункових співвідношень, особливо з огляду на постійну модернізацію і активне застосування тягових двигунів пульсуючого струму на залізничному транспорті при проведенні досліджень та моделюванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багато провідних авторів, які займалися питаннями проєктування і розрахунку тягових двигунів постійного струму, приводять співвідношення для розрахунку найбільш значущого виду втрат – основних втрат у сталі, які мають відмінності в загальному вигляді співвідношень або в деяких коефіцієнтах, а головне, відрізняються кінцевим результатом.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Точне визначення втрат потужності в двигунах, при існуючому стані речей являє собою задачу, в якій неможливе визначення єдиного правильного результату, оскільки заводи-виробники не надають у довідковій літературі необхідну інформацію щодо методики розрахунку, а в паспортних даних вказують виміряні показники.

Мета і завдання дослідження. Метою цієї роботи є аналіз існуючих методик для розрахунку всіх видів втрат у тяговому двигуні пульсуючого струму, що дозволить уточнити порядок розрахунку й отримати значення параметрів втрат двигуна для використання їх при проведенні подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу. У роботі проведено аналіз співвідношень із розрахунку всіх видів втрат, згідно з різними методиками, із розрахунком їх фактичних значень на прикладі конструкції тягового двигуна НБ-418К6 потужністю 740 кВт.

Висновки відповідно до статті. На підставі проведеного аналізу та розрахункових досліджень, використовуваних співвідношень і проведених розрахунків отримані значення сумарних втрат у тяговому двигуні пульсуючого струму і втрати по кожному їх виду, виконані з урахуванням реальної конструкції і властивостей використовуваних матеріалів у двигуні НБ-418К6. Встановлено, що найбільш значущі відмінності мають співвідношення розрахунку магнітних втрат з різним урахуванням вихрових струмів у сталі. При розрахунку електричних втрат розбіжності в розрахунках можуть бути пов'язані з некоректним урахуванням фактичної робочої температури кожної обмотки, що позначається на точності визначення їх опорів. Також проведено аналіз розрахунку додаткових і механічних втрат на прикладі зазначеного двигуна з використанням різних співвідношень. Отримані значення ККД для розглянутого тягового двигуна, що розраховані з використанням різних методик, знаходяться в межах 93,64–94,14 %. На підставі проведених розрахунків і аналізу втрат рекомендована комбінована методика для застосування та оцінки ККД при проведенні подальших досліджень тягових двигунів. Розрахунок ККД за запропонованою (комбінованою) методикою для досліджуваного двигуна становив 94,25 %. Отримані значення кожного виду втрат можуть бути прийняті за основу для проведення оцінювання адекватності моделі при імітаційному моделюванні тягового двигуна пульсуючого струму НБ-418К6 з використанням Simulink.

Ключові слова: тяговий двигун; пульсуючий струм; магнітні втрати; електричні втрати; додаткові втрати; сердечник якоря; питомі магнітні втрати

Рис.: 2. Табл.: 7. Бібл.: 28.

Актуальність теми дослідження. Нині є проблема єдиного підходу до розрахунку втрат тягового двигуна пульсуючого струму, яка загострюється в умовах сучасних тенденцій математичного моделювання електричних машин і процесах, що в них проходять. Актуальність її визначається необхідністю проведення аналізу режимів роботи при розробці нових двигунів, вдосконалення існуючих, оцінці необхідності розробки спеціальних методів управління тяговими двигунами. У цій роботі проаналізовані та впорядковані співвідношення розрахунку всіх видів втрат для визначення коефіцієнта корисної дії (ККД) тягового двигуна. Наведені співвідношення перевірені порівнянням ручного розрахунку і паспортних даних тягового двигуна з уточненою методикою розрахунку втрат.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Усі основні методиками з розрахунку та проектування машин постійного струму і тягових машин належать таким авторам, чії роботи взяті за основу у процесі проведення аналізу: А. Б. Іоффе [1], П. С. Сергєєву [2], М. Д. Находкіну [3], І. П. Копилову [4-7], А. Є. Алексєєву [8], А. С. Курбасову [9]. Теорія і природа втрат у машинах постійного струму докладно розглянута в роботах А. І. Вольдека [10], О. Д. Гольдберга [11], М. П. Костенко і Л. М. Піотровкого [12] та ін.

З огляду на достатню різноманітність методик, в яких можуть відрізнятися деякі співвідношення і діапазони рекомендованих значень коефіцієнтів, спостерігаються значні варіації кінцевих результатів, що отримуються. Для попередньої, якісної, оцінки будь-яка з методик цілком відповідає вимогам завдань, що вирішуються [13; 14]. Однак для прийняття технічних рішень на етапі проектування або модернізації конструкції і, особливо, аналізу впливу якості живлення, режимів роботи та управління на параметри двигуна, доцільно дотримуватися єдиного підходу при врахуванні втрат для адекватності порівняння отриманих результатів, проведених різними авторами на різних математичних моделях [15].

Отже, точне визначення втрат потужності в двигунах, при існуючому стані речей являє собою задачу, в якій неможливе визначення єдино правильного результату, оскільки заводи-виробники не надають в довідковій літературі необхідну інформацію щодо методики розрахунку, а в паспортних даних вказують вимірні показники.

У зв'язку з цим питання аналізу й уточнення розрахунку втрат у тягових двигунах в єдиному методичному порядку є актуальним питанням, особливо з огляду на постійну їх модернізацію та активне застосування в залізничному транспорті.

Аналіз останніх публікацій і постановка проблеми. У теорії і практиці електричних машин застосовується методика, відповідно до якої втрати потужності ΔP представляють сумою двох складових – постійних $\Delta P_{\text{пост}}$ і змінних втрат $\Delta P_{\text{зм}}$, тобто:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{зм}}. \quad (1)$$

До постійних втрат відносяться втрати потужності, які приймають незалежними від навантаження двигуна, а саме: втрати в сталі магнітопроводу, механічні втрати й вентиляційні втрати. Для двигунів постійного струму з незалежним збудженням до постійних втрат зазвичай відносять і втрати в обмотках збудження [10-12].

Постійні втрати в дійсності не є незмінними, а залежать від багатьох факторів і режимів у період роботи тягового двигуна, проте, оскільки ці види втрат змінюються незначно, то вони приймаються незмінними й рівними номінальним постійним втратам.

Змінними втратами, є втрати, які утворюються в обмотках двигунів при протіканні по ним струмів, зумовлених механічним навантаженням тягового двигуна [3].

Загальна потужність втрат, що виникають при роботі тягового електродвигуна, може бути поділена на:

1) потужність магнітних втрат у сталі $\Delta P_{\text{ст}}$, що виділяються в основному в активній сталі якоря і зумовлених гістерезисом та вихровими струмами;

2) потужність електричних втрат $\Delta P_{\text{ел}}$ в обмотках двигуна й у колекторно-щітковому контакті;

3) потужність додаткових втрат $\Delta P_{\text{дод}}$, величина яких залежить від струму навантаження;

4) потужність механічних втрат $\Delta P_{\text{мех}}$ від тертя в підшипниках, на колекторі, тертя обертових частин якоря о повітря і аеродинамічних втрат, викликаних вентилятором (в разі самовентиляції).

Таким чином, у загальному випадку, сумарні втрати в двигуні:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{cm} + \Delta P_{el} + \Delta P_{доd} + \Delta P_{мex}, \quad (2)$$

де ΔP_{cm} – основні (магнітні) втрати в сталі в режимі холостого ходу, Вт;

ΔP_{el} – основні (електричні) втрати в міді, Вт;

$\Delta P_{доd}$ – додаткові втрати в сталі при навантаженні, Вт;

$\Delta P_{мex}$ – механічні втрати, Вт.

При розрахунковому визначенні основних (магнітних) втрат осердя статора розбивають на ряд ділянок з умови, що в межах кожної з ділянок магнітна індукція незмінна. При цьому втрати на гістерезис і вихрові струми знаходять одночасно, користуючись напівемпіричними формулами, які приводяться в посібниках з проектування. Розрахункові втрати від гістерезису і вихрових струмів, викликаних перемагнічуванням осердь при холостому ході машини, знаходять, коли магнітний потік розподіляється рівномірно в повітряному зазорі [4; 16].

Додаткові втрати виникають при навантаженні двигуна і складаються з неврахованих втрат в осерді, що виникають через спотворення розподілу магнітного поля в зазорі під впливом реакції якоря, а також втрат, зумовлених нерівномірним розподілом струму в провідниках обмоток і в ковзному контакті. Точний облік додаткових втрат дуже важкий. Тому, в загальному випадку, їх приймають рівними 1 % потужності, що віддається (для генератора) і, що підводиться (для двигуна) в машинах постійного струму без компенсаційних обмоток. Для машин з компенсаційними обмотками ці втрати дорівнюють 0,5 % в [10].

До основних (магнітних) втрат у тягових електричних машинах відносяться втрати в ярмі й зубцях осердя якоря і втрати в сталі полюсних наконечників головних полюсів. Втрати в сталі полюсних наконечників головних полюсів зумовлені зубчастою будовою якоря і самого полюсного наконечника. До основних втрат у сталі також відносять втрати в бандажі, розташованому по активній довжині якоря (якщо він передбачений у конструкції і виконаний зі сталевго дроту). Бандажі зі сталевго проволу згодом були замінені на бандажні стрічки зі скловолокна, які практично не впливають на втрати в сталі [1; 3; 9].

Багато провідних авторів, які займалися питаннями проектування і розрахунку тягових двигунів постійного струму, приводять співвідношення для розрахунку найбільш значимого виду втрат – основних втрат у сталі, які мають відмінності в загальному вигляді співвідношень або в деяких коефіцієнтах, а головне, відрізняються кінцевим результатом, що буде встановлено далі [1; 3; 7; 9].

