

УДК 621.313.3

И.С. СТАСЕНКОинженер-программист 1-й категории отдела главного конструктора¹
E-mail: iharstasenka@strim-tech.com**Н.В. ГЕРАСИМЕНКО**инженер-программист 2-й категории отдела главного конструктора¹
E-mail: gerasimenko_nikita@hotmail.com**В.С. САВИЦКИЙ**инженер-конструктор 2-й категории отдела главного конструктора¹
E-mail: savitskii@strim-tech.com¹ОДО «СТРИМ», г. Могилев, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 23.07.2021.

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТА

Статья посвящена проектированию асинхронного тягового электродвигателя, предназначенного для работы в составе электропривода транспортных средств (ТС): электромобилей, электробусов, трамваев, троллейбусов. В качестве объекта исследования принят автобус среднего класса. Построены требуемые тяговые характеристики электродвигателя — номинальная и предельная характеристика повышенного момента. Построены динамические характеристики автобуса с механической трансмиссией и дизельным двигателем, а также автобуса с электродвигателем. Предложена методика проектирования электродвигателя, основанная на математическом моделировании его работы в программных комплексах ANSYS RMxprt и INFOLYTICA MAGNET. По данной методике определены основные параметры электродвигателя. Приведены результаты моделирования — графики зависимостей критериев от параметров электродвигателя. Проведены экспериментальные исследования электродвигателя. Сопоставлены результаты математического моделирования с экспериментальными. Установлено, что расхождение результатов экспериментальных и теоретических исследований составляет не более 5 %.

Ключевые слова: электротранспорт, электродвигатель, тяговые характеристики, динамические характеристики, параметры электродвигателя

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-1-58-24-30>

В настоящее время в мире большое внимание уделяется вопросам решения экологических проблем. Наибольшее значение это имеет для крупных городов. Наиболее вредное воздействие на окружающую среду в целом и атмосферный воздух в городах в частности оказывает автомобильный транспорт. Для уменьшения вредного воздействия транспорта постоянно вводятся новые экологические нормы для двигателей внутреннего сгорания (ДВС). На данный момент действуют нормы Евро-6.

Одним из способов снижения вредного воздействия транспорта на окружающую среду города является применение электротранспорта. В 2013 году была принята Стратегия по снижению вредного воздействия транспорта на атмосферный воздух Республики Беларусь на период до 2020 года [1]. В рамках данной стратегии предполагалось увеличение к 2020 году доли обществен-

ного транспорта с улучшенными экологическими характеристиками и электротранспорта в населенных пунктах численностью свыше 100 тыс. человек до 50 %. Для достижения поставленной цели ряд предприятий и научных организаций Республики Беларусь получили задания на создание современных производств автокомпонентов, обеспечивающих выполнение высоких требований экологической безопасности.

Компания ОДО «СТРИМ», являясь поставщиком электрических преобразователей для ОАО «БЕЛАЗ», развивает новые направления, связанные с разработкой и производством зарядных станций для электротранспорта, тяговых преобразователей и электрических машин. Одной из последних разработок компании, выполненной совместно с сотрудниками Белорусско-Российского университета (г. Могилев), является электродвигатель тяговый асинхронный ДТА-125-6, предназначенный для

Таблица 1 — Параметры автобуса «Неман-4202»
Table 1 — Parameters of the bus «Neman-4202»

Параметр	Значение
Пассажировместимость, чел.	40
Полная масса, кг	7850
Масса, приходящаяся на переднюю ось, кг	2500
Масса, приходящаяся на заднюю ось, кг	5350
Габаритная длина, м	8,78
Максимальная скорость, км/ч	90
Снаряженная масса, кг	4800
Колесная формула	4×2
Номинальная мощность ДВС, кВт	125
Номинальная частота вращения ДВС, мин ⁻¹	3500
Максимальный вращающий момент ДВС, Н·м	430
Количество передач	6
Передаточные числа МКП	5,373; 3,154; 2,041; 1,365; 1; 0,793

работы в составе электропривода ТС: электро-мобилей, электробусов, трамваев, троллейбусов. Данный электродвигатель был спроектирован для автобуса среднего класса «Неман-4202». Серийно он оснащается дизельным ДВС и механической коробкой передач (МКП), которые планируется заменить электродвигателем в сочетании с редуктором. Параметры автобуса приведены в таблице 1.

