

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:

$$p_a = p_{aГ} + p_{aВ}; \quad (2)$$

$$p_z = p_{zГ} + p_{zВ}, \quad (3)$$

где  $p_{aГ}, p_{zГ}$  – удельные потери от гистерезиса в ярме и зубцах якоря соответственно;

$p_{aВ}, p_{zВ}$  – удельные потери от вихревых токов в ярме и зубцах якоря соответственно.

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

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

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

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

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

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  $\Phi$  – 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 электромашин;

$\omega$  – 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 электромашин 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 электромашин 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 шестиполюсных тяговых электродвигателей электровозов.

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

дены в табл. 2. График полученной зависимости 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

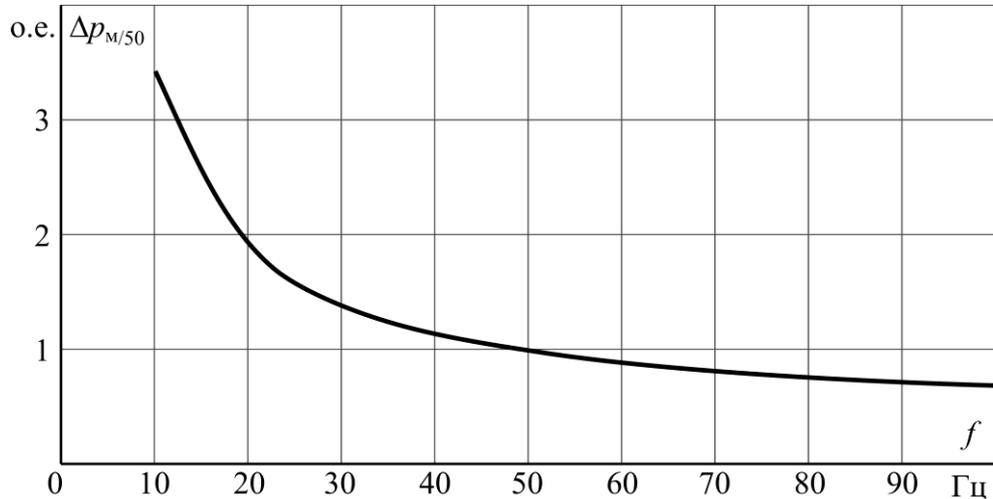


Рис. 1. Универсальная зависимость  $\Delta p_{M/50}(f)$

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 шестиполюсных 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.

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

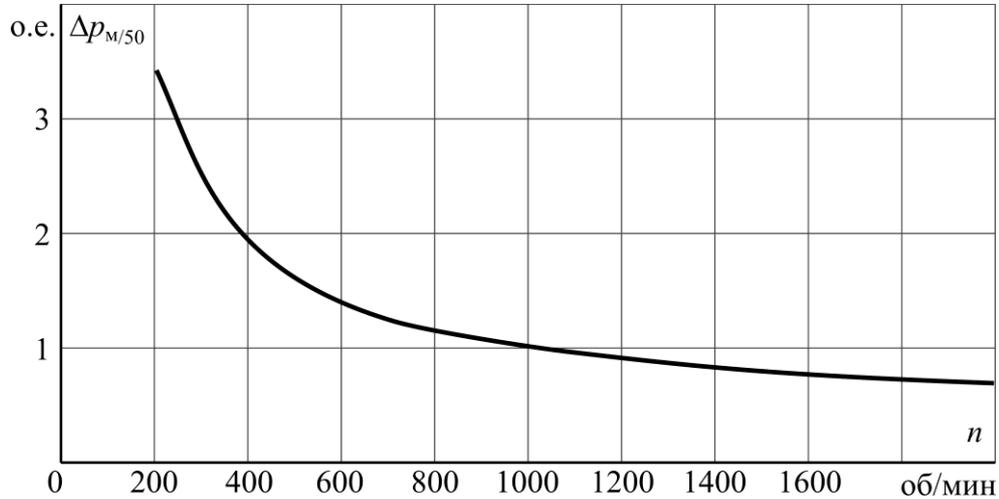


Рис. 2. Универсальная зависимость  $\Delta p_{M/50} = f(n)$  для шестиполусных тяговых электродвигателей

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  $\Delta P_{Mч} = 9060$  Вт.

Часовая частота вращения якоря электродвигателя  $n_{ч} = 920$  об / мин.

Частота перемагничивания якоря в часовом режиме  $f_{ч} = 46$  Гц.

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

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

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

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

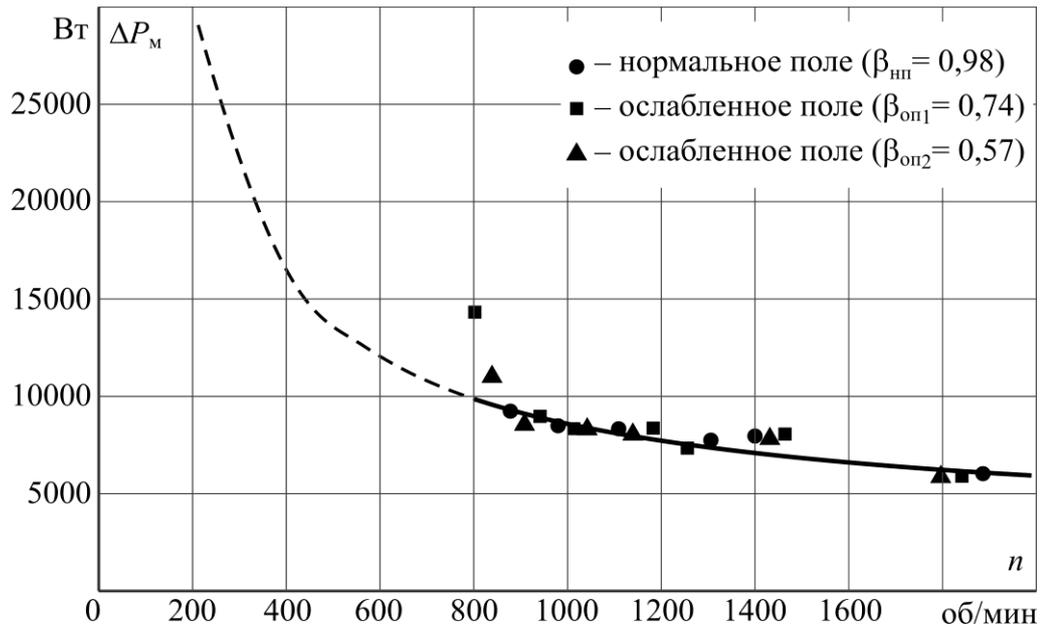


Рис. 3. Реальная и расчётная зависимости  $\Delta P_{\text{маг}} = f(n)$  для тягового электродвигателя ДТК-820

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:  $\beta_{\text{нп}} = 0,98$ ;  $\beta_{\text{оп1}} = 0,74$ ;  $\beta_{\text{оп2}} = 0,57$ .

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.