Мета і завдання дослідження. Метою цієї роботи є аналіз існуючих методик для розрахунку всіх видів втрат в тяговому двигуні пульсуючого струму, що дозволить запропонувати уточнений порядок розрахунку й отримати фактичні значення параметрів втрат двигуна для використання їх при проведенні подальших досліджень.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих основних методик по розрахунку всіх видів втрат в тяговому двигуні пульсуючого струму;

- виконати повний розрахунок тягового двигуна НБ-418К6, на підставі якого визначити і проаналізувати фактичні значення втрат по співвідношенням, запропонованим різними авторами;

- встановити види втрат, які мають великі розходження отриманих кінцевих значень, виконаних за різними співвідношеннями;

- визначити комбіновану методику для подальшого застосування при розрахунку ККД у дослідженнях тягових двигунів;

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

- визначити значення кожного виду втрат, для використання при побудові імітаційної моделі тягового двигуна пульсуючого струму в одному з програмних пакетів і проведенні оцінки адекватності імітаційної моделі.

Виклад основного матеріалу. Проведемо аналіз співвідношень з розрахунку всіх видів втрат, що враховуються в різних методиках з розрахунком їх значень на прикладі конструкції тягового двигуна НБ-418К6 потужністю 740 кВт.

Розглянемо співвідношення, що найбільш часто застосовуються для розрахунку магнітних (основних) втрат за питомими втратами в сталевих ділянках осердя і зубців якоря двигуна і масами відповідних ділянок $\Delta P_{cm.a}$ у вигляді, наведеному в роботі А. Б. Іоффе [1]. Згідно з [1] втрати в сталі пакета якоря включають також поверхневі в башмаку полюса і складаються із втрат на гістерезис ΔP_{zicm} і втрат на вихрові струми $\Delta P_{вихр.cmp}$:

$$\Delta P_{cm.a} = \Delta P_{zicm} + \Delta P_{вихр.cmp} = 2,7 \cdot (\rho_a \cdot G_a + \rho_z \cdot G_z) \cdot \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3)$$

де ρ_a і ρ_z – питомі магнітні втрати в якорі і зубцях відповідно, Вт/кг;

G_a – маса сталі спинки якоря, кг;

G_z – маса сталі зубців якоря, кг.

Питомі магнітні втрати в якорі й зубцях визначаються як:

$$\rho_a = \left[4,4 \cdot \frac{f}{100} + 5,6 \cdot \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot B_a^2, \quad (4)$$

$$\rho_z = \left[4,4 \cdot \frac{f}{100} + 5,6 \cdot \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot B_{z1/3}^2, \quad (5)$$

де B_a , $B_{z1/3}$ – розрахункова індукція в режимі, що розглядається (часовому), в ярмі якоря і зубцях якоря на $1/3$ висоти від основи, Тл.

f – частота перемагнічування осердя якоря в номінальному режимі, Гц:

$$f = \frac{p \cdot n_{об}}{60},$$

де p – число пар полюсів;

$n_{об}$ – частота обертання валу двигуна, об/хв.

Маса сталі спинки якоря, кг:

$$G_a = \frac{\pi}{4} \cdot \left[(D_a - 2 \cdot h_n)^2 - D_i^2 - m_k \cdot d_k^2 \right] \cdot l_\delta \cdot k_{cm} \cdot \rho_{cm}, \quad (6)$$

де D_a – діаметр якоря зовнішній, м;

h_n – висота паза, м;

D_i – діаметр якоря внутрішній, м;

m_k – загальна кількість вентиляційних каналів;

d_k – діаметр вентиляційного каналу, м;

l_δ – довжина пакета якоря, м;

k_{cm} – коефіцієнт заповнення пакета якоря сталлю (сталь листів якоря має ізоляційне покриття для зниження втрат на вихрові струми). При електроізоляційному покритті $k_{cm} = 0,97$, при лаковому $k_{cm} = 0,94$;

$\rho_{cm} = 7800$ – густина сталі, кг/м³.

Маса сталі зубців якоря, кг:

$$G_a = \frac{\pi}{4} \cdot \left[(D_a - 2 \cdot h_n)^2 - D_i^2 - Z \cdot b_n \cdot h_z \right] \cdot l_\delta \cdot k_{cm} \cdot \rho_{cm}, \quad (7)$$

де b_n – ширина паза, м;
 h_z – висота зубця, м;
 Z – число пазів якоря.

Коефіцієнти у формулах (4) і (5), відповідно до коментарів автора, дані для сталі, що застосовується в конструкціях якорів тягових машин 1212 (E12). Для інших марок сталей розраховані питомі втрати ρ_a і ρ_z необхідно зменшити приблизно пропорційно кореню квадратному з відношення питомих втрат для сталі 1212 (E12) та іншої марки за значенням для 50 Гц і 1,0 Тл – при товщині листа 0,5 мм. Наприклад, в такому випадку, значення коефіцієнта зниження питомих втрат кожної ділянки, розрахованого по вище наведеним співвідношенням для сталі 1312 (E22), яка застосовується в цій конструкції двигуна НБ-418К6, враховуючи табл. 1, становитиме:

$$k = \sqrt{\frac{3,1}{2,2}} = 1,19. \quad (8)$$

Таблиця 1

Питомі втрати в електротехнічній сталі при товщині листа 0,5 мм

Марка сталі	$\rho_{1.0/50}, \text{Вт/кг}$	$\rho_{1.5/50}, \text{Вт/кг}$	Марка сталі	$\rho_{1.0/50}, \text{Вт/кг}$	$\rho_{1.5/50}, \text{Вт/кг}$
1211	3,3	7,7	1412	1,8	3,9
1212	3,1	7,2	1511	1,55	3,5
1213	2,8	6,5	1512	1,4	3,1
1311	2,5	6,1	1513	1,25	2,9
1312	2,2	5,3	3411	1,1	2,45
1411	2,0	4,4	3412	0,95	2,1

Треба відзначити, що в існуючих електричних машинах в основному застосовуються електротехнічні сталі марок 1211, 1212, 1213, 1311, 1312, 1411, 1412, 1511, 1512, 3411, 3412, 3413, які відповідають старим позначенням E11, E12, E13, E21, E22, E31, E32, E41, E42, E310, E320, E330 [10].

Якщо потрібно виокремити втрати в полюсних башмаках із втрат у сталі, розрахованих по (3), то їх окремо можна визначити [1]:

$$\Delta P_{\delta.n.} = k_{\delta.n.} \cdot \left(\frac{Z \cdot n_{\text{дв}}}{10000} \right)^{1.5} \cdot [(k_{\delta} - 1) \cdot B_{\delta} \cdot t_1] \cdot 2p \cdot \alpha \cdot \tau \cdot l_{\delta}, \quad (9)$$

де Z – число пазів;
 $n_{\text{дв}}$ – частота обертання, об/хв;
 k_{δ} – коефіцієнт повітряного зазору;
 B_{δ} – індукція в повітряному зазорі, Тл;
 t_1 – зубцевий крок якоря, м;
 $2p$ – число полюсів;
 α – коефіцієнт полюсного перекриття;
 τ – полюсний поділок, м;
 l_{δ} – довжина осердя якоря, м;

$k_{\delta.n.}$ – коефіцієнт, що враховує конструкцію полюса: $k_{\delta.n.} = 4$ для полюсів зі сталі товщиною 1,5 мм, $k_{\delta.n.} = 2,8$ для сталі товщиною 1,0 мм, для суцільних полюсів $k_{\delta.n.} = 14$.

У роботі М. Д. Находкіна [3] для розрахунку основних втрат у сталі рекомендовано також співвідношення (1), але з експериментально встановленим діапазоном коефіцієнту на початку формули, що враховує марку сталі, Вт:

$$\Delta P_{cm.a} = \Delta P_{zicm} + \Delta P_{auxp.cmp} = (2,4 + 2,7) \cdot (\rho_a \cdot G_a + \rho_z \cdot G_z), \quad (10)$$

де ρ_a, ρ_z, G_a, G_z , визначаються за виразами (4), (5), (6), (7) відповідно.

У коментарях автора до виразу (3) зазначено, що коефіцієнти в формулах (4) і (5) дані для сталі 1211 (E11), що застосовується в якорях тягових машин. Для інших марок сталей змінюють питомі втрати ρ_a і ρ_z пропорційно кореню квадратному з відношення питомих втрат для сталі 1211 (E11) і іншої марки за даними 50 Гц і 1,0 Тл. Тоді значення коефіцієнту зменшення втрат, розрахованого по вище наведеним співвідношенням для сталі 1312 (E22), яка найбільш часто застосовується для якорів цих типів машин, враховуючи дані табл.1., складе:

$$k = \sqrt{\frac{3,2}{2,2}} = 1,22. \quad (11)$$

Коефіцієнт 2,4 у формулі (10) відноситься до сталі марки 1312 (E22, E1300) з питомими втратами 2,2 Вт/кг [3]. У роботі Д. Д. Захарченко [17] наводиться діапазон зміни коефіцієнта у формулі (3) $k = 1,25-2,7$, де зазначено, що це коефіцієнт, який враховує неоднорідність магнітопроводів і розподілу магнітних потоків в осерді. У процесі різання і штампування листів в області контакту з різальним інструментом виникають пластичні деформації, викликані наклепом. Унаслідок наклепу відбувається збільшення питомих втрат, переважно за рахунок збільшення втрат на гістерезис. Це зумовлено тим, що в областях, прилеглих до місця розрізу, відбувається деформація кристалічної решітки, що призводить до зростання втрат на перемагнічування. При розрізанні, згідно [18-20], зростання питомих втрат у сталі становить приблизно 10 %. При штампуванні пластин магнітні властивості сталі погіршуються ще більшою мірою, ніж при розрізанні, в результаті пластичної деформації, особливо в місцях прилягання штампу. При цьому зростання питомих втрат досягає приблизно 44 %, тобто в процесі розрізання та штампування питомі втрати можуть зрости майже в 1,5 раза.

