

УДК 629.423.31-048.24

АФАНАСОВ А.М., д.т.н., доцент (ДНУЖТ)

Определение магнитных потерь в тяговых двигателях электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта

Afanasov A., Dr. Eng., Associated Professor (DNURT)

Determination of magnetic loss in traction motors of electric rolling trunk of main and industrial transport

Введение

Задача определения магнитных потерь в тяговых двигателях электроподвижного состава является одной из важных как для проектирования электродвигателей, так и для анализа режимов их нагружения при эксплуатации. Магнитные потери определяют как коэффициент полезного действия тяговой электромашины, так и их тепловое состояние.

Цель работы

Целью данной работы является определение универсальных характеристик

магнитных потерь в тяговых электрических машинах, использование которых позволит упростить как процедуру их проектирования, так и методику анализа их теплового состояния в условиях эксплуатации.

Методика исследования

К магнитным потерям в тяговых электрических машинах относятся потери в ярме и зубцах сердечника якоря, а также потери в стали полюсных наконечников главных полюсов, обусловленные зубчатым строением якоря и самого полюсного наконечника.

Наиболее широко известна формула для определения магнитных потерь в виде [1, 2]

$$\Delta P_{\text{маг}} = (2,4 \div 2,7)(m_a p_a + m_z p_z), \quad (1)$$

где m_a , m_z – массы стали ярма и зубцов якоря соответственно;

p_a , p_z – удельные потери в стали ярма и зубцов якоря соответственно.

Удельные потери в каждом из элементов могут быть определены по формулам:

$$p_a = p_{a\Gamma} + p_{aB}; \quad (2)$$

$$p_z = p_{z\Gamma} + p_{zB}, \quad (3)$$

где $p_{a\Gamma}$, $p_{z\Gamma}$ – удельные потери от гистерезиса в ярме и зубцах якоря соответственно;

p_{aB} , p_{zB} – удельные потери от вихревых токов в ярме и зубцах якоря соответственно.

Определяются перечисленные составляющие удельных магнитных потерь следующим образом [1]:

$$p_{a\Gamma} = 0,044 f \cdot B_a^2; \quad (4)$$

$$p_{z\Gamma} = 0,044 f \cdot B_z^2; \quad (5)$$

$$p_{aB} = 5,6 \left(\frac{f}{100} \right)^2 \cdot B_a^2; \quad (6)$$

$$p_{zB} = 5,6 \left(\frac{f}{100} \right)^2 \cdot B_z^2, \quad (7)$$

где f – частота перемагничивания стали якоря;

B_a , B_z – индукции в ярме и зубцах якоря соответственно.

Объединив формулы (1) – (7), после преобразований получим

$$\Delta P_{\text{маг}} = (2,4 \div 2,7)(0,044 f + 0,00056 f^2)(m_a B_a^2 + m_z B_z^2). \quad (8)$$

Индукции в рассматриваемых элементах могут быть определены как:

$$B_a = \frac{\Phi}{S_a}; \quad (9)$$

$$B_z = \frac{\Phi}{S_z}, \quad (10)$$

где Φ – магнитный поток тягового электродвигателя;

S_a , S_z – площади поперечного сечения соответствующих элементов.

Магнитный поток может быть найден из формулы для э. д. с.

$$E = c \Phi \omega, \quad (11)$$

где c – конструктивная постоянная электромашины;

ω – угловая скорость вращения якоря.

Конструктивная постоянная определяется как [3]

$$c = \frac{pN}{2\pi a}, \quad (12)$$

где p и a – число пар полюсов и параллельных ветвей электромашины соответственно;

N – число активных проводников якоря.