Для определения основных конструктивных параметров электродвигателя необходимо располагать его тяговой характеристикой, которая представляет собой зависимость вращающего момента электродвигателя от частоты его вращения. При разработке электродвигателя ДТА-125-6 была использована методика, изложенная в [2]. Для данного электродвигателя были получены номинальная и предельная характеристики повышенного момента. Номинальная характеристика (кривая 1 на рисунке 1) построена для продолжительного режима

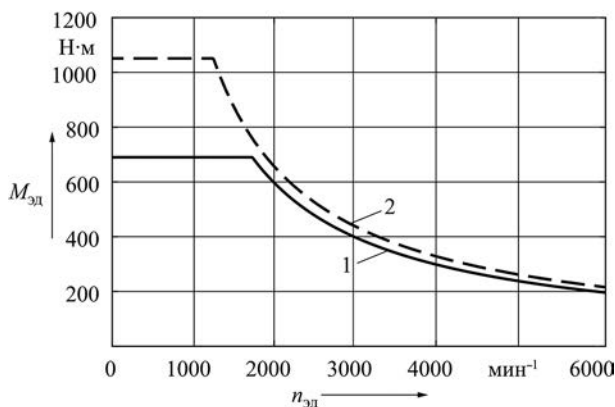


Рисунок 1 — Тяговые характеристики электродвигателя
Figure 1 — Traction characteristics of the electric motor

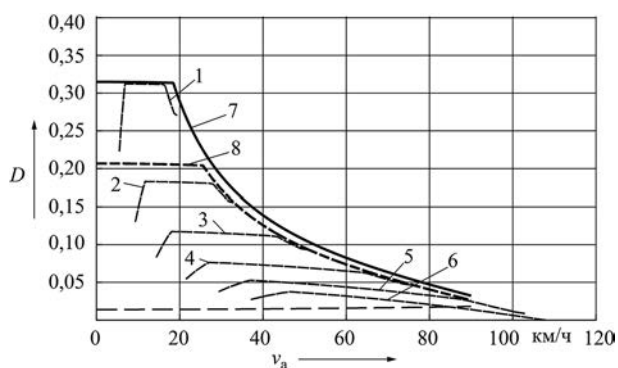


Рисунок 2 — Динамическая характеристика автобуса
Figure 2 — Dynamic characteristics of the bus

работы (S1). Электродвигатель может работать на данной характеристике длительное время без перегрева. При работе на предельной характеристике (см. кривую 2 на рисунке 1) допускается кратковременное повышение максимального тока обмотки электродвигателя, что приводит к перегреву двигателя. Длительность работы на предельной характеристике ограничено по времени — 10 мин.

При замене ДВС и МКП на электродвигатель с редуктором важно не допустить ухудшения тягово-скоростных свойств автобуса. Как известно, тягово-скоростные свойства автомобиля характеризуются динамическим фактором, определяемым по формуле [3]:

$$D = \frac{M_d u_{тр} \eta_{тр} / r_k - k_w A_d v^2}{m_a g},$$

Таблица 2 — Параметры электродвигателя
Table 2 — Electric motor parameters

Параметр	Значение
Число полюсов	4
Номинальная мощность, кВт	125
Номинальное межфазное напряжение статора, В	380
Ток статора номинальный, А	220,7
Номинальная частота вращения, об/мин	1780
Номинальное значение коэффициента мощности	0,86
Номинальное значение КПД, %	94,1
Индукция в зазоре, Тл	0,96
Число пазов на полюс	5
Число пазов статора	60
Число пазов ротора	44
Высота зубца статора, мм	26
Ширина зубца статора, мм	7
Число витков статора	3
Тип схемы обмотки статора	петлевая
Шаг обмотки статора по пазам	13
Схема соединения обмотки статора	Y
Число параллельных ветвей обмотки	2

Таблица 3 — Параметры для моделирования электродвигателя
Table 3 — Parameters for modelling an electric motor

Параметр	Обозначение	Минимальное значение	Максимальное значение	Шаг
Высота зубца статора, мм	T_H	24	28	0,5
Ширина зубца статора, мм	T_W	4,5	7	0,5
Число витков статора	a	3	4	1

где M_d — момент двигателя, реализуемый на входе в трансмиссию, Н·м; $u_{тр}$ — передаточное число трансмиссии; $\eta_{тр}$ — КПД трансмиссии; r_k — радиус качения колеса, м; k_w — коэффициент сопротивления воздуха; A_d — лобовая площадь, м²; v — скорость автомобиля, м/с; m_a — масса автомобиля, кг.