У роботі В. І. Бочарова [21] для розрахунку магнітних втрат у сталі використовується так само співвідношення (1), а для вибору коефіцієнта втрат залежно від марки сталі запропонована табл. 2.

Таблица 2

Значення коефіцієнтів втрат від марки сталі

Марка сталі	1212 (E12)	1213 (E13)	1311 (E21)	1312 (E22)
Коефіцієнт втрат	2,7	2,55	2,4	2,25

У роботі [9] у виразі

$$\Delta P_{cm.a} = k_{xx} \cdot (\rho_a \cdot G_a + \rho_z \cdot G_z) \quad (12)$$

рекомендується застосовувати розрахунковий емпіричний коефіцієнт, що враховує збільшення втрат у сталі через якість шихтовки, наклепу при штампуванні, а також всі види додаткових втрат холостого ходу

$$k_{xx} \approx 0,8 \cdot \sqrt{\rho_{1,5/50}}, \quad (13)$$

де $\rho_{1,5/50}$ Вт/кг – питомі втрати в електротехнічній сталі при $B = 1,5$ Тл і $f = 50$ Гц. Для сталі марки 1312 (E22) товщиною 0,5 мм $\rho_{1,5/50} = 5,3$ Вт/кг.

Слід враховувати, що застосування сучасних марок сталі з меншими питомими втратами дозволяє підвищити ККД і зменшити витрату електроенергії.

При розрахунку ККД, повне значення основних втрат в сталі машини, при використанні рівняння (12), можна отримати збільшенням втрат в якорі на 10-30% з огляду на втрати в бандажі та інші невраховані втрати[9]:

$$\Delta P_{cm} = (1,1-1,3) \cdot \Delta P_{cm.a} \quad (14)$$

Орієнтовно рекомендується прийняти при проведенні розрахунку ККД $\Delta P_{cm} = 1,15 \cdot \Delta P_{cm.a}$ [9].

В роботі Алексєєва А.Є. [8], для розрахунку магнітних втрат в якорі без врахування додаткових втрат рекомендується наступне співвідношення, виражене через об'єми зубцевої зони і осердя якоря:

$$\Delta P_{cm.a} = \sigma_{Fe} \cdot f^{1.6} \cdot 10^2 \cdot (B_{z1/3}^2 \cdot V_z \cdot k_z + B_a \cdot V_a), \quad (15)$$

де σ_{Fe} – коефіцієнт, що враховує марку сталі: для сталі 1211 (E11) товщиною листа 0,5 дорівнює 1,5, а для сталі 1312 (E22) – 0,5 дорівнює 0,9;

f – частота перемагнічування осердя якоря в номінальному режимі, Гц;

$B_a, B_{z1/3}$ – індукція в ярмі і зубцях якоря на 1/3 висоти від основи, Тл;

V_z, V_a – об'єм зубців і осердя якоря, м³;

k_z – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу індукції по висоті зубця.

Коефіцієнт k_z вибирається з рис. 1 за значенням відношення розмірів зубця у верхній частині і біля основи z_2 / z_1 :

$$k_z = f(z_2 / z_1) \quad (16)$$

де z_1 – ширина зубця по зовнішній поверхні якоря $z_1 = t_1 - b_n, \text{ м}$;

z_2 – ширина зубця біля основи $z_2 = t_2 - b_n, \text{ м}$;

t_1 – пазовий розподіл, м;

t_2 – зубцевий розподіл по дні пазу, м;

b_n – ширина пазу, м.

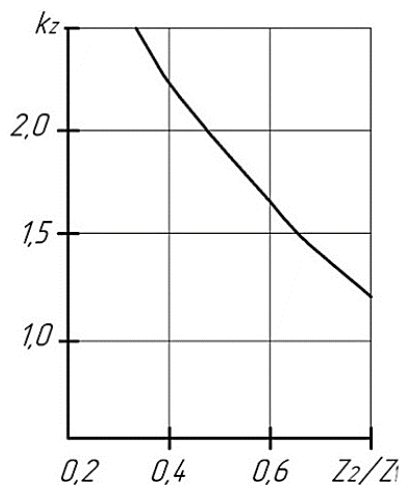


Рис. 1. Коефіцієнт трапецеїдальності форми зубців якоря

Об'єм осердя якоря, м³:

$$V_a = \frac{\pi}{4} \cdot [(D_a - 2 \cdot h_z) \cdot 2 - 2 \cdot D_i - 2 \cdot m_k \cdot d_k] \cdot k_{cm}, \quad (17)$$

де D_i – внутрішній діаметр якоря, м:

$$D_i = D_a - 2 \cdot \left(h_z - h_a - \frac{1}{2} \cdot m_k \cdot d_k \right). \quad (18)$$

Об'єм зубців, м³:

$$V_z = Z \cdot z_{сер} \cdot h_z \cdot k_{cm}, \quad (19)$$

де $z_{сер} = (z_1 + z_2) / 2$ – середня ширина зубця, м.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

У роботах І. П. Копилова [4-7] для розрахунку магнітних втрат у сталі якоря використовуються співвідношення:

- для розрахунку магнітних втрат в ярмі якоря, Вт:

$$\Delta P_a = k_{\partial a} \cdot \rho_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot B_a^2 \cdot G_a, \quad (20)$$

- для розрахунку магнітних втрат у зубцях якоря, Вт:

$$\Delta P_z = k_{\partial z} \cdot \rho_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot B_z^2 \cdot G_z, \quad (21)$$

де $\rho_{1,0/50}$ – питомі втрати в листовій електротехнічній сталі при магнітній індукції $B = 1,0$ Тл і частоті перемагнічування $f = 50$ Гц. Для сталі 1312 (E22) $\rho_{1,0/50} = 2,2$ Вт/кг;

β – коефіцієнт зміни питомих втрат залежно від частоти перемагнічування, залежить від типу сталі. Значення коефіцієнта лежить у діапазоні від 1,2 (для високолегованих) до 1,5 (для слаболегованих сталей);

$k_{\partial a}$, $k_{\partial z}$ – коефіцієнти збільшення втрат унаслідок недосконалості технології виготовлення пакета якоря (наклеп при штампуванні, замикання листів через наявність задирок і пошкодження ізоляції листів і ін.), а також через несинусоїдальність закону зміни індукції в часі й наявності оберտального перемагнічування. Для машин постійного струму $k_{\partial a} = k_{\partial z} = 2,3$; для машин змінного струму $k_{\partial} = 1,3 - 1,8$.

Маса сталі зубців якоря G_z і маса сталі спинки якоря G_a , розраховуються по (6) і (7).

Втрати в сталі якоря складаються з магнітних втрат в ярмі якоря (20) і в зубцях якоря (21):

$$\Delta P_{cm.a} = \Delta P_a + \Delta P_z. \quad (22)$$

При розрахунку основних втрат враховується, що магнітні втрати залежать від марки сталі, товщини листів магнітопроводу, індукції і частоти перемагнічування. Значний вплив на магнітні втрати надають технологічні чинники - штампування листів, пресування пакетів, механічна обробка магнітопроводу і ін. В таблиці 3 наведені значення питомих втрат при індукції 1,0 Тл, частоті перемагнічування 50 Гц і коефіцієнта β для різних марок сталі при товщині листа 0,5 мм [4].

При невеликих значеннях індукції втрати на гістерезис при обертальному перемагнічуванні менше втрат на гістерезис при пульсаційному перемагнічуванні (вони можуть відрізнятися в 2 рази). Однак при індукціях 1,5–1,7 Тл втрати в сталі при обох видах перемагнічування стають приблизно однаковими [22-24].

Таблиця 3

Значення коефіцієнта β для різних марок сталі

Марка сталі	$\rho_{1,0/50}$, Вт/кг	β
2013, 2011, 2211	2,5–2,6	1,5
2312	1,75	1,4
2411	1,6	1,3

Розглядаючи окремі ділянки магнітної системи при обертальному перемагнічуванні, слід зазначити, що існують ділянки, де є радіальна і тангенціальна складові індукції, і можна представити перемагнічування як еліптичне [16]. Еліптичне перемагнічування називають змішаним, оскільки його можна уявити як накладення обертального й пульсаційного перемагнічування.

При проектуванні електричних машин користуються таблицями питомих втрат, отриманих на апараті Епштейна при пульсаційному перемагнічуванні 1 кг маси листової сталі при частоті 50 Гц і індукції 1 Тл. Питомі втрати для різних марок сталі наведені в роботах [5; 16].

Через наявність у формулах для визначення втрат у сталі значних емпіричних коефіцієнтів, що враховують обробку сталі, уточнення питомих втрат залежно від характеру перемагнічування окремих ділянок магнітопроводу має сенс лише в особливих випадках.

Для розрахунку втрат в роботі Вольдека А.І. [10] наведені співвідношення, аналогічні тим, які розглянуті у виразах (12) і (13), але з іншими значеннями коефіцієнтів:

- магнітні втрати в ярмі, Вт:

$$\Delta P_a = k_{\partial a} \cdot \rho_{1.0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1.3} \cdot B_a^2 \cdot G_{ca}, \quad (23)$$

- магнітні втрати в зубцях, Вт:

$$\Delta P_z = k_{\partial z} \cdot \rho_{1.0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1.3} \cdot B_z^2 \cdot G_{cz}, \quad (24)$$

де $\rho_{1.0/50}$, Вт/кг, – питомі втрати в сталі при частоті $f = 50$ Гц і індукції $B = 1,0$ Тл;

B_a и B_z – середнє значення індукції в спинці якоря і зубцях, Тл;

G_a та G_z – маси сталі спинки якоря і зубців, кг;

$k_{\partial a}$, та $k_{\partial z}$ – коефіцієнти, що враховують збільшення втрат внаслідок обробки. В машинах постійного струму можна прийняти $k_{\partial a} = 3,6$ і $k_{\partial z} = 4,0$.

