

## УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ В ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Наведено аналіз залежності магнітних втрат у тягових електродвигунах від частоти перемагнічування якоря. Запропоновано універсальну характеристику магнітних втрат, приведених до частоти перемагнічування 50 Гц.

Приведен анализ зависимости магнитных потерь в тяговых электродвигателях от частоты перемагничивания якоря. Предложена универсальная характеристика магнитных потерь, приведенных к частоте перемагничивания 50 Гц.

The analysis of dependence of the magnetic losses in hauling electric motors on the frequency of armature remagnetization is presented. A universal characteristics of the magnetic losses reduced to the frequency of remagnetization of 50 Hertz is offered.

К магнитным потерям в тяговых электрических машинах (ТЭД) 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]:

$$\Delta P_m = (2,4 \div 2,7)(m_a p_a + m_z p_z), \quad (1)$$

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:

$$p_a = p_{ар} + p_{ав}; \quad (2)$$

$$p_z = p_{зг} + p_{зв}, \quad (3)$$

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

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

Определяются перечисленные составляющие удельных магнитных потерь следующим образом:

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

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

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

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

где  $f$  – частота перемагничивания стали якоря;

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

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

$$\Delta P_m = (2,4 \div 2,7) (0,044 f + 0,00056 f^2) \times \\ \times (m_a B_a^2 + m_z B_z^2). \quad (8)$$

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 электромашины;

$\omega$  – угловая скорость вращения якоря.

Конструктивная постоянная определяется как

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

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

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

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

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

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:

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

Заметим, что  $K_m$  – постоянная для данной

электромашин. 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:

$$\Delta P_m \sim \left( \frac{1}{f} + 0,0127 \right) \cdot E^2. \quad (18)$$

Для большинства тяговых электромашин э.д.с. с приемлемой для данного анализа степенью допущений можно считать приблизительно равной напряжению на якоре  $U$ . При этом ошибка для режимов работы электромашин, близких к номинальному, не будет превышать 4 %:

$$E \approx U.$$

Тогда магнитные потери в тяговой электромашине будут пропорциональны квадрату напряжения:

$$\Delta P_m \sim \left( \frac{1}{f} + 0,0127 \right) \cdot U^2. \quad (19)$$

Выражение (19), 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:

$$\Delta p_m = \frac{1}{f} + 0,0127. \quad (20)$$

Результаты расчета зависимости  $\Delta p_m(f)$  по формуле (20) приведены в табл. 1.

Таблица 1

$f$ , Гц	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\Delta p_m$ , 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  $\Delta p_m$  получены в относительных единицах, и для удобства пользования зависимостью есть смысл привести относительные потери  $\Delta p_m$  к частоте перемагничивания  $f = 50$  Гц. Это частота приблизительно соответствует часовому режиму рабо-

ты многих современных шестиполюсных тяговых электродвигателей электровозов.

После преобразований получим новые, более удобные, значения  $\Delta p_{m/50}$  в относительных единицах, которые приведены в табл. 2.

График полученной зависимости приведен на рис. 1.

Таблица 2

$f$ , 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

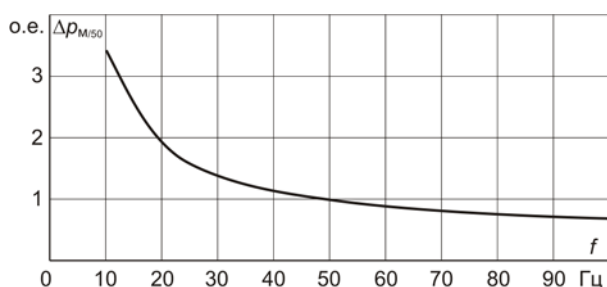


Рис. 1

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

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

$$\Delta p_{M/50} = \frac{30,8}{f} + 0,385. \quad (21)$$

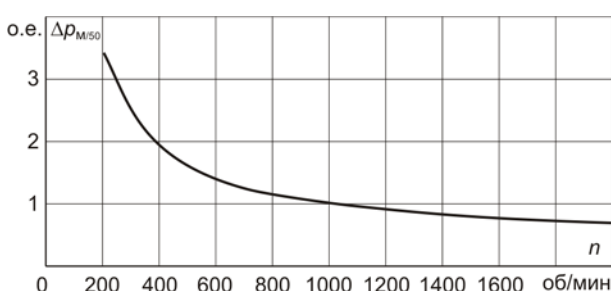


Рис. 2

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 ква-

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

$$n = \frac{60}{p} \cdot f. \quad (22)$$

Для шестиполюсных тяговых двигателей при  $p = 3$

$$n = 20f. \quad (23)$$

Подставив (23) в (21), получим формулу для относительных магнитных потерь, приведенных к частоте вращения якоря  $n = 1000$  об/мин в виде:

$$\Delta p_{M/50} = \frac{615}{n} + 0,385. \quad (24)$$

Результаты расчета по формуле (24) приведены в табл. 3, а графически эта же зависимость представлена на рис. 2.

Таблица 3

$n$ , 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

лификационных испытаний данного тягового электродвигателя.

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

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

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

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

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

Графически эта зависимость представлена на рис. 3 в виде непрерывной кривой. Отдельными маркерами на этом же рисунке показаны значения магнитных потерь, полученные в ре-

зультате квалификационных испытаний этого же электродвигателя. Приведенные данные получены для номинального значения напряже-

ния на тяговом двигателе и соответствуют трем различным режимам ослабления поля:

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

Таблица 4

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

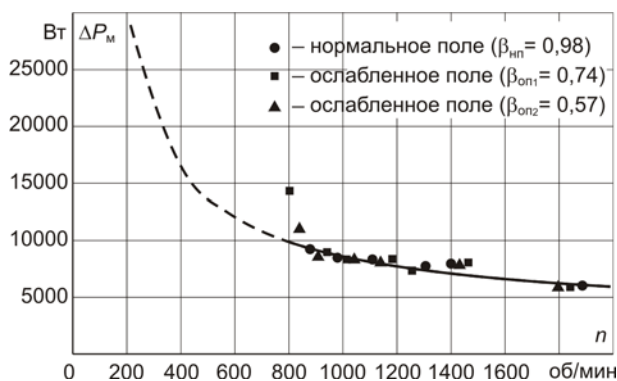


Рис. 3

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  $\Delta P_m(n)$ , 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 электромашин.

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 для генераторного режима работы тяговых электромашин при любом режиме их возбуждения.

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

Независимость величины магнитных потерь в тяговых электромашин от способа их возбуждения обеспечивает адекватность результатов их тепловых испытаний на стендах взаимной нагрузки с использованием регуляторов ослабления поля [2]. Использование таких регуляторов, в свою очередь, позволяет при взаимной нагрузке испытуемых электромашин применять всего один источник электрической или механической мощности. Такие схемы имеют меньшую себестоимость и позволяют снизить расходы электроэнергии на испытания по сравнению с традиционными вариантами стенов взаимной нагрузки с использованием двух источников мощности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проектирование тяговых электрических машин [Текст] / под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
2. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин [Текст] / Г. К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.

Поступила в редколлегию 15.01.2010.  
Принята к печати 19.01.2010.