Для сравнения тягово-скоростных свойств автобуса с электродвигателем и автобусом с ДВС построим динамическую характеристику, которая представляет собой графическое изображение динамического фактора от скорости движения $D = f(v)$. Для автобуса с ДВС ее необходимо построить для всех передач МКП. При этом в формулу необходимо подставить момент ДВС, пе-

редаточное число и КПД МКП. Для автобуса с электродвигателем динамическая характеристика строится для двух описанных выше режимов работы. При этом в формулу необходимо подставить момент электродвигателя, передаточное число и КПД редуктора.

На рисунке 2 представлена динамическая характеристика автобуса. Кривые 1–6 представляют собой динамический фактор для соответствующих передач МКП. Кривая 7 построена для предельного режима работы электродвигателя, а кривая 8 — для продолжительного.

Анализируя динамическую характеристику, можно сделать вывод, что при продолжительном режиме работы электродвигатель обеспечивает те же динамические характеристики, что и ДВС с МКП при ее работе на 2–6 передачах. При работе электродвигателя на предельном режиме обеспечиваются те же динамические характеристики, что и при движении на первой передаче МКП. Поскольку в реальных дорожных условиях автомобили движутся на первой передаче с максимальным моментом непродолжительное время, можно сделать вывод, что замена ДВС и МКП на данный электродвигатель с редуктором не приводит к ухудшению тягово-скоростных свойств