Як видно з проведеного аналізу, ряд співвідношень для розрахунку основних втрат в якорі мають схожий вигляд, але відрізняються коефіцієнтами.

До основних втрат у сталі відносять також і втрати в бандажах (якщо вони є) ΔP_{δ} , які рекомендовані до обліку багатьма авторами [1; 3; 8]. Тоді

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_{cm.a} + \Delta P_{\delta}. \quad (25)$$

Бандажі в двигунах типу НБ-418К6 намотують зі спеціального сталевого дроту, що має високу механічну міцність ($180 \text{ кг} / \text{мм}^2$) з контрольованою величиною натягу. Натяг забезпечує притискання провідників до дна пазу з більшою силою, ніж центробіжна сила при обертанні якоря, що забезпечує фіксоване положення обмотки в пазах. Розрахунок бандажа зводиться до визначення загального числа витків бандажного проводу w_{δ} , кількості бандажів m по довжині якоря і довжини бандажної канавки l_{δ} , які знаходять, попередньо визначаючи діаметр бандажного проводу d_{δ} . Діаметр бандажного проводу вибирається за табл. 4 залежно від діаметра якоря, що враховує зростання окружної швидкості, забезпечуючи необхідну міцність [25].

Таблиця 4

Діаметр бандажного дроту якорів тягових двигунів

Діаметр якоря, мм	100-200	201-400	401-600	601-1000	Більше 1000
Діаметр дроту бандажа, мм	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0

Для розрахунку втрат у бандажі попередньо необхідно розрахувати число витків бандажного проводу, використовуючи вагу обмотки, що лежить в пазах якоря за співвідношенням:

$$G_{\partial\delta} = \rho \cdot a \cdot b \cdot N \cdot l_{\delta}, \quad (26)$$

де ρ – щільність міді $8800 \text{ кг} / \text{м}^3$;

a , b – розміри сторін міді провідника, м;

N – число провідників обмотки якоря;

l_{δ} – довжина сердечника якоря, м.

Для двигуна, що розглядається, маса обмотки становить $G_{\partial\delta} = 60,28$ кг. З огляду на незначну величину поля розсіювання в бандажах лобових частин, втратами на цих ді-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

лянках можна знехтувати, тому далі розраховується тільки число витків бандажного проводу по довжині поверхні якоря.

Для розрахунку загального числа витків бандажного проводу якоря використовується співвідношення:

$$w_{\delta} = 1,2 \cdot \left(G_{\delta\delta} \cdot \frac{D_a - h_n}{d_{\delta}^2 \cdot 3000} \right) \cdot \left(\frac{n_{\max}}{1000} \right)^2, \quad (27)$$

де n_{\max} , з міркувань розрахункового запасу міцності бандажа для тягових машин пульсуючого струму, приймають $(1,5 - 3,0) \cdot n_{\text{ном}}$;

d_{δ} – діаметр бандажного проводу згідно з табл. 2 ($d_{\delta} = 1,5$ мм).

Для двигуна НБ-418К6, що розглядається, з урахуванням $n_{\max} = 1,5 \cdot n_{\text{ном}}$ загальне число витків бандажа, намотаних на осердя якоря згідно з (27), становило 124 витка. Практикою встановлено, що по активній довжині якоря бандажі недоцільно робити ширше за 15–20 мм і перекривати ними більш 25–35 % поверхні якоря.

Найбільш докладно розрахунок втрат у бандажах розглянуто в роботах [1; 8; 21]. Він заснований на врахуванні впливу струму, що виникає в стрічці бандажа, внаслідок виникнення електрорушійної сили (ЕРС) під час обертання якоря в магнітному полі. ЕРС, що виникає, можна визначити, В:

$$e = B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot v_a, \quad (28)$$

де v_a – окружна швидкість якоря, м/с;

l_{δ} – ширина бандажної канавки, м:

$$l_{\delta} = d_{\delta} \cdot m_{\delta}, \quad (29)$$

де d_{δ} – діаметр бандажного дроту, м;

m_{δ} – число витків бандажного дроту в одній канавці.

Тоді втрати в розрахованому бандажі можна визначити, Вт:

$$\Delta P_{\delta} = \frac{e^2}{r} \cdot 2p, \quad (30)$$

де $2p$ – число полюсів;

r – опір шляху струму i_b в стрічці бандажа, який приблизно можна визначити, Ом:

$$r = \frac{2 \cdot \tau \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \rho}{0,5 \cdot l_{\delta} \cdot d_{\delta}}, \quad (31)$$

де ρ – питомий опір проводу бандажа. Для сталі $\rho = 1,03 \cdot 10^{-7} - 1,37 \cdot 10^{-7}$ Ом·м;

α – коефіцієнт полюсного перекриття;

τ – полюсний поділ, м:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2p}. \quad (32)$$

Остаточно, після підстановки в (30) значення ЕРС і опору з (28) і (31) отримано вираз для, порівняно, точного обліку втрат в бандажі:

$$\Delta P_{1\sigma} = \frac{\pi \cdot D_a \cdot p \cdot d_\sigma \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 \cdot B_\sigma^2 \cdot l_\sigma^2}{\left(\frac{1}{p} - \frac{\alpha}{2p}\right) \cdot \rho}. \quad (33)$$

За отриманим співвідношенням (33) виконується розрахунок втрат в одній стрічці бандажа. Для отримання остаточного результату необхідно врахувати в співвідношенні (30) число бандажів m і коефіцієнт, що враховує магнітні властивості дроту бандажа C_σ . Для магнітного дроту $C_\sigma = 0,2$, а для немагнітного $C_\sigma = 0,1$ [8].

Тоді

$$\Delta P_\sigma = C_\sigma \cdot m \cdot \Delta P_{1\sigma}. \quad (34)$$

У такому випадку втрати в бандажі для двигуна НБ-418К6 по (34), з огляду на 7 бандажних стрічок, становитимуть $\Delta P_\sigma = 842,51$ Вт.

Для визначення втрат у бандажі використовують також приблизну величину, що становить 10 % від основних втрат у сталі [6], Вт:

$$\Delta P_\sigma = 0,1 \cdot \Delta P_{ст.а}. \quad (35)$$

У сучасних двигунах застосовують склобандажні стрічки, втрат в яких, практично, немає.

Електричні (основні) втрати в обмотках двигуна або втрати в міді є змінними і визначаються струмом, що протікає по ним і активним розрахунковим опором кожної обмотки. При розрахунку слід враховувати, що при визначенні ККД тягового електродвигуна втрати в міді його обмоток згідно ГОСТ 2582-81 повинні бути приведені до робочої температури 115°C для обмоток з ізоляцією класу B і 130°C - для обмоток з ізоляцією класу F і H . В тяговому двигуні НБ-418К6 потужністю 740 кВт, відповідно до паспортних даних, обмотка якоря і компенсаційна обмотка виконані з ізоляцією класу B , а обмотка збудження і додаткових полюсів класу H [26]. Отриманий в розрахунку опір відповідає температурі навколишнього середовища 20°C . Для приведення опору до робочої температури обмоток необхідно застосувати коефіцієнти для мідних провідників, розраховані за співвідношенням, наведеним в [27]:

$$r_2 = r_1 \cdot \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1}, \quad (36)$$

де θ_1 – температура навколишнього середовища (приймається 20°C);

θ_2 – робоча температура, до якої потрібно привести опір;

r_1, r_2 – опори при температурі навколишнього середовища і при робочій температурі, відповідно, Ом.

Тоді

$$r_{(115)} = 1,37 \cdot r_{(20)}, \quad r_{(130)} = 1,43 \cdot r_{(20)}. \quad (37)$$

З урахуванням приведення до робочої температури обмоток якоря, збудження, компенсаційної та додаткових полюсів, сумарні електричні втрати в міді в загальному вигляді можна визначити, Вт:

$$\Delta P_m = I_n^2 \cdot (1,37 \cdot r_a + 1,43 \cdot r_{\text{зб}} + 1,37 \cdot r_{\text{ком}} + 1,43 \cdot r_{\text{д.п}}), \quad (38)$$

де $I_{ном}$ – номінальний струм, А;

$r_a, r_{\text{зб}}, r_{\text{ком}}, r_{\text{д.п}}$ – активні опори обмоток якоря, збудження, компенсаційної і додаткових полюсів відповідно, при температурі навколишнього середовища 20°C .

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Втрати в перехідному щітковому контакті $\Delta P_{щ}$ відносяться до основних електричних втрат, Вт:

$$\Delta P_e = \Delta P_m + \Delta P_{щ}. \tag{39}$$

Втрати в перехідному щітковому контакті визначаються за падінням напруги в щітковому контакті $\Delta U_{щ}$, Вт:

$$\Delta P_{щ} = \Delta U_{щ} \cdot I_{ном}. \tag{40}$$

Падіння напруги під щітками обох полярностей $\Delta U_{щ}$ приймається залежно від марки щітки й залежить від щільності струму в перехідному контакті і матеріалу щітки. Найбільший опір мають тверді вугільно-графітні, графітні та електро-графітовані щітки; найменший – мідно-графітні щітки. Падіння напруги для конкретної марки зазначено в довідниковій літературі [6]. Для щіток ЕГ-61, які встановлені в двигуні НБ-418К6, $\Delta U_{щ} = 3$ В. В даний час в цих двигунах можуть застосовуватися й інші марки щіток, що необхідно враховувати при розрахунку втрат в щітковому контакті [28].

