

УДК 629.423.1:621.313.333

Расчетная методика определения потерь в асинхронном тяговом двигателе электровоза при изменяющейся нагрузке

А. А. Зарифьян¹, П. Г. Колпахчян²

¹ООО «ТМХ Инжиниринг», Российская Федерация, 141009, Московская обл., Мытищи, ул. Колонцова, 4

²Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Зарифьян А. А., Колпахчян П. Г. Расчетная методика определения потерь в асинхронном тяговом двигателе электровоза при изменяющейся нагрузке // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 81–91. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-81-91

Аннотация

Цель: В работе [1] выполнено экспериментальное изучение энергетической эффективности асинхронного тягового привода электровозов при изменяющейся нагрузке. В настоящей статье поставлена задача разработки методики расчетного определения потерь в асинхронном тяговом двигателе (АТД) при питании от преобразователя в зависимости от полезной нагрузки. **Методы:** При питании АТД от преобразователя, когда напряжения и токи имеют несинусоидальную форму, определение потерь является сложной задачей, так как необходим учет значительного количества факторов. Использовался подход, основанный на разделении потерь и использовании результатов экспериментов. Для расчета потерь использовался применяемый в теории электрических машин подход, основанный на разделении потерь, которые состоят из электрических (потери в меди), магнитных (потери в стали), механических и дополнительных. Поскольку ток статора содержит высшие гармоники, электрические потери в обмотке статора определяются с учетом эффекта вытеснения тока. Для определения величины магнитных потерь выполняется определение гармонического состава потокоцепления в воздушном зазоре, вычисляются и суммируются потери от каждой гармоники. Дополнительные потери в номинальном режиме считаются равными 0,5 % мощности АТД. Полные потери в АТД определяются суммированием всех указанных потерь. В качестве исходной информации для расчета потерь использованы результаты испытаний тяговых двигателей типа ДТА-1100 по схеме взаимной нагрузки, приведенные в [1]. **Результаты:** Прежде всего рассчитаны потери в тяговом двигателе типа ДТА-1100 при работе в номинальном режиме. Полученное значение КПД, равное 0,962, вполне согласуется с паспортными данными двигателя, которое заявлено как 0,96. Далее расчетным путем определены потери в АТД при работе в переменных режимах. Установлена картина расчетных потерь в зависимости от мощности на валу двигателя, которые практически совпадают с потерями, найденными при испытаниях на стенде, во всем диапазоне нагрузок. **Практическая значимость:** Предлагаемая методика по своей сути является универсальной, причем достоверность полученных результатов подтверждена сравнением с экспериментом. Методика может быть использована для определения потерь в асинхронных тяговых двигателях отечественных электровозов, электропоездов и тепловозов.

Ключевые слова: Электровоз, асинхронный тяговый привод, энергетическая эффективность при переменной нагрузке, расчетная методика определения потерь в асинхронном тяговом двигателе.

Введение

В [1] установлено, что характер изменения суммарного КПД асинхронного тягового электропривода определяется главным образом поведением КПД тягового электродвигателя в зависимости от нагрузки.

При питании асинхронного тягового двигателя (АТД) от преобразователя, когда напряжения и токи имеют несинусоидальную форму, определение потерь является сложной задачей, так как необходим учет значительного количества факторов [2–4]. Расчет потерь в магнитной системе требует знания информации о распределении магнитного поля в магнитопроводах статора и ротора и о параметрах магнитных материалов. Выполнение таких расчетов связано со значительными вычислительными затратами и не гарантирует получения точного результата, так как, как правило, известны только некоторые усредненные параметры электротехнической стали. Поэтому для расчета потерь в АТД при питании от преобразователя использовался применяемый в теории электрических машин подход [2, 5–7], основанный на разделении потерь и использовании результатов экспериментов при питании электрической машины синусоидальным напряжением.

Методика расчетного определения потерь

В соответствии с общепринятым подходом, потери в АТД разделяются на электрические (потери в меди), магнитные (потери в стали), механические и дополнительные. В качестве исходной информации для расчета потерь использованы результаты испытаний тяговых двигателей типа ДТА-1100 по схеме взаимной нагрузки, приведенные выше.