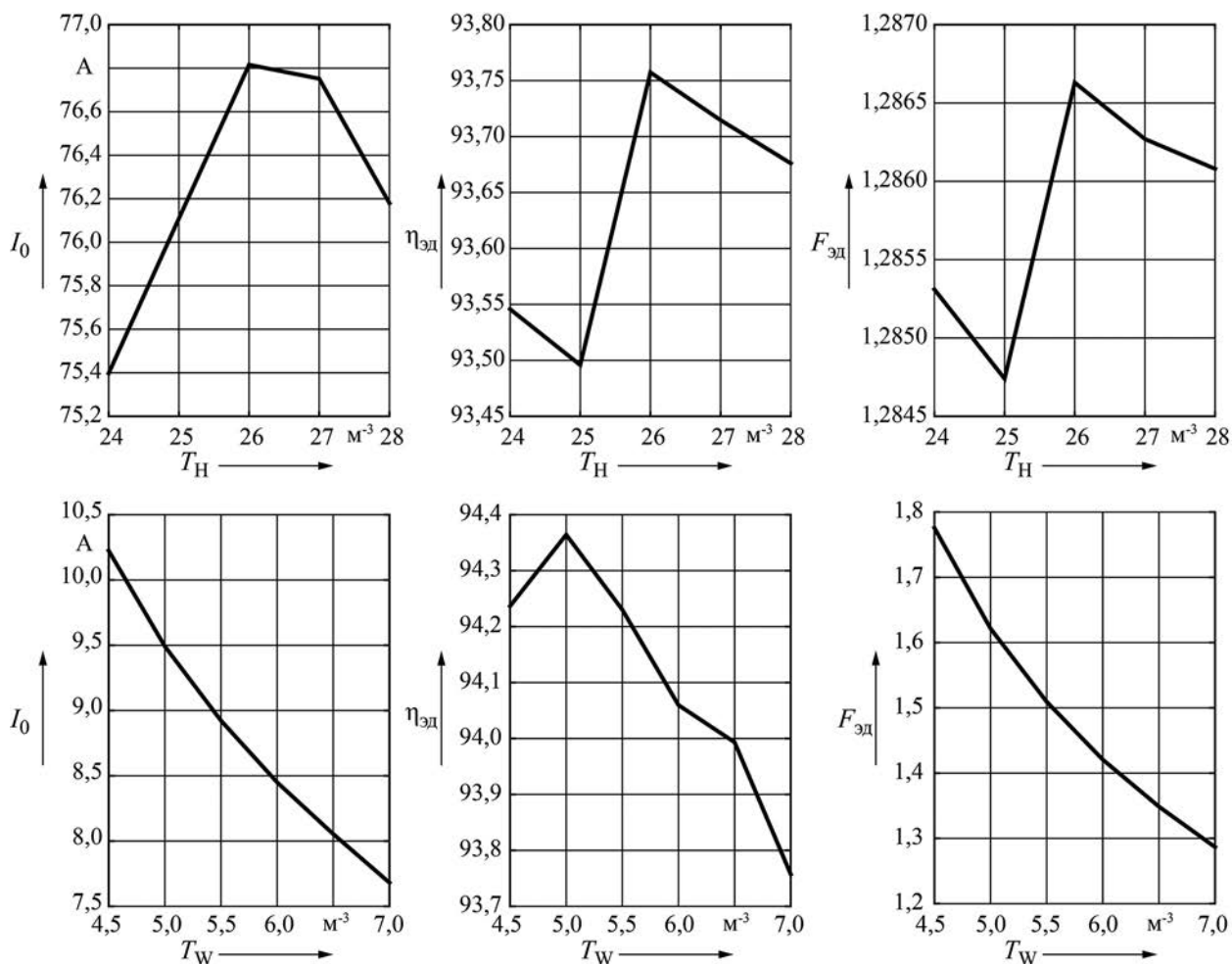


Рисунок 3 — Графики изменения критериев при $a = 3$
Figure 3 — Graphs of changes in criteria with $a = 3$

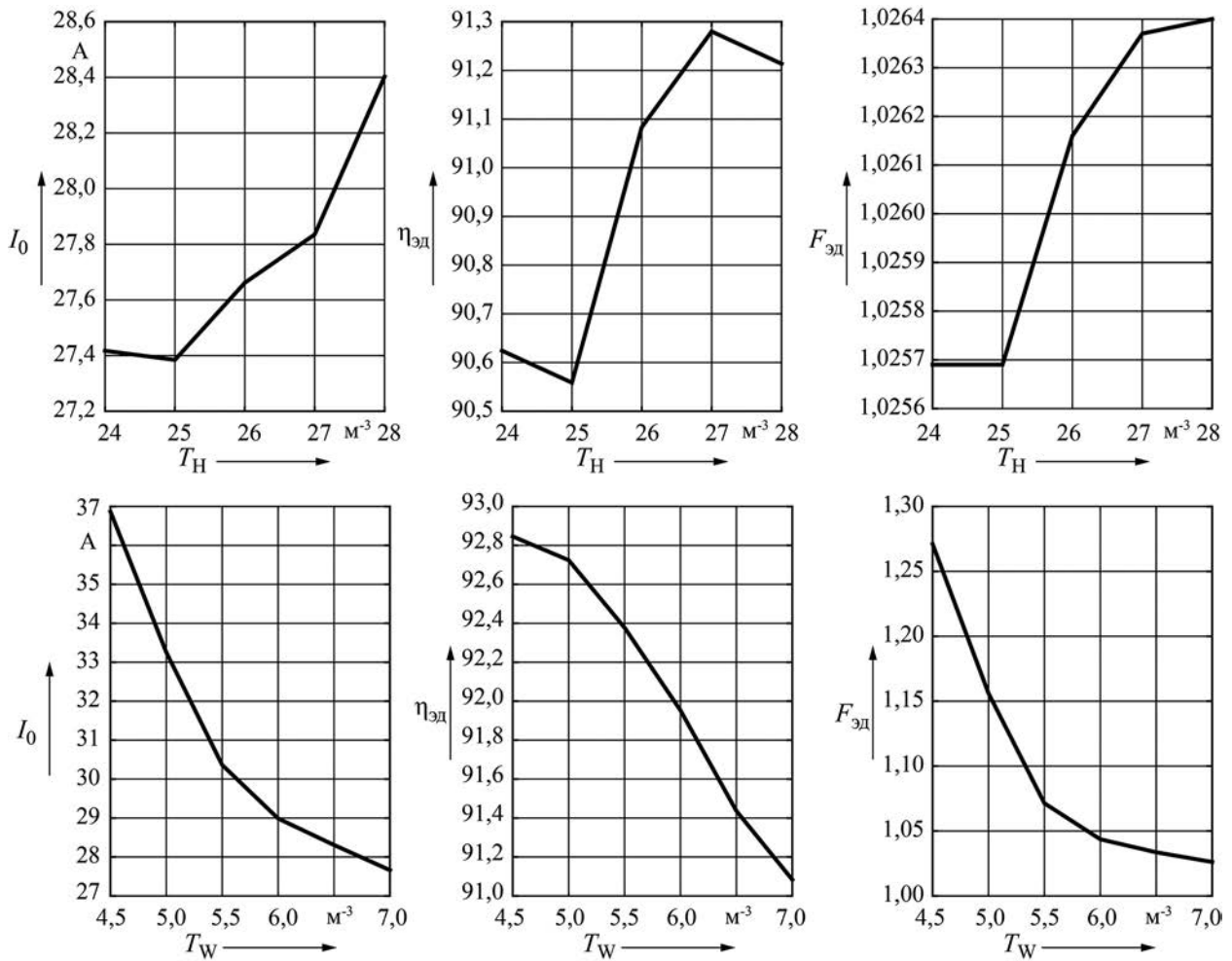


Рисунок 4 — Графики изменения критериев при $a = 4$
Figure 4 — Graphs of changes in criteria with $a = 4$