Додаткові втрати $\Delta P_{доd}$ виникають у машині при навантаженні від неврахованих магнітних втрат. При роботі під навантаженням розподіл індукції по полюсному поділу під впливом реакції якоря спотворюється, що підвищує значення магнітних втрат в полюсних наконечниках, однак при наявності компенсаційної обмотки частка цих втрат мінімальна. Інша частина додаткових втрат пов'язана з комутацією при зміні потоку пазового розсіювання комутуваних секцій і впливу вихрових струмів [4]. Врахування цих видів втрат за допомогою математичного опису є складним і недостатньо точним, експериментальне їх визначення також є складним. Тому в практичних розрахунках додаткові втрати визначають у відсотках від втрат у сталі залежно від струму двигуна і враховують коефіцієнтом $k_{доd}$, згідно з таблицею 5 [3; 6; 8].

Таблица 5

Коефіцієнт $k_{доd}$ додаткових втрат від струму навантаження

$I_{доd}/I_{ном}$	0,2	0,6	0,8	1,0	1,3	1,6	2,0
$k_{доd}$	0,22	0,23	0,26	0,30	0,38	0,48	0,65

$$\Delta P_{доd} = k_{доd} \cdot \Delta P_{ст}. \tag{41}$$

Для номінального режиму, що відповідає відношенню $I_{доd}/I_{ном} = 1,0$ із таблиці 2 отримуємо $k_{доd} = 0,3$. Тоді $\Delta P_{доd} = 0,3 \cdot \Delta P_{ст}$.

У роботах деяких авторів [1; 3; 9] розрахунок додаткових втрат для компенсованих машин зводиться до визначення комутаційних втрат $\Delta P_{ком}$ з розрахунком коефіцієнта Фільда k_F , який використовується при врахуванні збільшення втрат у міді якоря при комутації:

$$\Delta P_{ком} = (1 - k_F) \cdot I_a^2 \cdot r_a, \tag{42}$$

де $k_F = 1 + 0,425 \cdot m^2 \cdot \xi^2 \cdot \psi \cdot \frac{l_a}{l_{cp}}$;

$m = 2 \cdot u_k \cdot n_y / n_x$ – число шарів провідників по висоті пазу (u_k – число колекторних пластин на паз, n_x – число провідників по довжині пазу, n_y – число елементарних провідників в ефективному провіднику);

$\xi = h_{ел.пр} \cdot \sqrt{\sum b_m \cdot \pi \cdot f \cdot \lambda_m \cdot \mu_0 / b_n}$ – приведена висота провідника ($h_{ел.пр}$ – висота елементарного провідника, m ; $\sum b_m$ – загальна ширина провідників в пазу (по ширині пазу), m ; f – частота перемагнічування якоря, Гц; λ_m – питома електропровідність міді

при робочій температурі, $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнітна проникність; b_n – ширина паза, м). При робочій температурі 115°C можна прийняти $\xi = 12,8 \cdot h_{\text{ел.лр.}} \cdot \sqrt{\sum b_m \cdot f / b_n}$;

ψ – коефіцієнт, що враховує демпфірування вихрових струмів (рис. 2).

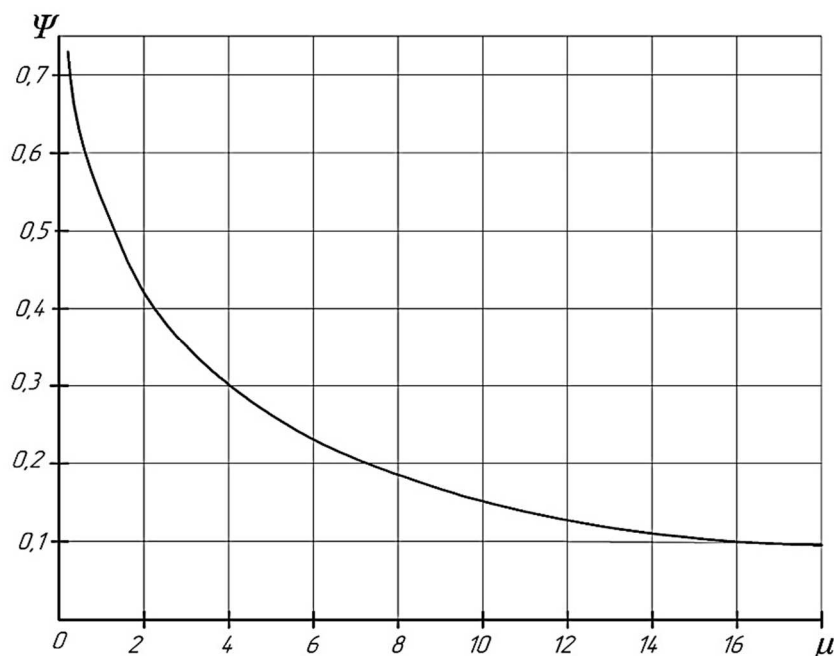


Рис. 2. Визначення коефіцієнта демпфірування вихрових струмів

З причини трудомісткості застосування і недостатньої точності існуючих емпіричних співвідношень комутаційних втрат, в роботах авторів [7; 10] додаткові втрати для машин постійного струму при номінальному навантаженні розраховуються наближено. При відсутності компенсаційної обмотки вони приймаються рівними 1,0 % від потужності, що підводиться, а при наявності компенсаційної обмотки – 0,5 %. Для інших навантажень ці втрати перераховуються пропорційно квадрату струму навантаження.

$$\Delta P_{\text{доп}} = (0,005 - 0,01) \cdot I_a^2 \cdot r_a. \quad (43)$$

Механічні втрати $\Delta P_{\text{мех}}$ складаються із втрат на тертя щіток об поверхню колектора $\Delta P_{\text{тер.к}}$, втрат тертя в підшипниках $\Delta P_{\text{підш}}$ і вентиляційних втрат, що визначаються тертям частин двигуна, які обертаються, об повітря або охолоджуючу рідину та інші види втрат, що пов'язані безпосередньо з забезпеченням вентиляції $\Delta P_{\text{вент}}$, Вт:

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{тер.к}} + \Delta P_{\text{підш}} + \Delta P_{\text{вент}}. \quad (44)$$

Втрати на тертя щіток об поверхню колектору в номінальному режимі визначаються [3; 5; 8-10]:

$$\Delta P_{\text{тер.к}} = \sum S_{\text{щ}} \cdot p_{\text{щ}} \cdot k_{\text{тер}} \cdot v_{\text{к}}, \quad (45)$$

де $\sum S_{\text{щ}}$ – сумарна контактна поверхня всіх щіток, м^2 ;

$p_{\text{щ}}$ – тиск на щітку в залежності від марки за довідковими даними, Па;

$k_{\text{тер}} = 0,15 - 0,30$ – коефіцієнт тертя в залежності від марки щітки;

$v_{\text{к}}$ – окружна швидкість колектору при номінальній частоті обертання, м/с.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Характеристики сучасних щіток марки ЕГ-61, які застосовуються в тягових двигунах НБ-418К6:

- питомий електричний опір – $36 - 60 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$;
- твердість – $25 - 65 \text{ Н}$;
- густина струму – не більше ніж $17 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$;
- коефіцієнт тертя – не більше ніж $0,15$;
- лінійна швидкість – 60 м/с ;
- номінальний тиск (натискання) на щітку – 40 кПа .

З урахуванням характеристик щіток, що застосовуються на двигуні НБ-418К6, площа перетину щіток одного щіткотримача, м^2 :

$$\sum S_{щ} = \frac{2 \cdot I_{ном}}{q \cdot j_{щ}} = \frac{2 \cdot 828,7}{6 \cdot 15 \cdot 10^4} = 0,001841, \quad (46)$$

де $j_{щ}$ – густина струму під щіткою, А/м^2 ;

$q = 2p = 6$ – число щіткотримачів.

Втрати на тертя щіток об поверхню колектору для двигуна НБ-418К6 із щітками ЕГ-61 згідно з (45) становлять:

$$\Delta P_{тер.к} = 6 \cdot 0,001841 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 0,15 \cdot 22,5 = 1491,2 \text{ Вт.}$$

Втрати на тертя в підшипниках кочення $\Delta P_{підш}$ можуть бути розраховані для тягових двигунів за емпіричною формулою [8], Вт :

$$\Delta P_{підш} = 30 \cdot \sqrt[4]{1000 \cdot P_{ном}}, \quad (47)$$

де $\Delta P_{ном}$ – номінальна потужність двигуна, кВт .

Втрати в підшипниках відповідно до (47) для двигуна НБ-418К6 становили $\Delta P_{підш} = 879,87 \text{ Вт}$.

Втрати потужності на тертя в підшипниках з врахуванням втрат тертя якоря об повітря в практичних розрахунках так само оцінюють приблизно величиною $0,2\%$ від підведеної потужності при номінальному режимі [3; 9; 10], Вт :

$$\Delta P_{підш} + \Delta P_{тер.об.} = 0,002 \cdot U \cdot I_{ном}. \quad (48)$$

Відповідно до емпіричного співвідношення (48) втрати на тертя в підшипниках, включаючи втрати тертя якоря об повітря для двигуна, що розглядається, становили

$$\Delta P_{підш} + \Delta P_{тер.об.} = 1574,53 \text{ Вт.}$$

Втрати на вентиляцію $\Delta P_{вент}$ складаються з двох видів втрат. Це втрати на тертя об повітря частин якоря при обертанні машини $\Delta P_{тер.об.}$, що має місце в кожному двигуні, і втрат, пов'язаних безпосередньо з роботою вентилятора і його аеродинамічними властивостями $\Delta P_{р.вент}$.

Втрати на тертя об повітря частин якоря при обертанні машини враховуються так само за емпіричною формулою [8]:

$$\Delta P_{тер.об.} = 7 \cdot D_a^4 \cdot (l_a + \sum l_{\epsilon}) \cdot n_{ном}^3 \cdot 10^{-6}, \quad (49)$$

де D_a – діаметр якоря, м ;

l_a – довжина осердя якоря, м ;

$\sum l_{\epsilon}$ – сумарна довжина вильотів лобових частин обмотки, м .