Так как ток статора содержит высшие гармоники, электрические потери в обмотке статора определяются с учетом эффекта вытеснения тока. Для определения величины магнитных потерь выполняется определение гармонического состава потокосцепления в воздушном зазоре, вычисляются и суммируются потери от каждой гармоники. Дополнительные потери в номинальном режиме считаются равными 0,5 % мощности АТД. Полные потери в АТД определяются суммированием электрических, магнитных, механических и дополнительных потерь.

В соответствии с [6, 7] коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления в зависимости от частоты, определяется по формуле:

$$\delta_{sk} = \frac{1}{12} \left(\frac{k\omega_s}{\omega_{SH}} \right),$$

где ω_{SH} , ω_s — номинальная и текущая угловые частоты тока статора.

С учетом этого коэффициента электрические потери в обмотке статора:

$$\Delta P_{эс} = m \sum_k I_{\phi k}^2 r_s \delta_{sk}, \quad (1)$$

где $I_{\phi k}$ — k -я временная гармоника тока фазы статора;
 m — число фаз обмотки статора.

Изменение активного сопротивления обмотки ротора учитывается с использованием коэффициента, определяемого для k -й временной гармоники следующим образом:

$$\delta_{rk} = \sin^2 \theta + \frac{1}{12} \left(\frac{k \omega_s - p \omega}{\omega_{\text{SH}}} \right),$$

где θ — фазовый сдвиг между обобщенными векторами тока статора и потокосцепления ротора АД, рассчитываемый по формуле [5]:

$$\theta = \frac{(\omega_s - p \omega) \omega_s L'_r}{r'_r},$$

где p — число пар полюсов АД;

ω — частота вращения ротора АД;

L'_r и r'_r — индуктивность и активное сопротивление ротора АД, приведенные к статору.

Для определения электрических потерь в обмотке ротора необходимо рассчитать значение тока ротора, приведенного к статору. Амплитуда k -й временной гармоники этого тока определяется по формуле:

$$I_{rk} = \frac{x_m}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}} \cdot \frac{U_{sk}}{k \omega_s},$$

где x_m — реактивное сопротивление контура намагничивания АД;

U_{sk} — амплитуда k -й временной гармоники напряжения статора.

Коэффициенты a_k и b_k могут быть определены с использованием выражений:

$$a_k = \frac{r_s \delta_{sk} r_r \delta_{rk}}{k \omega_s s_k} - x_s x'_r \sigma; \quad b_k = \frac{r_s \delta_{sk}}{k \omega_s} x'_r + \frac{r'_r \delta_{rk}}{s_k} x_s,$$

где x_s и x'_r — реактивное сопротивление статора и ротора, приведенное к статору, соответственно;

$s_k = k \omega_s - p \omega$ — скольжение для k -й временной гармоники;

σ — коэффициент рассеяния.

Электрические потери ротора находятся с использованием приведенных выше выражений для определения тока ротора:

$$\Delta P_{\text{эр}} = \sum_k \left(\frac{I_{rk}}{\sqrt{2}} \right)^2 r'_r \delta_{rk}. \quad (2)$$

Для определения составляющей магнитных потерь от k -й временной гармоники потокоцепления в воздушном зазоре используется известное выражение [5, 6]:

$$\Delta P_{mk} = \Delta P_{\text{мн}} \left(\frac{\Psi_{mk}}{\Psi_{\text{мн}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{k\omega_s}{\omega_{\text{сн}}} \right)^{1,3}, \quad (3)$$

где $\Delta P_{\text{мн}}$ и $\Psi_{\text{мн}}$ — магнитные потери и потокоцепление в воздушном зазоре в номинальном режиме при синусоидальном напряжении питания.