автобуса. При этом следует отметить, что при разгоне автобуса с МКП при переключении передач происходят рывки и некоторое падение скорости. Автобус с электродвигателем лишен данных недостатков.

С учетом приведенной выше тяговой характеристики были определены основные конструктив-

ные параметры электродвигателя [4]. При этом использовался переработанный вариант методики, изложенной в [5]. Передаточное число редуктора принято равным 2. Значение параметров приведены в таблице 2.

Для уточнения значения ширины и высоты зубца статора и числа витков производилось моделирование электродвигателя в программе ANSYS RMxprt [6, 7]. При этом производилось варьирование параметрами в соответствии с таблицей 3.

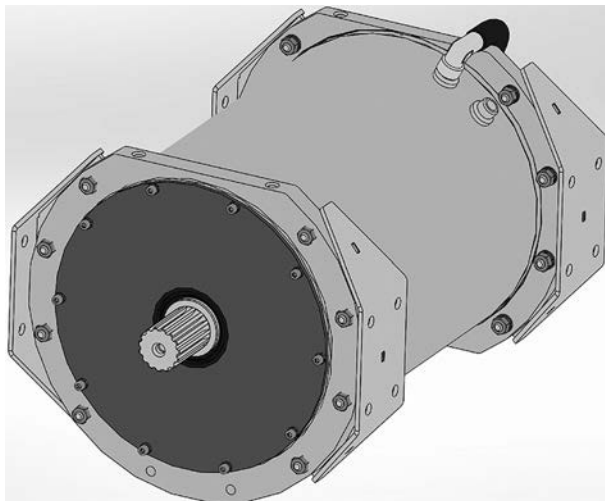


Рисунок 5 — 3D-модель электродвигателя ДТА-125-6
Figure 5 — 3D model of the DTA-125-6 electric motor

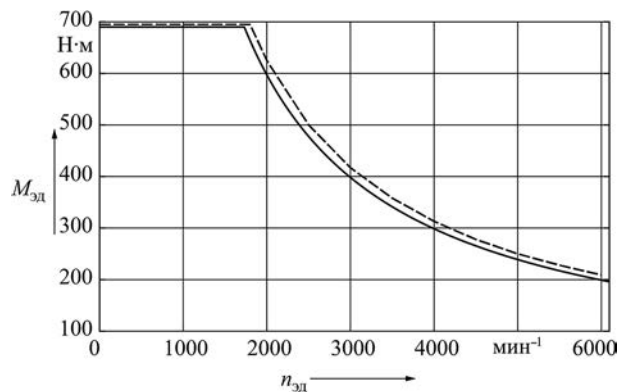


Рисунок 6 — Тяговые характеристики электродвигателя
Figure 6 — Traction characteristics of the electric motor

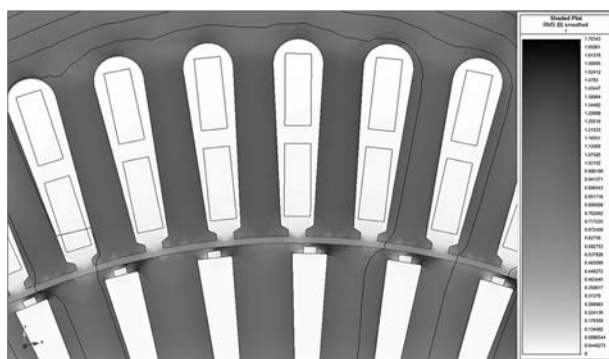


Рисунок 7 — Распределение индукции $B_{\text{эл}}$ для номинального режима работы
Figure 7 — Distribution of the induction $B_{\text{эл}}$ for the nominal operating mode

