

ОСОБЕНОСТИ НА ТЕГЛИТЕЛНО-СКОРОСТНО ИЗЧИСЛЕНИЕ НА АВТОМОБИЛ С ЕЛЕКТРИЧЕСКО ЗАДВИЖВАНЕ

Давид Стоилковски, Пенко Цветков Петков
stoilkovskidavid@gmail.com, ppetkov@vtu.bg

Висше транспортно училище "Тодор Каблешков"
Ул. "Гео Милев" 158 София 1574 ,
БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: автомобил, акумулаторна батерия; електрическо задвижване, тягов електродвигател, показатели на теглително-скоростните свойства

Резюме: Една от възможностите за преодоляване на последствията от нарастването цената на горивата и замърсяването на околната среда от транспортните средства е прилагането на електрическа енергия за задвижване на автомобилите. Теглително-скоростното изчисление на електромобили се различава от пресмятането на автомобили, задвижване от конвенционални двигатели с вътрешно горене. В работата е представена последователност на теглително-скоростно изчисление на автомобил с електрическо задвижване на етап проектиране. Обосновано е избирането на тягов електродвигател и определяне на предавателното число на механичния редуктор. Определени са основните показатели, характеризиращи динамичните качества на електромобила.

УВОД

Проблемите със замърсяването на околната среда с всяка изминала година придобиват по-голяма актуалност. Отделяните вредни емисии от автомобилния транспорт заемат значителен дял от общите излъчвания на всички източници. За намаляване на негативното въздействие на транспортните средства върху околната среда непрекъснато се търсят решения за създаване на автомобили с високи екологични показатели. Понастоящем една от възможните алтернативи за подобряване на екологичните и енергийно-икономически проблеми на конвенционалните автотранспортни средства (АТС) е преминаването на автопарка към електрическо задвижване. По отношение процедурата на извършване на теглително-скоростно изчисление на автомобил с електрическо задвижване на етап проектиране, съществуват известни различия в сравнение с пресмятането на АТС, задвижвано от конвенционален двигател с вътрешно горене (ДВГ).

1. Състояние на проблема – анализ на последни публикации

Идеята за използване на електрическо задвижване в транспортните средства не е нова. Производството на автомобили и електромобили е започнало почти едновременно в края на XIX и началото на XX век [4]. През последните 20 – 30 години

на XX век, във връзка с възникналите енергийни кризи и екологични проблеми, създадени от автомобилния транспорт, се увеличава производството и използването на електрически автомобили основно за движение в градски условия. От началото на XXI век се забелязва значително нарастване на интереса към електромобилите и тяхното перспективно използване [8], [10].

Основна част от последните разработки, посветени на електромобилите са свързани с проблеми на задвижването и източниците на електрическа енергия [1], [5], [7]. В тях обикновено се представя сравнителен анализ на параметри и характеристики на различни типове тягови електродвигатели и видове акумулаторни батерии. Напоследък за задвижване на електрически транспортни средства се прилагат специално произведени за тази цел електродвигатели.

Комплексна методика за пресмятане и избиране на оптимални конструктивни параметри на задвижване на електромобил е представена в работата [3]. Създаването на автомобили с електрическо задвижване, описание на техни характеристики и тенденции в развитието им е отразено в работите [7], [9].

Поради особеностите в задвижването на електромобилите не е установена единна методика за извършване на теглително-скоростно изчисление на автомобил с електрическо задвижване. Целта на разработката е, като се отчитат особеностите на електрическото задвижване, да се определят показателите на теглително-скоростните свойства при проектно изчисление на електромобил. За реализиране на целта, следва последователно да бъдат изпълнени задачите:

- 1) Предварително проучване на подобни конструкции автомобили и избиране на параметри, необходими за провеждане на теглително-скоростното изчисление;
- 2) Определяне на необходимата мощност за движение на автомобила, обосновка и избиране на тягов електродвигател;
- 3) Определяне на предавателното число на механичния редуктор за задвижване на ходовите колела;
- 4) Построяване на теглително-скоростната, динамичната и характеристиката на ускоряването на автомобила;
- 5) Определяне на времето и пътя за ускоряване.

2. Същност на провеждане на теглително-скоростното изчисление

За обект на пресмятане е избран лек автомобил, изходните параметри на който са представени в таблица 1.