Для определения k -й временной гармоники потокоцепления в воздушном зазоре соответствующая гармоника тока намагничивания рассчитывается по формуле [5]:

$$I_{mk} = \sqrt{\frac{(r_r' \delta_{rk} / s_k)^2 + x_{r\sigma}^2}{a^2 + b^2}} \cdot \frac{U_{sk}}{k\omega_s},$$

где $x_{r\sigma}$ — реактивное сопротивление рассеяния ротора.

Тогда k -я временная гармоника потокоцепления:

$$\Psi_{mk} = x_m I_{mk}.$$

В соответствии с принятой в теории электрических машин методикой определения механических потерь считается, что они зависят от квадрата частоты вращения и вычисляются по формуле:

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{мехн}} \left(\frac{\omega_s}{\omega_{\text{сн}}} \right)^2, \quad (4)$$

где $\Delta P_{\text{мехн}}$ — механические потери при номинальной частоте вращения.

Дополнительные потери в номинальном режиме считаются равными 0,5 % мощности АД и зависящими от квадрата тока статора:

$$\Delta P_{\text{доп}} = 0,005 \left(\frac{I_{s1}}{I_{\text{сн}}} \right)^2 P_{\text{н}}, \quad (5)$$

где $P_{\text{н}}$ и $I_{\text{сн}}$ — номинальная мощность АД и номинальный ток статора.

Полные потери в АД определяются суммированием электрических, магнитных, механических и дополнительных потерь:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{эс}} + \Delta P_{\text{эр}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доп}}. \quad (6)$$

Подведенная к АД активная мощность рассчитывается по значениям фазных напряжений и токов ($U_{\phi}(t), I_{\phi}(t)$):

$$P_1 = m \int_0^t U_{\phi}(t) I_{\phi}(t) dt. \quad (7)$$

Полезная мощность двигателя (механическая мощность на валу) определяется как разница между подведенной активной мощностью и полными потерями:

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{\Sigma}. \quad (8)$$

Как следует из выражений для определения отдельных видов потерь, корректность расчетов во многом определяется тем, насколько точно определен гармонический состав фазных токов и напряжений статора. Как показал предварительный анализ экспериментально определенных зависимостей тока статора в часовом режиме, кроме основной гармоники с частотой около 80 Гц, они также содержат субгармоники с частотой порядка 15 Гц, обусловленные особенностями проведения испытаний по схеме с взаимной нагрузкой [3]. Поэтому определение частоты основной гармоники по зависимости тока или напряжения одной из фаз не позволяет обеспечить необходимую точность.

Для устранения влияния субгармоник с частотой ниже основной гармоники определение частоты основной гармоники проводилось с использованием следующего подхода. С использованием экспериментальных зависимостей токов фаз статора с помощью прямого преобразования Кларка определялись проекции вектора тока статора на оси системы координат $\alpha - \beta$ неподвижной относительно статора:

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix},$$

где $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ — проекции вектора тока статора на оси системы координат $\alpha - \beta$; i_A, i_B, i_C — значения токов фаз статора.

Затем полученные зависимости от времени проекции тока статора на оси неподвижной системы координат преобразуются в проекции на вращающуюся систему координат $d - q$ (прямое преобразование Парка):

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix},$$

где i_{sd}, i_{sq} — проекции вектора тока статора на оси системы координат $d - q$;

Угол положения вращающейся системы координат $d - q$ относительно неподвижной $\alpha - \beta$ равен

$$\theta = 2\pi f_{d-q} t,$$

где f_{d-q} — частота вращения системы координат $d - q$.

Если частота вращения вектора тока (напряжения) статора совпадает с частотой вращения системы координат $d - q$, проекции соответствующего вектора на ее оси будут постоянными величинами. Поэтому для определения близости частоты основной гармоники токов фаз может быть использована сумма дисперсий проекций вектора тока на оси системы координат относительно среднего значения этих составляющих:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (i_{sdk} - \bar{i}_{sd})^2 + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (i_{sqk} - \bar{i}_{sq})^2,$$

где N — количество измерений;

\bar{i}_{sd} \bar{i}_{sq} — среднее значение проекций вектора тока на оси системы координат $d - q$.