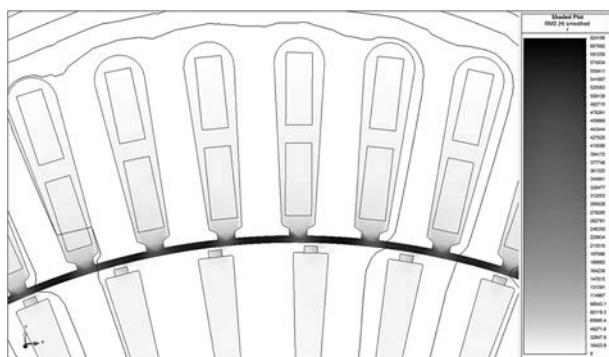


Рисунок 8 — Распределение намагничивающей силы
Figure 8 — Distribution of magnetizing force

При проведении исследования использовались следующие критерии:

- индукция ярма статора;
- индукция зубца статора;
- ток намагничивания;
- суммарные потери;
- КПД электродвигателя;
- фактор насыщения зубца статора;
- фактор насыщения машины;
- плотность тока в стержнях ротора.

На рисунках 3, 4 в качестве примера результатов исследования показаны графики зависимостей тока намагничивания I_0 , КПД электродвигателя $\eta_{\text{эл}}$, фактора насыщения электродвигателя $F_{\text{эл}}$ от приведенных выше параметров машины (см. таблицу 3). При варьировании каждым из параметров, остальные параметры принимались равными значениям, приведенным в таблице 2.

По результатам данного исследования были приняты следующие параметры электродвигателя: $T_H = 24 \cdot 10^{-3}$ м, $T_w = 5,75 \cdot 10^{-3}$ м, $a = 3$. На рисунке 5 представлена 3D-модель электродвигателя ДТА-125-6, спроектированного с данными параметрами.

На рисунке 6 штриховой линией представлена тяговая характеристика для продолжительного режима работы электродвигателя с данными параметрами. Характеристика получена путем моделирования электродвигателя в программе ANSYS RMxprt. На этом же рисунке сплошной линией

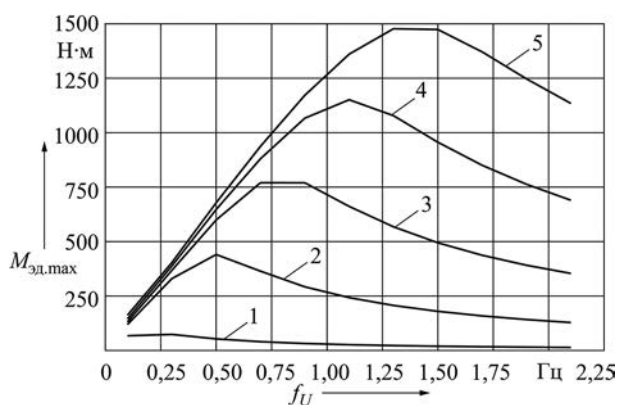


Рисунок 9 — Графики зависимости максимального момента электродвигателя $M_{\text{эл, max}}$ от частоты питающего напряжения f_u при различных значениях тока: кривая 1 — 50 А; 2 — 150 А; 3 — 250 А; 4 — 350 А; 5 — 450 А

Figure 9 — Graphs of the dependence of the maximum torque of the electric motor $M_{\text{эл, max}}$ on the supply voltage frequency f_u at different current values: curve 1 — 50 А; 2 — 150 А; 3 — 250 А; 4 — 350 А; 5 — 450 А

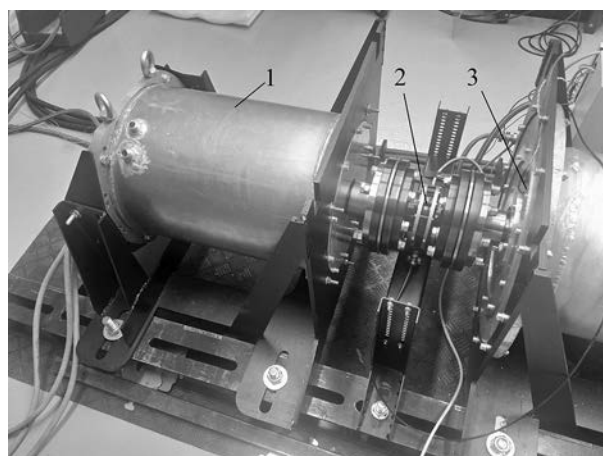


Рисунок 10 — Испытательный стенд
Figure 10 — Test bench

изображена тяговая характеристика, представленная линией 1 на рисунке 1 (требуемая тяговая характеристика). Можно отметить, что постоянство мощности обеспечивается во всем диапазоне ослабления поля при постоянном номинальном напряжении статора электродвигателя.