Таблица 1. Изходни данни за проектирания автомобил

№ по ред	Наименование на изходните параметри	Означение
1.	Тип на автомобила	лек
2.	Брой на превозваните пътници	4 + 1
3.	Колесна формула	4 x 2
4.	Тип на задвижването	електрическо
5.	Максимална скорост на движение V_{max} , <i>km/h</i>	148
6.	Максимален преодоляван наклон на пътя i_{max} , %	32

На базата на проведено предварително проучване на съществуващи конструкции автомобили с електрическо задвижване, е избран прототип на проектирания. Техническите параметри на прототипа са посочени в таблица 2. Някои от стойностите

на параметрите на прототипа са близки до зададените в техническото задание за проектиране на електромобила.

Таблица 2. Технически данни за прототипния автомобил [11]

№ по ред	Наименование на основни параметри	Означение
1.	Марка и модел на автомобила	Hyundai IONIQ Electric
2.	Брой превозвани пътници	4 + 1
3.	Максимална скорост на движение V_{max} , km/h	165
4.	Време за ускоряване до скорост $V = 100 km/h$	10,2 s
5.	Мощност на тяговия електродвигател P_e , kW	88
6.	Максимална честота на въртене на вала n_e , min^{-1}	9000
7.	Максимален въртящ момент на тяговия електродвигател $M_{e,max}$, Nm	295
8.	Капацитет на тяговата акумулаторна батерия $Q_{аб}$, kWh	28
9.	Мощност на тяговата акумулаторна батерия $P_{аб}$, kW	98
10.	Трансмисия	безстепенна редукторна
11.	Тип на окачването - предно - задно	независимо независимо
12.	Типоразмер на пневматичните гуми	205/55 R 16 T
13.	Спирачна уредба	хидравлична

Таблица 3. Избираеми параметри, необходими за провеждане на изчисленията

№ по ред	Наименование на параметъра	Стойност
1.	Базов коефициент на съпротивление при търкаляне f_0	0,010
2.	Коефициент на обтекаемост k_w , $(N.s^2)/m^4$	0,24
3.	Коефициент на запас от мощност p_v	1,2
4.	К. п. д. на механичния редуктор η_T	0,97
5.	Маса на тяговата акумулаторна батерия m_6 , kg	250
6.	Напрежение на тяговата акумулаторна батерия U_6 , V	360
7.	Капацитет на тяговата акумулаторна батерия Q_6 , kWh	28
8.	Маса на един пътник, kg	70
9.	Маса на водача m_b , kg	70
10.	Маса на багажа, принадлежаща на един пътник и водача, kg	10

За провеждане на изчислителната процедура предварително се избирани група параметри, стойностите на които са в съответствие с тенденциите на изменение, отнасящи се за съвременни АТС [6], [8]. В таблица 3 са представени избираемите параметри.

2.1. Определяне на масовите и геометрични параметри на автомобила

При определяне на собствената маса на електромобила са взети предвид препоръките на Правило № 101 на Европейската икономическа комисия към Организацията на обединените нации (ИКЕ – ООН). В съответствие с тези препоръки собствената маса на автомобили с електрическо задвижване се определя от зависимостта

$$(1) m_c = m_k + m_b,$$

където m_k е конструктивната маса на автомобила; в случая $m_k = 1170 \text{ kg}$; $m_b = 250 \text{ kg}$ - масата на служебната и тяговата акумулаторна батерия и зарядното устройство.

Пълната маса е

$$m = m_c + m_b + m_t = 1420 + 70 + [(4 \times 70) + 10(4 + 1)] = 1820 \text{ kg}.$$

Разпределението на пълната маса е, както следва: преден мост $m_1 = 873,6 \text{ kg}$; заден мост $m_2 = 946,4 \text{ kg}$.

На базата на най-натоварения мост на автомобила от каталог на фирмата "DAYTON" са избрани пневматични гуми от типоразмер 205/55 R 16 T. Основните параметри на гумите са: номинално натоварване $G_k = 615 \text{ kg}$; вътрешно налягане $p_b = 0,22 \text{ MPa}$; максимална скорост $V_{пр} = 190 \text{ km/h}$; статичен радиус $r_{ст} = 0,291 \text{ m}$.

Геометричните размери на проектирания автомобил са приети както на прототипа, т. е. дължина $L_a = 4,47 \text{ m}$; широчина $B_a = 1,82 \text{ m}$; височина $H_a = 1,45 \text{ m}$.