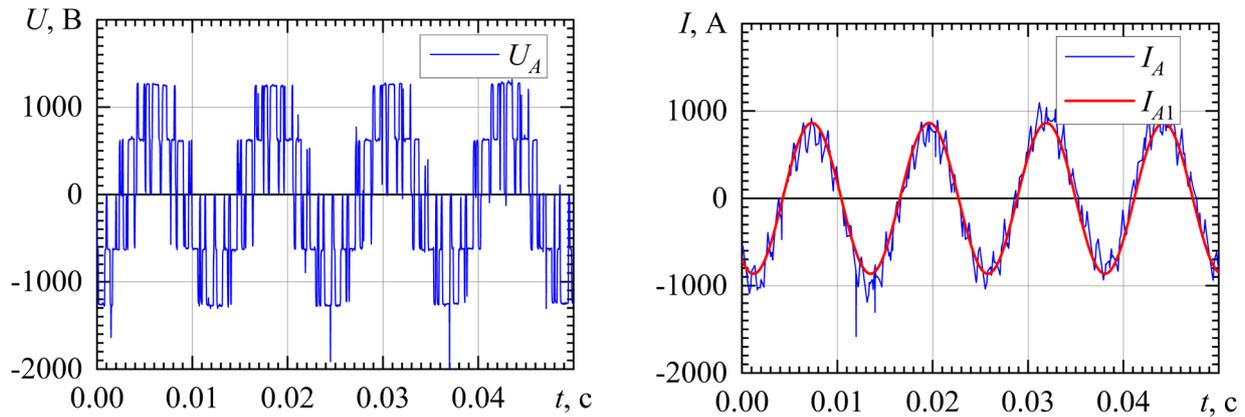
В случае, когда токи фаз имеют синусоидальную форму, при равенстве частоты токов и частоты вращения, величина этого критерия будет равна нулю. Так как при питании от инвертора токи фаз АД имеют высшие гармоники, то для определения частоты основной гармоники методом наименьших квадратов минимизируется значение критерия Q . Кроме исключения влияния субгармоник в токах, полученных в ходе эксперимента, использование такого подхода позволяет устранить влияние помех измерений.

Определение потерь в тяговом двигателе при работе в номинальном (длительном) режиме

В качестве примера определения потерь в АД типа ДТА-1100 рассмотрим случай его работы в номинальном (длительном) режиме. Частота основной гармоники токов и напряжений, полученная с использованием описанного выше метода, равна 81,406 Гц.

На рис. 1 показаны кривые напряжения U_A и тока I_A , причем основная гармоника тока I_{A1} фазы A показана жирной линией.

В соответствии с изложенной выше методикой определения потерь, для рассматриваемого случая были получены следующие значения подведенной к тяговому двигателю мощности и отдельных видов потерь:

Рис. 1. Напряжение (слева) и ток (справа) фазы A

$P_1 = 1093$ кВт — мощность, подведенная к тяговому двигателю;

$\Delta P_{\text{эс}} = 12,335$ кВт — электрические потери статора;

$\Delta P_{\text{эр}} = 11,398$ кВт — электрические потери ротора;

$\Delta P_{\text{эм}} = 10,157$ кВт — магнитные потери;

$\Delta P_{\text{мех}} = 5,818$ кВт — механические потери;

$\Delta P_{\text{доп}} = 1,685$ кВт — дополнительные потери.

Отсюда находим суммарные потери:

$\Delta P_{\Sigma} = 12,335 + 11,398 + 10,157 + 5,818 + 1,685 = 41,393$ кВт.

Мощность на валу двигателя в номинальном режиме, согласно (6) и (8), будет равна:

$P_2 = P_1 - \Delta P_{\Sigma} = 1093 - 41,393 = 1051,607$ кВт,

а его КПД будет равен:

$\eta_{\text{ТЭД}} = P_2 / P_1 = 1051,607 / 1093 = 0,962$.