Угловая скорость вращения якоря может быть выражена через частоту перемагничивания якоря f как [3]

$$\omega = \frac{2\pi}{p} \cdot f. \quad (13)$$

Объединив формулы (11) – (13), после преобразований получим выражение для магнитного потока электромашины в виде зависимости от э. д. с. и частоты перемагничивания

$$\Phi = \frac{a \cdot E}{N \cdot f}. \quad (14)$$

Объединив формулы (8) - (10) и (14), после преобразований получим выражение для определения магнитных потерь в виде

$$\Delta P_{\text{маг}} = (0,106 \div 0,119) \frac{a}{N} \left(\frac{m_a}{S_a^2} + \frac{m_z}{S_z^2} \right) \left(\frac{1}{f} + 0,0127 \right) \cdot E^2. \quad (15)$$

Выполнив замену

$$K_M = (0,106 \div 0,119) \frac{a}{N} \left(\frac{m_a}{S_a^2} + \frac{m_z}{S_z^2} \right), \quad (16)$$

получим более простое выражение

$$\Delta P_{\text{маг}} = K_M \cdot \left(\frac{1}{f} + 0,0127 \right) \cdot E^2. \quad (17)$$

Заметим, что K_M – постоянная для данной электромашины. Таким образом, магнитные потери в тяговой электромашине вне зависимости от вида её возбуждения пропорциональны квадрату э. д. с. и выражению $\left(\frac{1}{f} + 0,0127 \right)$, где f измеряется в герцах.

$$\Delta P_{\text{маг}} \propto \left(\frac{1}{f} + 0,0127 \right) \cdot E^2. \quad (18)$$

Для большинства тяговых электромашин э. д. с. с приемлемой для данного анализа степенью допущений можно счи-

тать приблизительно равной напряжению на якоре U [1]. При этом ошибка для режимов работы электромашины, близких к номинальному, не будет превышать 4 %.

$$E \approx U. \quad (19)$$

Тогда магнитные потери в тяговой электромашине будут пропорциональны квадрату напряжения

$$\Delta P_{\text{маг}} \propto \left(\frac{1}{f} + 0,0127 \right) \cdot U^2. \quad (20)$$

Результаты исследования

Выражение (20), полученное в данном анализе, даёт возможность построить универсальную зависимость магнитных потерь в тяговых электродвигателях в относительных единицах от частоты перемагничивания якоря в герцах.

Магнитные потери в относительных единицах могут быть определены по формуле

$$\Delta p_{\text{маг}} = \frac{1}{f} + 0,0127. \quad (21)$$

Результаты расчета зависимости $\Delta p_{\text{маг}}(f)$ по формуле (21) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета зависимости $\Delta p_{\text{маг}}(f)$

f , Гц	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\Delta p_{\text{маг}}$, о.е.	0,113	0,063	0,046	0,038	0,033	0,029	0,027	0,025	0,024	0,023

Учитывая, что значения $\Delta p_{\text{маг}}$ получены в относительных единицах, и для удобства пользования зависимостью есть смысл привести относительные потери $\Delta p_{\text{маг}}$ к частоте перемагничивания $f=50$ Гц. Эта частота приблизительно

соответствует часовому режиму работы многих современных шестиполусных тяговых электродвигателей электровозов.

После преобразований получим новые, более удобные, значения $\Delta p_{\text{м}/50}$ в относительных единицах, которые приве-

дены в табл. 2. График полученной зависи- мости приведен на рис. 1.

Таблица 2

Результаты расчета универсальной зависимости $\Delta p_{M/50}(f)$

f , Гц	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\Delta p_{M/50}$, о.е.	3,45	1,92	1,41	1,15	1	0,898	0,825	0,77	0,728	0,694