Для цієї конструкції двигуна втрати на тертя об повітря обертових частин якоря

$$\Delta P_{тер.об.} = 7 \cdot 0,66^2 \cdot (0,4 + 0,28) \cdot 915^3 \cdot 10^{-6} = 691,9 \text{ Вт.}$$

Втрати на тертя в підшипниках і втрати тертя якоря об повітря, що розраховані окремо за співвідношенням (47) і (49), становлять $\Delta P_{\text{підш}} + \Delta P_{\text{тер.об}} = 879,87 + 691,9 = 1571,77$ Вт.

Втрати, спричинені роботою вентилятора $\Delta P_{\text{р.вент}}$, враховуються при розрахунку втрат тягового двигуна з самовентиляцією або при змішаній системі охолодження, тобто в разі, коли вентилятор встановлюється на якорі вентилярованої машини і є елементом її конструкції. При незалежній вентиляції, вентилятор встановлюється поза вентиляваною машиною і приводиться в обертання спеціальним двигуном. Прийнято вважати, що незалежну вентиляцію зручно використовувати на електровозах, а самовентиляцію на електропоїздах, що зумовлюється режимами їх роботи. Враховуючи, що двигун НБ-418К6, який розглядається в роботі, не має вбудованого вентилятора, то втрати, викликані роботою вентилятора враховуватися не будуть.

Коефіцієнт корисної дії тягового електродвигуна визначають за формулою:

$$\eta = 1 - \frac{\sum \Delta P}{P_1}, \quad (50)$$

де P_1 – потужність, що підводиться до двигуна. Для колекторних тягових двигунів постійного струму послідовного збудження $P_1 = U \cdot I_{\text{ном}}$.

Для коректного встановлення співвідношень уточненого розрахунку втрат в тяговому двигуні пульсуючого струму попередньо проведено повний розрахунок розмірів і параметрів двигуна НБ-418К6 за декількома класичними методиками [3; 8; 9]. При розрахунку двигуна з методик різних авторів використовувалися розрахункові співвідношення, що виключали наближене визначення параметрів. У табл. 6 наведені основні параметри розрахованого двигуна і відомих паспортних параметрів даної машини, наведених в довідковій літературі [26].

Таблиця 6

Розрахункові параметри і відомі паспортні дані тягового двигуна НБ-418К6

Найменування параметра	Од. виміру	Розрах. значення	Паспортні дані
1	2	3	4
Номінальна потужність, $P_{\text{ном}}$	Вт	740	740
Номінальна напруга, $U_{\text{ном}}$	В	950	950
Номінальна частота обертання, $n_{\text{ном}}$	об/хв	915	915
Годинний струм двигуна, $I_{\text{ном}}$	А	828,7	820
Число полюсів, $2p$	шт	6	6
Струм якоря, I_a	А	138,12	136,67
Діаметр якоря зовнішній, D_a	м	0,66	0,66
Діаметр якоря внутрішній, D_i	м	0,334	0,334
Довжина осердя якоря, $l_a = l_\delta$	м	0,4	0,4
Перетин провідника якоря, q	мм ²	24,35	24,35
Лінійне навантаження, A	А/м	$4,67 \cdot 10^4$	немає даних
Число пазів осердя якоря	шт	87	87
Розміри паза якоря, $b_n \times h_n$	мм	9,8x42,1	9,8x42,1

1	2	3	4
Розмір мідної проволочки провідників ПЕТВСД, $b \times h$	мм	3,53 x 6,9	3,53 x 6,9
Номінальний момент, $M_{ном}$	кН · м	7,72	7,73
Полюсний розподіл, τ	м	0,345	0,345
Число провідників обмотки якоря, N	шт	696	696
Кількість колекторних пластин, K	шт	348	348
Діаметр колектора, D_k	м	0,528	0,52
Марка щіток	—	ЕГ-61	ЕГ-61
Марка сталі осердя якоря (товщина листів 0,5 мм)	—	1312 (Е22)	1312 (Е22)
Марка сталі осердя додаткових полюсів (товщина листів 0,5 мм)	—	1213 (Е13)	1213 (Е13)
Магнітний потік, Φ_0	Вб	$8,59 \cdot 10^{-2}$	немає даних
Індукція в повітряному зазорі, B_δ	Тл	0,92	немає даних
Індукція в зубцях якоря, B_z	Тл	1,82	немає даних
Опір обмотки якоря, $r_a^{(20)}$	Ом	0,0095	0,011
Опір обмотки збудження, $r_{зб}^{(20)}$	Ом	0,0054	0,00796
Опір додаткових полюсів $r_{д.н}^{(20)}$	Ом	0,0108	немає даних
Опір компенсаційної обмотки $r_{ком}^{(20)}$	Ом	0,0077	немає даних
Опір додаткових полюсів і компенсаційної обмотки $r_{д.н+ком}^{(20)}$	Ом	не розрахов.	0,0119

В осерді якоря двигуна НБ-418К6 передбачено 44 вентиляційних каналу діаметром 30 мм, розташованих в два ряди. Система вентиляції двигуна незалежна. Коефіцієнт корисної дії (ККД) базового двигуна, згідно паспортних даних, становить 94%. Двигун даної модифікації має ізоляцію котушок головних і додаткових полюсів класу нагрівостійкості H , а якоря і компенсаційної обмотки - класу B [26].

За значеннями параметрів двигуна, розрахованим за класичною методикою з табл.6 проведено розрахунок втрат в декількох варіантах по методикам різних авторів [1; 3; 4; 8; 9; 10; 21]. Дані розрахунку втрат за кожним видом і ККД наведені в табл. 7.

На підставі проведеного аналізу використовуваних співвідношень і проведених розрахунків отримані значення сумарних втрат в тяговому двигуні пульсуючого струму і втрати по кожному виду, виконані з врахуванням реальної конструкції і властивостей використовуваних матеріалів двигуна НБ-418К6 потужністю 740 кВт. Встановлено, що найбільш значущі відмінності мають співвідношення розрахунку магнітних втрат з врахуванням вихрових струмів в сталі. Отримані значення основних втрат в сталі в залежності від способу розрахунку і застосовуваних коефіцієнтів, що враховують зміну властивостей матеріалів, знаходяться в діапазоні 5768,12 – 9270,43 Вт. Для подальших розрахунків при визначенні основних втрат в сталі в запропонованій (комбінованій) методиці, рекомендується використовувати співвідношення (22) з розрахунком магнітних втрат в сталі якоря і зубців (21) і (20) з врахуванням застосовуваної марки сталі, що найбільш точно відповідає, сучасним дослідженням і, отже, має більш високу точність [4; 19; 22].

Дані розрахунку втрат і коефіцієнту корисної дії за різними методиками

Найменування параметра	Розрахункові значення по методикам авторів							Розрахункові значення за пропонованою методикою
	Находкін М.Д.	Іоффе А.Б.	Бочаров В. І.	Курбасов А.С.	Алексєєв А.Є.	Копилов І.П.	Вольдек А. І.	
Електричні втрати в міді обмотки якоря $\Delta P_{ел.а(115)}$, Вт	8927,67							8927,67
Електричні втрати в міді обмотки збудження $\Delta P_{ел.зб(130)}$, Вт	5287,92							5287,92
Електричні втрати в міді комп. обмотки $\Delta P_{ел.ком(115)}$, Вт	7279,48							7279,48
Електричні втрати в міді обмоток дод. полюсів $\Delta P_{ел.д.н(130)}$, Вт	10575,85							10575,85
Електричні втрати в перехідному щітковому контакті, $\Delta P_{щ}$, Вт	2486,1							2486,1
Основні (електричні) втрати в міді, $\Delta P_{ел}$, Вт	34557,02							34557,02
Магнітні втрати в сталі осердя якоря в режимі холостого ходу, $\Delta P_{ст.а}$, Вт	7358,58	8427,92	6898,65	5641,56	6387,8	5243,75	8707,58	5243,75
Втрати в бандажах, $\Delta P_{б}$, Вт	842,51			846,23	842,51	524,37	не розрах.	524,37
Основні (магнітні) втрати в сталі, $\Delta P_{ст}$, Вт	8201,09	9270,43	7741,16	6487,79	7230,31	5768,12	8707,58	5768,12
Додаткові втрати в машині при навантаженні, $\Delta P_{дод}$, Вт	2460,32	2781,13	2322,35	1946,33	2169,1	3936,32	3936,32	1730,44
Механічні втрати на тертя щіток об поверхню колектора $\Delta P_{тер.к}$, Вт	1491,2							1491,2
Механічні втрати на тертя в підшипниках з врахуванням втрат тертя якоря об повітря, $\Delta P_{підш} + \Delta P_{тер.об}$, Вт	1574,53	1574,53	1574,53	1574,53	1571,77	1574,53	1574,53	1571,77
Сумарні механічні втрати, $\Delta P_{мех}$, Вт	3065,73	3065,73	3065,73	3065,73	3062,97	3065,73	3065,73	3062,97
Сумарні втрати в двигуні $\sum \Delta P$, Вт	48284,16	49674,31	47686,26	46056,87	47020,95	47327,19	50266,65	45120,10
Коефіцієнт корисної дії, η , %	93,87	93,71	93,95	94,14	94,02	93,99	93,64	94,25

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

При розрахунку електричних втрат розбіжності в розрахунках можуть бути пов'язані з некоректним врахуванням робочої температури кожної обмотки, що позначається на точності визначення їх опорів.

Додаткові втрати доцільно визначати за співвідношенням (41) з вибором коефіцієнту в залежності від навантаження машини згідно табл. 5. Застосування для розрахунку цього виду втрат наближеного способу (43) має значно завищений результат.

При визначенні механічних втрат, а саме втрат на тертя в підшипнику і втрат тертя якоря об повітря, по наближеному співвідношенню (48) ($\Delta P_{\text{підш}} + \Delta P_{\text{тер.об}} = 1574,53$ Вт) і при визначенні окремо втрат на тертя в підшипниках і окремо аеродинамічних втрат при обертанні конструкції якоря всередині машини, використовуючи співвідношення (47) и (49) ($\Delta P_{\text{підш}} + \Delta P_{\text{тер.об}} = 1571,77$ Вт) отримано практично однаковий результат. Це свідчить про можливість використання будь-якого варіанту розрахунку механічних втрат.