Полученные значения мощности на валу и КПД вполне согласуются с паспортными данными тягового двигателя ДТА-1100, где при работе в номинальном (длительном) режиме заявлено $P_2 = 1050$ кВт и $\eta_{\text{ТЭД}} = 0,96$.

Определение потерь в тяговом двигателе и в механическом приводе при работе в переменных режимах

Колесно-моторный блок (*drive*) имеет в своем составе тяговый электродвигатель и тяговый редуктор (механический привод от вала двигателя на ось колесной пары), включающий зубчатую передачу и подшипники.

При изменении мощности P_1 , потребляемой ТЭД, получаем результаты, сведенные в таблицу. Семь значений мощности $P_1 = 52; \dots; 1093$ кВт, находящиеся в 1-м столбце этой таблицы, соответствуют столбцу 4 табл. 2 в экспериментальной работе [1], где они обозначены как P_{in}^{drive} .

Значения мощности и КПД

	Мощность		
	потребляемая ТЭД P_1 , кВт	на валу ТЭД P_2 , кВт	на оси КП $P_{\text{КМБ}}$, кВт
i	1	2	3
1	52	28,325	23
2	258	233,60	226
3	472	445,74	432
4	689	658,97	642
5	879	844,60	824
6	1003	964,96	943
7 (длительный режим)	1093	1051,61	1029

Далее, во 2-м столбце таблицы, приведены значения мощности P_2 на валу ТЭД, рассчитанные согласно приведенной выше методике.

В 3-м столбце приведены значения мощности $P_{\text{КМБ}}$, то есть мощности на оси колесной пары, полученные экспериментально в [1] и находящиеся в столбце 6 табл. 2 в работе [1], они обозначены как $P_{\text{out}}^{\text{drive}}$.

Потери в КМБ находим, вычитая поэлементно столбец 3 из столбца 1; потери в ТЭД находятся вычитанием столбца 2 из столбца 1, а потери в механическом приводе — вычитая столбец 3 из столбца 2. В итоге получаем картину потерь в зависимости от мощности на валу двигателя (рис. 2).