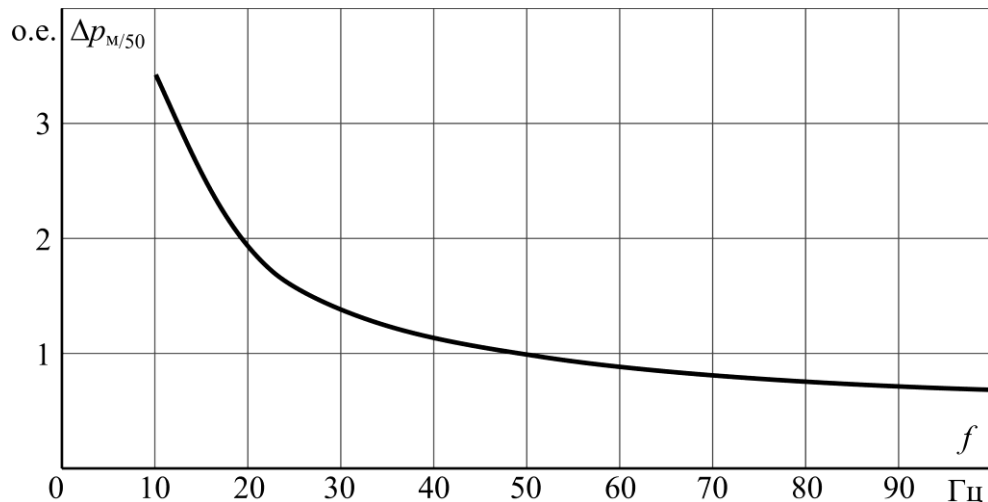


Рис. 1. Универсальная зависимость $\Delta p_{M/50}(f)$

Отметим, что полученная универсальная зависимость $\Delta p_{M/50}(f)$ является общей для всех тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока вне зависимости от способа их возбуждения (последовательное, параллельное, смешанное). Она может использоваться как для двигательного, так и генераторного режимов работы электромашин.

Формула для определения относительных магнитных потерь, приведенных к частоте перемагничивания, равной 50 Гц (табл. 2), будет иметь вид

$$\Delta p_{M/50} = \frac{30,8}{f} + 0,385. \quad (22)$$

Эта же формула может быть преобразована к виду, удобному для проведения расчетов магнитных потерь тяговых электродвигателей через частоту вращения в об/мин.

$$n = \frac{60}{p} \cdot f. \quad (23)$$

Для шестиполусных тяговых двигателей при $p=3$

$$n = 20f. \quad (24)$$

Подставив (24) в (23), получим формулу для относительных магнитных потерь, приведенных к частоте вращения якоря $n=1000$ об / мин в виде

$$\Delta p_{M/50} = \frac{615}{n} + 0,385. \quad (25)$$

Результаты расчета по формуле (25) приведены в табл. 3, а графически эта же зависимость представлена на рис. 2.

Таблиця 3

Результаты расчёта универсальной зависимости $\Delta p_{M/50} = f(n)$

n , об/мин	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$\Delta p_{M/50}$, о.е.	3,45	1,92	1,41	1,15	1	0,898	0,825	0,77	0,728	0,694

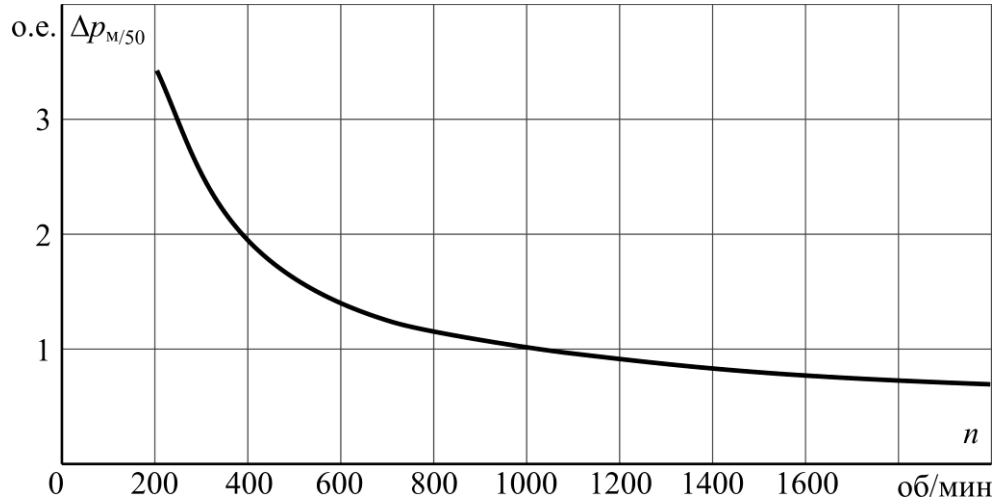


Рис. 2. Универсальная зависимость $\Delta p_{M/50} = f(n)$ для шестиполусных тяговых электродвигателей