Отримані значення ККД для розглянутого тягового двигуна знаходяться в межах 93,64–94,14 % (табл. 7).

У табл. 7 наведено розрахунок втрат і ККД ($\eta = 94,25$ %) за комбінованою (уточненою) методикою з врахуванням рекомендованих вище співвідношень, що забезпечують, на думку авторів, більшу точність, яка і буде взята за основу при проведенні подальших досліджень тягових двигунів пульсуючого струму.

Висновки відповідно до статті. У роботі проведено аналіз існуючих основних методик по розрахунку всіх видів втрат у тяговому двигуні пульсуючого струму НБ-418К6. Проведено повний розрахунок параметрів і характеристик тягового двигуна НБ-418К6 на підставі якого визначено фактичні значення втрат по співвідношенням, запропонованими різними авторами. Втрати в сталі без урахування втрат у сталевих конструкціях бандажів знаходяться в діапазоні 5243,75–8427,92 Вт. Додаткові втрати знаходяться в залежності від основних втрат в сталі і діапазон їх значень 2169,1–3936,32 Вт. Механічні втрати, не залежно від порядку їх розрахунку, мають близькі значення 3062,97–3065,73 Вт.

З урахуванням отриманих розбіжностей розрахунку втрат різними методиками діапазон змін ККД склав 93,64–94,14 %.

Встановлено, що найбільша розбіжність отриманих результатів мають основні (магнітні) втрати в сталі, що пояснюється різними коефіцієнтами обліку марки використовуваної сталі і коефіцієнтами обліку втрат на гістерезис.

Отримані значення кожного виду втрат, можуть бути прийняті за основу для проведення оцінки адекватності моделі при імітаційному моделюванні тягового двигуна пульсуючого струму НБ-418К6 з використанням Simulink.

Визначено комбіновану методику для застосування в розрахунках ККД при проведенні подальших досліджень тягових двигунів. Розрахунок ККД за пропонованою комбінованою методикою склав 94,25 %.

Список використаних джерел

1. Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины (Теория, конструкция, проектирование). М.-Л.: Энергия, 1965. 232 с.
2. Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горяинов Ф. Я. Проектирование электрических машин. Москва: Энергия, 1970. 632 с.
3. Находкин М. Д., Василенко Г. В., Бочаров В. И., Козорезов М. А. Проектирование тяговых электрических машин: учебное пособие для вузов ж.-д. трансп. Москва: Транспорт, 1976. 624 с.
4. Копылов И. П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов. Москва: Юрайт, 2019. 828 с.

5. Копылов И. П. Проектирование электрических машин: учебник для бакалавров: для студентов электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов. Москва: Юрайт, 2012. 766 с.
6. Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П. Проектирование электрических машин: учебное пособие для вузов. Москва: Энергоатомиздат, 1993. 384 с.
7. Копылов И. П. Электрические машины: учеб. для электромех. и электроэнергет. специальностей вузов. Москва: Высшая школа, 2009. 606 с.
8. Алексеев А. Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. Ленинград: Энергия, 1977. 444 с.
9. Курбасов А. С. Проектирование тяговых электродвигателей: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. Москва: Транспорт, 1987. 536 с.
10. Вольдек А. И. Электрические машины: учебник для технических учебных заведений. Ленинград: Энергия, 1978. 832 с.
11. Гольдберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов. Москва: Высш. шк. 2001. 430 с.
12. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений: в 2 ч. Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы. Ленинград: Энергия, 1972. 544 с.
13. Горобченко О. М., Кривошея Ю. В., Гатченко В. О. Розробка комплексної математичної моделі силового кола електровоза з використанням програмного пакету Matlab. *Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта*. 2008. № 13.
14. Gorobchenko O., Tkachenko V. Statistical analysis of locomotives traction motors performance. *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2019. T. 287. P. 04002.
15. Гулак С. О., Ермоленко Е. К. Модель системи Тягова підстанція–контактна мережа–тяговий привід електровоза серії ВЛ-80 Т, К. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології*. 2016. № 28. С. 99–109.
16. Афанасьев А. А. Гистерезисные явления в электротехнической стали. *Вестник Чувашиского Университета И.Н. Ульянова*. 2016. № 1. С. 15–29.
17. Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А., Горчаков Е. В. Тяговые электрические машины и трансформаторы. Москва: Транспорт, 1979. 303 с.
18. Юхимчук В. Д. Технология производства электрических машин: учебное пособие: в 2 кн. Харків: Тимченко, 2006. 560 с.
19. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали. Москва: Энергия, 1974. 240 с.
20. Prus V. V., Zagirnyak M. V., Kolotylo I. A., Miljavec D. Estimate and taking into account change of steel losses in induction motors in process of their aging. *In IEEE EUROCON 2009*. 2009. May. P. 777–782.
21. Магистральные электровозы. Электрические машины и трансформаторное оборудование / Бочаров В. И. и др. Москва: Машиностроение, 1968. 444 с.
22. Суторміна А. О., Прус В. В. Діагностика шихтованих пакетів сталі та сердечників електричних машин індукційним методом при зміні амплітуди та частоти напруги живлення. *Вісник КДПУ: зб. наукових праць*. 2006. Вип. 4. С. 39.
23. Малюк В. П., Катаев В. А., Коробейникова М. Н. Исследование влияния амплитуды магнитной индукции на удельные магнитные потери в стандартных образцах свойств электротехнической стали. *Стандартные образцы*. 2013. № 2.
24. ГОСТ 12119.1-98 Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Методы измерения магнитной индукции и коэрцитивной силы в аппарате Эпштейна и на кольцевых образцах в постоянном магнитном поле. Принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 13–98 от 28 мая 1998 г. Минск).
25. Виноградов Н. В. Обмотчик электрических машин. Москва: Высшая школа. 1969. 224 с.
26. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам. Т. 1 / под ред. А. И. Тищенко. Москва: Транспорт, 1976. 432 с.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

27. Губаревич О. В. Надійність і діагностика електрообладнання: підручник. Сєвєродонецьк: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. 248 с.

28. Губаревич О. В. Деякі напрямки підвищення надійності щітково-колекторного вузла машин постійного струму електрорухомого складу. *Збірник наукових праць за матеріалами VIII-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Транспорт і логістика: Проблеми та рішення» до 100-річчя національної академії наук України, Сєвєродонецьк – Одеса – Вільнюс – Київ, 23-25 травня 2018р.* / Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Одеський національний морський університет. Одеса: КУПРІЄНКО С. В., 2018. С. 27–30.

References

1. Ioffe, A. B. (1965). *Tyagovye elektricheskie mashiny (Teoriia, konstruktsiia, proektirovanie) [Traction electric machines (Theory, construction, design)]*. Moscow: Energy [in Russian].
2. Sergeev, P. S., Vinogradov, N. V., & Goryainov, F. Ya. (1970). *Proektirovanie elektricheskikh mashin [Design of electrical machines]*. Moscow: Energy [in Russian].
3. Nakhodkin, M. D., Vasilenko, G. V., Bocharov, V. I., & Kozorezov, M. A. (1976). *Proektirovanie tyagovykh elektricheskikh mashin [Design of traction electric machines]*. Moscow: Transport [in Russian].
4. Kopylov, I. P. (2019). *Proektirovanie elektricheskikh mashin [Designing electrical machines]*. Moscow: Yurait [in Russian].
5. Kopylov, I. P. (2012). *Proektirovanie elektricheskikh mashin [Designing electrical machines]*. Moscow: Yurait [in Russian].
6. Kopylov, I. P., Klokov, B. K., Morozkin, V. P. (1993). *Proektirovanie elektricheskikh mashin [Designing electrical machines]*. Moscow: Energoatomizdat [in Russian].
7. Kopylov, I. P. (2009). *Elektricheskie mashiny [Electric machines]*. Moscow: Higher School [in Russian].
8. Alekseev, A. E. (1977). *Tyagovye elektricheskie mashiny i preobrazovateli [Electric traction machines and converters]*. Leningrad: Energy [in Russian].
9. Kurbasov, A. S. (1987). *Proektirovanie tyagovykh elektrodvigateley [Design of traction electric motors]*. Moscow: Transport [in Russian].
10. Voldek, A. I. (1978). *Elektricheskie mashiny [Electric machines]*. Leningrad: Energy [in Russian].
11. Goldberg, O. D., Gurin, Y. S., & Sviridenko, I. S. (2001). *Proektirovanie elektricheskikh mashin [Design of electrical machines]*. Moscow: Higher school [in Russian].
12. Kostenko, M. P., Piotrovsky, L. M. (1972). *Elektricheskie mashiny [Electric machines]*. Part 1. DC machines. Transformers. Textbook for students, tech. institutions. Leningrad: Energy [in Russian].
13. Gorobchenko, O. M., Krivosheya, Yu. V., & Gatchenko, V. A. (2008). Rozrobka kompleksnoi matematychnoi modeli sylovoho kola elektrovoza z vykorystanniam prohramnoho paketu Matlab [Development of a comprehensive mathematical model of the electric locomotive power circle using the Matlab software package]. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskoho instituta zheleznodorozhnogo transporta – Collection of scientific works of the Donetsk Institute of Railway Transport*, 13 [in Ukrainian].
14. Gorobchenko, O., & Tkachenko, V. (2019). Statistical analysis of locomotives traction motors performance. *In MATEC Web of Conferences* (Vol. 287, p. 04002). EDP Sciences.
15. Goolak, S. O., Yermolenko, E. K. (2016). Model systemy Tiahova pidstantsiia–kontaktna mezh-tiahovyi pryvid elektrovoza serii VL-80 T, K [System model Traction substation-contact network-traction drive of the electric locomotive of series VL-80 T, K]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnogo ekonomiko-tehnolohichnoho universytetu transportu. Serii: Transportni systemy i tekhnohii – Collection of scientific works of the State economic-technological university of transport. Series: Transport Systems and Technologies*, 28, 99–109 [in Ukrainian].
16. Afanasyev, A. A. (2016). Gisterezisnyie yavleniya v elektrotehnicheskoy stali [Hysteresis phenomena in electrical steel]. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta I.N. Ulyanova – Bulletin of the Chuvash University I.N. Ulianova*, 1, 15-29 [in Russian].
17. Zakharchenko, D. D., Rotanov, H. A., & Gorchakov, E. V. (1979). *Tyagovye elektricheskie mashiny i transformatory [Electric traction machines and transformers]*. Moscow: Transport [in Russian].
18. Yukhimchuk, V. D. (2006). *Tehnologiya proizvodstva elektricheskikh mashin [Technology for the production of electrical machines]*. Kharkiv: Timchenko [in Russian].
19. Druzhinin, V.V. (1974). *Magnitnyie svoystva elektrotehnicheskoy stali [Magnetic properties of electrical steel]*. Moscow: Energy [in Russian].