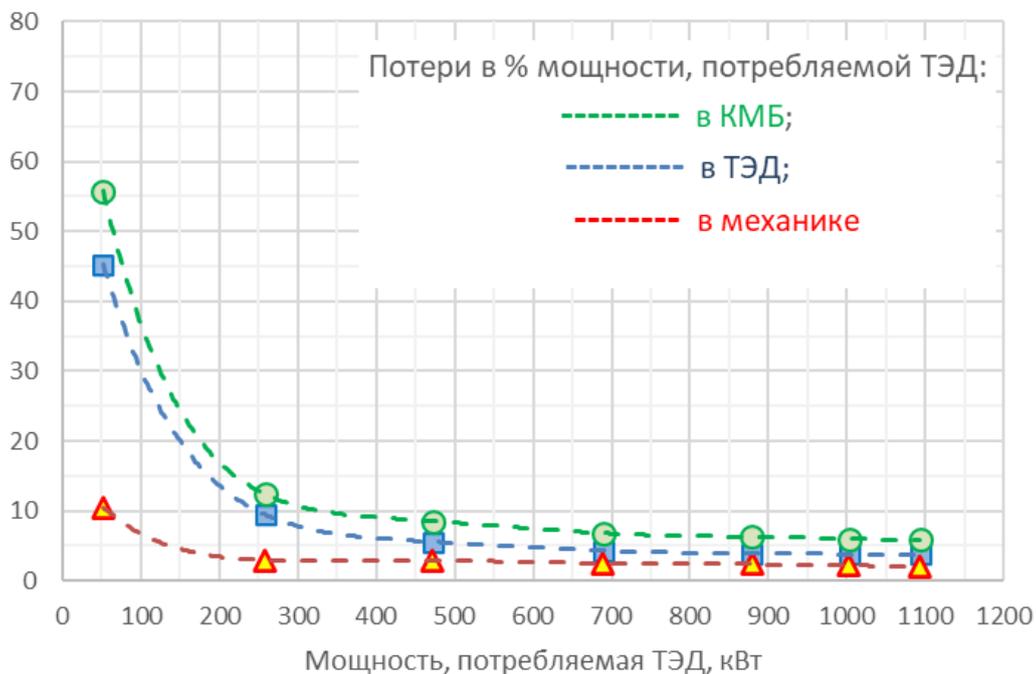


Рис. 2. Потери в зависимости от мощности на валу двигателя

Заключение

Представлена методика расчетного определения потерь в асинхронном тяговом двигателе при питании от преобразователя. Использовался подход, основанный на разделении потерь на электрические (потери в меди), магнитные (потери в стали), механические и дополнительные. В качестве исходной информации для расчета потерь использованы результаты испытаний тяговых двигателей типа ДТА-1100 по схеме взаимной нагрузки, приведенные в [1]. Получено совпадение расчетных и экспериментальных результатов во всем диапазоне изменения мощности, реализуемой АД.

Предлагаемая методика по своей сути является универсальной, причем достоверность полученных результатов подтверждена сравнением с экспериментом. Методика может быть использована для определения потерь в асинхронных тяговых двигателях отечественных электропоездов, электропоездов и тепловозов.

Библиографический список

1. Зарифьян А. А. Экспериментальное исследование энергетической эффективности асинхронного тягового привода электропоездов при изменяющейся нагрузке / А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 77–92. — DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-77-92.
2. Колпахчян П. Г. Потери в асинхронном тяговом двигателе при питании от преобразователя частоты и числа фаз / П. Г. Колпахчян, В. И. Захаров // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электропоездоостроения. — 2005. — № 48. — С. 78–88.
3. Попов Д. И. Научные основы создания энергоэффективных методов и средств испытаний электрических машин / Д. И. Попов. — Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2019. — 175 с.
4. Казаков Ю. Б. Моделирование энергоэффективности тягового асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения / Ю. Б. Казаков, Н. К. Швецов // Вестник ИГЭУ. — 2013. — № 3. — С. 1–5.
5. Поздеев А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах / А. Д. Поздеев. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. — 172 с.
6. Волков А. В. Потери мощности асинхронного двигателя в частотно-управляемых электроприводах с широтно-импульсной модуляцией / А. В. Волков // Электротехника — 2002 — № 8. — С. 2–9.
7. Радин В. И. Электрические машины. Асинхронные машины / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович. — М.: Высшая школа, 1988. — 328 с.

Дата поступления: 08.03.2023

Решение о публикации: 10.04.2023

Контактная информация:

ЗАРИФЬЯН Александр Александрович — канд. техн. наук, эксперт;

zarifyan.alexander@gmail.com

КОЛПАХЧЬЯН Павел Григорьевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой;

kolpahchyan@mail.ru

Calculation Method for Determining Losses in Electric Locomotive Asynchronous Traction Motor under Changing Load

A. A. Zarifyan¹, P. G. Kolpahchyan²

¹“TMH Engineering” LLC, 4, Kolontsova str., Mytishchi, Moscow Region, 141009, Russian Federation

²Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Zarifyan A. A., Kolpahchyan P. G. Calculation Method for Determining Losses in Electric Locomotive Asynchronous Traction Motor under Changing Load. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 81–91. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-81-91