Как видно из рисунка 6, характеристика, полученная при моделировании, практически полностью совпадает с характеристикой, использованной при определении параметров электродвигателя.

Другой важной характеристикой тягового электродвигателя является характеристика максимального момента, она является исходной для проектирования силового преобразователя. Данная характеристика позволяет определить предельный ток, который обеспечит требуемый максимальный момент (см. рисунок 1).

Для анализа электромагнитных характеристик электродвигателя и построения характеристики максимального момента использовано программное обеспечение INFOLYTICA MAGNET [8]. На рисунке 7 представлено распределение индукции $B_{\text{эл}}$ для номинального режима работы.

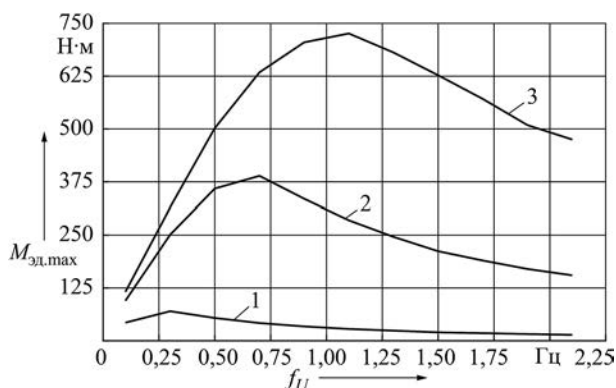


Рисунок 11 — Экспериментальные графики зависимости максимального момента электродвигателя $M_{эл.макс}$ от частоты питающего напряжения f_U

Figure 11 — Experimental graphs of the dependence of the maximum torque of the electric motor $M_{эл.макс}$ on the supply voltage frequency f_U

Равномерное распределение поля свидетельствует об оптимальном использовании электро-технической стали статора и ротора. Среднее значение $B_{эл} < 1,3$, что говорит о том, что сталь не перенасыщена.

На рисунке 8 представлено распределение намагничивающей силы $H_{эл}$ в зазоре между статором и ротором. Высокие значения $H_{эл}$ (более 500 кА/м) в зазоре говорят о том, что электродвигатель способен формировать большой момент.

На рисунке 9 представлена характеристика максимального момента электродвигателя $M_{эл.макс}$ в зависимости от частоты питающего напряжения f_U при различных значениях тока. По данным графикам можно сделать вывод, что для формирования максимального требуемого момента (см. рисунок 1) достаточно 350 А.

В настоящее время проводятся испытания разработанного электродвигателя [9, 10]. На рисунке 10 представлена фотография стенда с установленным на нем электродвигателем ДТА-125-6 (1), датчиком крутящего момента (2), нагружающего устройства (3).

На рисунке 11 представлены графики, аналогичные рисунку 9, но полученные экспериментально. Можно отметить, что величина максимального момента отличается не более чем на 5 %. Расхождение по частоте объяснимо неточным определением на этапе проектирования сопротивления лобовых частей.

Таким образом, предложенная методика проектирования тягового электродвигателя для ТС представляет собой последовательное выполнение следующих проектных процедур:

1. Построение тяговой характеристики электродвигателя на основе анализа тягово-скоростных свойств ТС.

2. Получение приближенных значений параметров электродвигателя с учетом его тяговой характеристики с использованием известных функциональных зависимостей.

3. Проведение вычислительного эксперимента в программе ANSYS RMxprt. Уточнение параметров электродвигателя на основе результатов эксперимента.

4. Анализ электромагнитных характеристик электродвигателя с использованием программного обеспечения INFOLYTICA MAGNET.

5. Изготовление электродвигателя, его испытания и сопоставление экспериментальных характеристик с расчетными.