20. Prus, V. V., Zagirnyak, M. V., Kolotylo, I. A., & Miljavec, D. (2009, May). Estimate and taking into account change of steel losses in induction motors in process of their aging. *In IEEE EUROCON 2009* (pp. 777-782).

21. Bocharov, V. I., Zolotarev, P. A., Kozorezov, M. A., Kuprianov, Yu. V., Kurochka, A. L., & et. al. (1968). *Magistralnyie elektrovozyi. Elektricheskie mashiny i transformatornoe oborudovanie [Trunk electric locomotives. Electric machines and transformer equipment]*. Moscow: Mechanical Engineering [in Russian].

22. Sutormina, A. O., & Prus, V. V. (2006). Diahnostyka shykhtovanykh paketiv stali ta serdechnykh elektrychnykh mashyn induktsiynym metodom pry zmini amplitudy ta chastoty napruhy zhyvleniia [Diagnostics of batch packages of steel and core of electrical machines using the induction method with varying amplitudes and frequencies of life]. *Visnyk KDPU – Visnyk KDPU*, 4, 39 [in Ukrainian].

23. Malyuk, V. P., Kataev, V. A., & Korobeynikova, M. N. (2013). Issledovanie vliyaniya amplitudy magnitnoy induktsii na udelnyie magnitnyie poteri v standartnyih obraztsah svoystv elektrotehnicheskoy stali [Investigation of the effect of magnetic induction amplitude on specific magnetic losses in standard samples of the properties of electrical steel]. *Standard samples – Standartnyie obraztsy*, 2 [in Russian].

24. GOST 12119.1-98 Stal elektrotehnicheskaya. Metodyi opredeleniya magnitnyih i elektricheskikh svoystv. Metodyi izmereniya magnitnoy induktsii i koertsitivnoy silyi v apparate Epshteyna i na koltsevyih obraztsah v postoyannom magnitnom pole. Prinyat Mezghosudarstvennyim Sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii [GOST 12119.1-98 Steel, electrical. Methods for determining magnetic and electrical properties. Methods for measuring magnetic induction and coercive force in an Epstein apparatus and on ring samples in a constant magnetic field. Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification] (1998). Minsk, Belarussia [in Russian].

25. Vinogradov, N. V. (1969). *Obmotchik elektricheskikh mashin [The wrapper of electrical machines]*. Moscow: Higher School [in Russian].

26. Tishchenko A. I. (Ed.). (1976). *Spravochnik po elektropodvizhnomu sostavu, teplovozam i dizelpoezdam [Handbook of electric rolling stock, diesel locomotives and diesel trains]*. (Vol. 1). Moscow: Transport [in Russian].

27. Gubarevych, O. V. (2016). *Nadiinist i diahnostyka elektroobladnannia [Reliability and diagnostics of electrical equipment]*. Severodonetsk: Publishing House of SNU them. V. Dahl [in Ukrainian].

28. Gubarevych, O. V. (2018). Deiaki napriamky pidvyshchennia nadiinosti shchitkovokolektornoho vuzla mashyn postiinoho strumu elektrorukhomoho skladu [Some directions of increasing the reliability of the brush-collector unit of DC machines of electric rolling stock]. *Zbirnyk naukovykh prats za materialamy VIII-yi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Transport i lohistyka: Problemy ta rishennia» do 100-richchia natsionalnoi akademii nauk Ukrainy, Sievierodonetsk – Odesa – Vilnius – Kyiv – Collection of scientific works on the materials of the VII International Scientific-Practical Conference "Transport and Logistics: Problems and Solutions" To the 100th anniversary of the National Academy of Sciences of Ukraine, Severodonetsk - Odessa - Kyiv*, (May 23-25, 2018). (pp. 27–30). Odessa: Kupriyenko S. V. [in Ukrainian].

UDC 629.429.3:621.313

Oleg Gubarevych, Sergey Goolak, Oleksandr Gorobchenko, Inna Skliarenko

REFINED APPROACH TO THE LOSSES CALCULATION OF PULSATING CURRENT TRACTION ENGINE

Relevance of the research. To determine the efficiency and the losses of the pulsating current traction engine there are a number of calculating methods recommended by various authors. The ratios given in various methods for calculating losses have some discrepancies, moreover, it is recommended to apply different ranges of normalization coefficients that are accepted in the same calculation formulas, which however, leads to significant variations in the final results. Nevertheless, for preliminary, qualitative assessment, any of these methods fully correspond to requirements. However, in order to make technical decisions at the engineering and upgrading stage of construction, mostly, while analyzing the impact of power, operating modes and control on engine parameters, it is advisable to adhere to a unified approach when calculating losses in order to relevantly compare the results obtained by various researchers that are applying various mathematical models.

Problem setting. Issues of analysis and refinement of calculation of losses in traction engines in a single methodological order, as well as representation of the discrepancies level of the results obtained by applying different ratios, especially given the constant modernization during research and modeling of pulsating current traction engine in railway transportation.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Actual scientific researches and issues analysis. A group of leading authors who dealt with the design and calculation of DC traction motors provide the ratio for calculating the most significant type of loss - the main loss in steel. In the general form of relations or in some coefficients there are differences, and most importantly, they differ in the final result.

Uninvestigated parts of general matters defining. Accurate determination of power losses in engines, given the current state of affairs, is a task in which it is impossible to determine the only correct result. This is due to the fact that manufacturers do not provide the necessary information in the reference literature on the calculation method, and indicate the measured parameters in the passport data.

Purpose of the research. The purpose of this study is to analyze existing methods of calculations of all types of losses of pulsating current traction engine. That will clarify and put in order the procedure for calculation and obtain the values of the engine loss parameters for use in further researches.

Presentation of the main material. The analysis of ratios for the calculation of all types of losses, considered in various methods, on example of the traction engine NB-418K6 with capacity of 740 kW.

Conclusions and suggestions. Based on the analysis of ratios and calculations applied, the values of the total losses in the pulsating current traction engine and the losses for each component type are obtained, considering the real construction and properties of the materials used in the NB-418K6 engine. It has been established that the most significant differences are in the calculation of magnetic losses ratios with different allowances for eddy currents in steel. When calculating the electric losses, the discrepancies in the calculations may be due to incorrect consideration of the actual operating temperature of each winding, which affects the accuracy of determination of their resistances.

Also, was conducted an analysis of the calculation of incremental and mechanical losses based on the specified engine applying various ratios. The obtained values of the considered efficiency of the traction engine calculated using various methods, are varying in the range of 93.64-94.14 %. Based on the calculations and loss analysis, a combined technique is recommended for subsequent application and efficiency assessment in further researches of traction engines. The values of efficiency calculation, by combination method, for tested engine was 94.25 %. The obtained values of each type of loss can be taken as the basis for assessing the adequacy of the model during simulation of the pulsating current traction engine NB-418K6 using Simulink.

Keywords: traction engine, pulsating current, magnetic losses, electrical losses, additional losses of the armature core, specific magnetic losses

Fig.: 2. Table:7. References: 28.

Губаревич Олег Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електрообладнання та автоматики водного транспорту», Державний університет інфраструктури та технологій (вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна).

Gubarevych Oleg – PhD in Technical Sciences, Associate Professor in Department of Electrical Equipment and Automation of Water Transport State University of Infrastructure and Technology (9 Kyrylivska Str., 04071 Kyiv, Ukraine).

E-mail: oleg.gbr@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7864-0831>

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Oleg_Gubarevych

Гулак Сергій Олександрович – старший викладач, кафедра «Тяговий рухомий склад залізниць» Державний університет інфраструктури та технологій (вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна).

Goolak Sergey – Senior Lecturer, Department of traction rolling stock of railways State University of Infrastructure and Technology (9 Kyrylivska Str., 04071 Kyiv, Ukraine).

E-mail: sgoolak@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2294-5676>

Горобченко Олександр Миколайович – доктор технічних наук, доцент кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць», Державний університет інфраструктури та технологій (вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна).

Gorobchenko Oleksandr – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of traction rolling stock of railways, State University of Infrastructure and Technology (9 Kyrylivska Str., 04071 Kyiv, Ukraine).

E-mail: gorobchenko.a.n@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9868-3852>

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/O_Gorobchenko

Склярєнко Інна Юрїївна – кандидат педагогічних наук, доцент, старший науковий співробітник науково-дослідного сектору, Державний університет інфраструктури та технологій (вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна).

Skliarenko Inna – PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Research Sector, State University of Infrastructure and Technologies (9 Kyrylivska Str., 04071 Kyiv, Ukraine).

E-mail: innakdvt@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1428-1793>

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Inna_Skliarenko