Summary

Purpose: In the work [1], an experimental study of the energy efficiency of electric locomotive asynchronous traction drive under changing load has been carried out. In this article, the task is to develop a method for calculating the losses in an asynchronous traction motor (ATM) when powered by a converter, depending on the changing load. **Methods:** When ATM is powered by a converter and voltages and currents are non-sinusoidal, the determination of losses is a difficult problem, since a significant number of factors must be taken into account. An approach based on the separation of losses and the utilization of experimental results has been employed. To calculate the losses, an approach used in the theory of electrical machines has been applied. It is based on the separation of losses, which consist of electrical (losses in copper), magnetic (losses in steel), mechanical and additional ones. Since the stator current contains higher harmonics, the electrical losses in the stator winding are determined taking into account the effect of current displacement. To ascertain the magnitude of magnetic losses, the harmonic composition of the flux linkage in the air gap is determined, the losses from each harmonic are calculated and summarized. Additional losses in the nominal mode are considered equal to 0.5% of the ATM power. The total loss in the ATM is determined by the summation of all the specified losses. The results of the DTA-1100 type traction motors tests according to the mutual load scheme given in [1] have been used as initial information for calculating the losses. **Results:** First of all, the losses in the DTA-1100 traction motor have been calculated when operating in the nominal mode. The obtained efficiency value, equal to 0.962, is in good agreement with the passport data of the engine, which is declared as 0.96. Further, the losses in the ATD when operating in variable modes are determined by calculation. A pattern of calculated losses depending on the power on the motor shaft has been established, which practically coincide with the losses found during tests on the stand, in the entire range of loads. **Practical significance:** The proposed method is inherently universal, and the reliability of the results obtained is confirmed by comparison with the experiment. The technique can be used to determine the energy efficiency of asynchronous traction motors of domestic electric and diesel-electric locomotives and electric trains.

Keywords: Electric locomotive, asynchronous traction drive, energy efficiency under changing load, calculation method for determining losses in an asynchronous traction motor.

References

1. Zarifyan A. A., Kolpakhchyan P. G. Experimental'noe issledovanie energeticheskoy effektivnosti asinkhronnogo tyagovogo privoda elektrovozov pri izmenyauscheysya nagruzke [Experimental Research of Energetic Efficiency of Electric Locomotive Asynchronous Traction Drive at Changing Load]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2023, Iss. 1, pp. 77–92. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-77-92. (In Russian)

2. Kolpakhchyan P. G., Zakharov, V. I. Poteri v asinkhronnom tyagovom dvigatele pri pitanii ot preobrazovatelya chastoty i chisla faz [Losses in an asynchronous traction motor when powered by a frequency and phase converter]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovostoeniya* [Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Building]. 2005, Iss. 48, pp. 78–88. (In Russian)

3. Popov D. I. *Nauchnye osnovy sozdaniya energoeffektivnykh metodov i sredstv ispytaniy elektricheskikh mashin* [Scientific foundations for creating energy-efficient methods and means of testing electrical machines]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2019, 175 p. (In Russian)

4. Kazakov Yu. B., Shvetsov N. K. Modelirovaniye energoeffektivnosti tyagovogo asinkhronnogo dvigatelya pri pitanii ot preobrazovatelya chastoty s shirotno-impul'snoy modulyatsiyey napryazheniya [Modeling the energy efficiency of a traction asynchronous motor when powered by a frequency converter with pulse-width modulation of voltage]. *Vestnik IGEU* [Vestnik IGEU]. 2013, Iss. 3, pp. 1–5. (In Russian)

5. Pozdeev A. D. *Elektromagnitnyye i elektromekhanicheskiye protsessy v chastotno-reguliruyemykh asinkhronnykh elektroprivodakh* [Electromagnetic and electromechanical processes in frequency-controlled asynchronous electric drives]. Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta Publ., 1998, 172 p. (In Russian)

6. Volkov A. V. Poteri moshchnosti asinkhronnogo dvigatelya v chastotno-upravlyayemykh elektroprivodakh s shirotno-impul'snoy modulyatsiyey [Power losses of an asynchronous motor in frequency-controlled electric drives with pulse-width modulation]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2002, Iss. 8, pp. 2–9. (In Russian)

7. Radin V. I., Bruskin D. E., Zorokhovich A. E. *Elektricheskkiye mashiny. Asinkhronnyye mashiny* [Electric machines. Asynchronous machines]. Moscow: Higher school Publ., 1988, 328 p. (In Russian)

Received: March 08, 2023

Accepted: April 10, 2023

Author's information:

Alexander A. ZARIFYAN — PhD in Engineering, Expert; zarifyan.alexander@gmail.com

Pavel G. KOLPAKHCHYAN — Dr. Sci. in Engineering, Electric Machines and Apparatus

Department Head; kolpakhchyan@mail.ru