Для проверки адекватности полученной характеристики произведем по ней расчет зависимости магнитных потерь двигателя ДТК-820 от частоты вращения его якоря при номинальном напряжении, равном 1000 В. В качестве исходных данных будем использовать значения магнитных потерь, полученные для часовой частоты вращения якоря при проведении квалификационных испытаний данного тягового электродвигателя.

Магнитные потери при нормальном поле в часовом режиме $\Delta P_{M\check{c}} = 9060$ Вт.

Часовая частота вращения якоря электродвигателя $n_{\check{c}} = 920$ об / мин.

Частота перемангничивания якоря в часовом режиме $f_{\check{c}} = 46$ Гц.

Значения $\Delta p_{M/50}$, соответствующие частоте 46 Гц, $\Delta p_{M\check{c}} = 1,06$ о.е.

Результаты расчета зависимости $\Delta P_{\text{маг}} = f(n)$ для тягового электродвигателя ДТК-820 приведены в табл. 4.

Таблиця 4

Результаты расчёта зависимости $\Delta P_{\text{маг}} = f(n)$ для тягового электродвигателя ДТК-820

n , об/мин	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$\Delta P_{\text{маг}}$, Вт	29460	16390	12030	9850	8550	7680	7050	6580	6220	5930

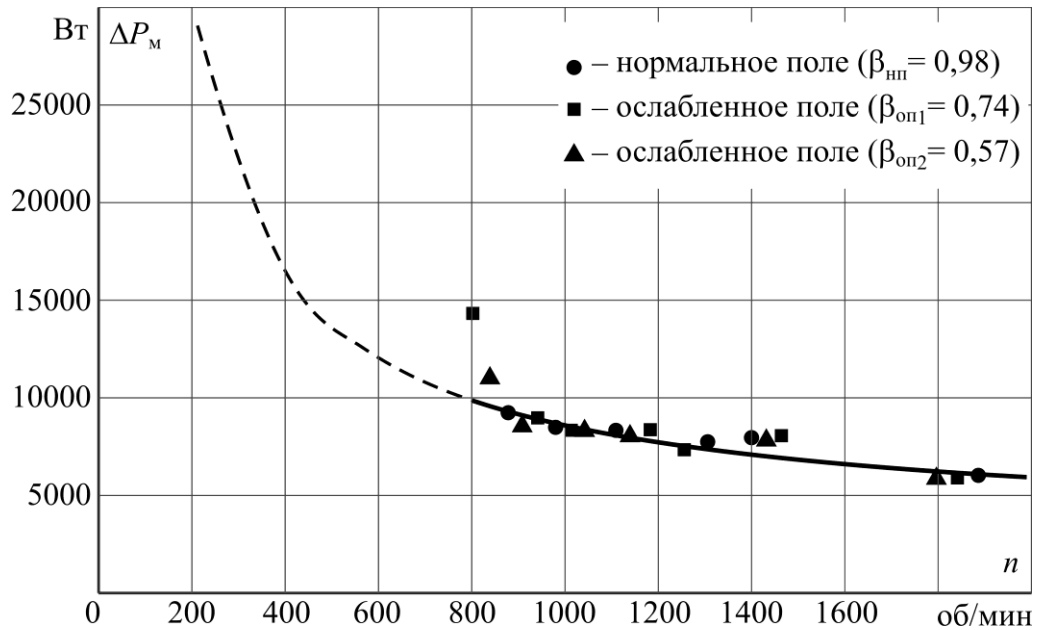


Рис. 3. Реальная и расчётная зависимости $\Delta P_{\text{маг}} = f(n)$ для тягового электродвигателя ДТК-820

Графически эта зависимость представлена на рис. 3 в виде непрерывной кривой. Отдельными маркерами на этом же рисунке показаны значения магнитных потерь, полученные в результате квалификационных испытаний этого электродвигателя. Приведенные данные получены для номинального значения напряжения на тяговом двигателе и соответствуют трем различным режимам ослабления поля: $\beta_{нп} = 0,98$; $\beta_{оп1} = 0,74$; $\beta_{оп2} = 0,57$.