Список литературы

1. Стратегия по снижению вредного воздействия транспорта на атмосферный воздух Республики Беларусь на период до 2020 года: № 82-Р, введ. 02.09.2013 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. — 2013. — 20 с.
2. Тарасик, В.П. Методика определения основных параметров и характеристик гибридного карьерного самосвала / В.П. Тарасик, О.В. Пузанова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2021. — № 1(70). — С. 59–70.
3. Тарасик, В.П. Теория движения автомобиля: учеб. для вузов / В.П. Тарасик. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 478 с.
4. Кацман, М.М. Электрические машины: учеб. для студентов средн. проф. учеб. заведений / М.М. Кацман. — 3-е изд., испр. — М.: Высш. шк., 2001. — 463 с.
5. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / под ред. И.П. Копылова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Юрайт, 2011. — 767 с.
6. ANSYS RMxprt [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cae-expert.ru/product/ansys-rmxprt>. — Дата доступа: 02.07.2021.
7. ANSYS (Ansoft) Maxwell RMxprt: введение в моделирование двигателя. Подробное руководство RMxprt [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://russianblogs.com/article/92881622223/>. — Дата доступа: 02.07.2021.
8. Infologic Design [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.infologicdesign.co.uk>. — Date of access: 02.07.2021.
9. Щукин, О.С. Испытания электрических машин: учеб. пособие / О.С. Щукин, Г.В. Малыгин. — Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2013. — 132 с.
10. Гольдберг, О.Д. Испытания электрических машин: учеб. для вузов / О.Д. Гольдберг. — 2-е изд., испр. — М.: Высш. шк., 2000. — 255 с.

STASENKO Igor S.First Category Software Engineer of the Chief Designer Department¹

E-mail: iharstasenko@strim-tech.com

HERASIMENKO Nikita V.Second Category Software Engineer of the Chief Designer Department¹

E-mail: gerasimenko_nikita@hotmail.com

SAVITSKI Viktor S.Second Category Design Engineer of the Chief Designer Department¹

E-mail: savitskii@strim-tech.com

¹STRIM LLC, Mogilev, Republic of Belarus

Received 23 July 2021.

METHODOLOGY FOR DESIGNING A TRACTION MOTOR FOR TRANSPORT

The article is devoted to the design of an asynchronous traction motor intended for work as part of an electric drive of vehicles: electric vehicles, electric buses, trams, trolley buses. The object of the study is a medium-sized bus. The required traction characteristics of the electric motor are constructed, the nominal and limiting characteristics of the increased torque. The dynamic characteristics have been built for a bus with a mechanical transmission and a diesel engine, as well as for a bus with an electric motor. A method is proposed for designing an electric motor based on mathematical modelling of its operation in the software complexes ANSYS RMxprt and INFOLYTICA MAGNET. According to this technique, the main parameters of the electric motor are determined. The results of modelling are given, graphs of the criteria dependence on the electric motor parameters. Experimental studies of the electric motor have been carried out. The results of mathematical modelling are compared with experimental ones. It was found that the discrepancy between the results of experimental and theoretical studies is no more than 5 %.

Keywords: electric transport, electric motor, traction characteristics, dynamic characteristics, electric motor parameters

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-1-58-24-30>**References**

1. Strategy to reduce the harmful effects of transport on the atmospheric air of the Republic of Belarus for the period up to 2020 of September 2, 2013 no. 82-R. *Ministry of natural resources and environmental protection of the Republic of Belarus*. Minsk, National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus Publ., 2013. 20 p. (in Russ.).
2. Tarasik V.P., Puzanova O.V. Metodika opredeleniya osnovnykh parametrov i kharakteristik gibridnogo karernogo samosvala [Procedure for determining main parameters and characteristics of a hybrid quarry dump truck]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2021, no. 1(70), pp. 59–70 (in Russ.).
3. Tarasik V.P. *Teoriya dvizheniya avtomobilya* [Theory of vehicle movement]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2006. 478 p. (in Russ.).
4. Katsman M.M. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 463 p. (in Russ.).
5. Kopylov I.P., Klovov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electric machines]. Moscow, Yurayt Publ., 2011. 767 p. (in Russ.).
6. ANSYS RMxprt. Available at: <https://cae-expert.ru/product/ansys-rmxprt> (accessed 02 July 2021) (in Russ.).
7. ANSYS (Ansoft) Maxwell RMxprt: vvedenie v modelirovanie dvigatelya. *Podrobnoe rukovodstvo* [ANSYS (Ansoft) Maxwell RMxprt: introduction to motor modelling. Detailed guide]. Available at: <https://russianblogs.com/article/92881622223/> (accessed 02 July 2021) (in Russ.).
8. Infologic Design. Available at: <https://www.infologicdesign.co.uk> (accessed 02 July 2021).
9. Shchukin O.S., Malygin G.V. *Ispytaniya elektricheskikh mashin* [Testing of electric machines]. Nizhnevartovsk, Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta Publ., 2013. 132 p. (in Russ.).
10. Goldberg O.D. *Ispytaniya elektricheskikh mashin* [Testing of electric machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 255 p. (in Russ.).