Как видно из рис. 3, магнитные потери при постоянном напряжении практически не зависят от степени ослабления поля тягового двигателя. Совпадение данных эксперимента с результатами расчетов в диапазоне частот от 800 об/мин и выше практически полное. Плохое совпадение теоретических результатов и данных эксперимента наблюдается при частотах вращения, близких к 800 об/мин. Здесь необходимо отметить, что этим частотам при номинальном напряжении, для которого приведены данные, соответствуют значения тока якоря, намного превышающие часовой ток тягового двигателя.

Участок кривой зависимости $\Delta P_{\text{маг}}(n)$, соответствующий частотам

вращения менее 800 об/мин, для номинального напряжения является фиктивным именно по причине нереально больших значений тока якоря. На рис. 3 этот участок показан пунктирной линией. При напряжениях, меньших номинального значения, этот участок универсальной характеристики будет реальным и может использоваться в расчетах магнитных потерь в тяговых электромашинах.

Выводы

Проведенный анализ позволяет сделать выводы о том, что при постоянном напряжении на зажимах тягового электродвигателя потери от вихревых токов не зависят от частоты вращения якоря, а потери от гистерезиса – обратно пропорциональны частоте его вращения.

При этом потери на вихревые токи пропорциональны квадрату напряжения и не зависят от частоты вращения якоря, а потери на гистерезис пропорциональны квадрату напряжения при фиксированной частоте вращения якоря.

Данные выводы справедливы как для двигательного, так и генераторного режимов работы тяговых электромашин при

любом способе их возбуждения. Результаты проведенного анализа могут быть использованы для определения магнитных потерь в тяговых электрических машинах при любых режимах их эксплуатации или испытаний.

Список литературы:

1. Проектирование тяговых электрических машин [Текст] / под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
2. Курбасов, А. С. Проектирование тяговых электродвигателей [Текст] / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. – М.: Транспорт, 1987. – 535 с.
3. Вольдек, А. И. Электрические машины [Текст] / А. И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 839 с.

Spisok literatury:

1. Proektirovanie tyagovykh elektricheskikh mashin [Tekst] / pod red. M. D. Nakhodkina. – M.: Transport, 1976. – 624 s.
2. Kurbasov, A. S. Proektirovanie tyagovykh elektrodvigatelay [Tekst] / A. S.

Kurbasov, V. I. Sedov, L. N. Sorin. – M.: Transport, 1987. – 535 s.

3. Voldek, A. I. Elektricheskie mashiny [Tekst] / A. I. Voldek. – L.: Energiya, 1974. – 839 s.

Аннотации:

Приведено обоснование возможности использования универсальных характеристик магнитных потерь в тяговых электрических двигателях электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта.

Ключевые слова: электроподвижной состав, тяговый двигатель, магнитные потери, гистерезис, вихревые токи, универсальные характеристики.

Наведено обґрунтування можливості використання універсальних характеристик магнітних втрат в тягових електричних двигунах електрорухомого складу магістрального та промислового транспорту.

Ключові слова: електрорухомий склад, тяговий двигун, магнітні втрати, гістерезис, віхрові струми, універсальні характеристики.

The substantiation of possibility of using the universal characteristics of the magnetic loss of traction electric motors of main and industrial transport is resulted.

Keywords: electrorolling stock, traction motor, magnetic losses, hysteresis, eddy currents, universal characteristics.