2.2. Определяне на мощността за движение на автомобила

Необходимата мощност за движение на автомобила с максималната скорост върху хоризонтален път с асфалтобетонно покритие се определя по формулата

$$(2) P_{k,v} = P_{f,v} + P_{w,v} = f_v G V_{\max} + k_w F_H V_{\max}^3,$$

където $G = mg = 17,854 \text{ kN}$ е пълното тегло на електромобила; $f_v = f_0(1 + 4,41V_{\max}^2) = 0,010(1 + 4,41 \times 41,2^2) = 0,0175$ - коефициентът на съпротивление при търкаляне; $F_H = 0,78B_a H_a = 2,06 \text{ m}^2$ - челната площ (Миделово сечение) на автомобила.

След заместване на числените стойности на отделните величини в израза (2) за мощността се получава $P_{k,v} = 47,41 \text{ kW}$.

Най-малката допустима мощност на двигателя за движение на автомобила с максималната зададена скорост се определя от израза

$$P_{e,v}^* = P_{k,v} / (\eta_T k_p) = 47,41 / (0,97 \times 0,955) = 51,17 \text{ kW},$$

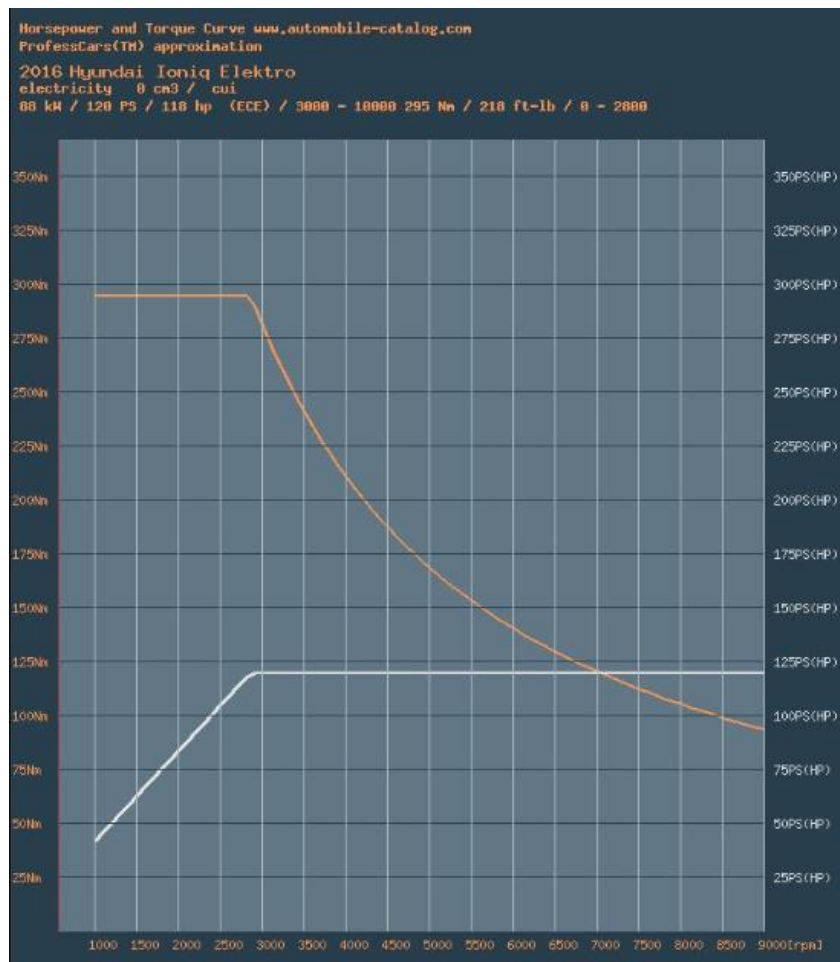
където $k_p = 0,955$ е корекционният коефициент, отчитащ условията на работа на тяговия електродвигател върху автомобила за разлика от работата му по стендовата характеристика.

Тяговият електродвигател на проектирания електромобил при ъглова скорост на вала на ротора $\omega_{e,v}$ трябва да развива мощност $P_{e,v} \geq P_{e,v}^*$, т. е. с отчитане на коефициента на запас $P_{e,v} = p_v P_{e,v}^* = 1,2 \times 51,17 = 61,4 \text{ kW}$.

2.3. Избиране на тягов електродвигател

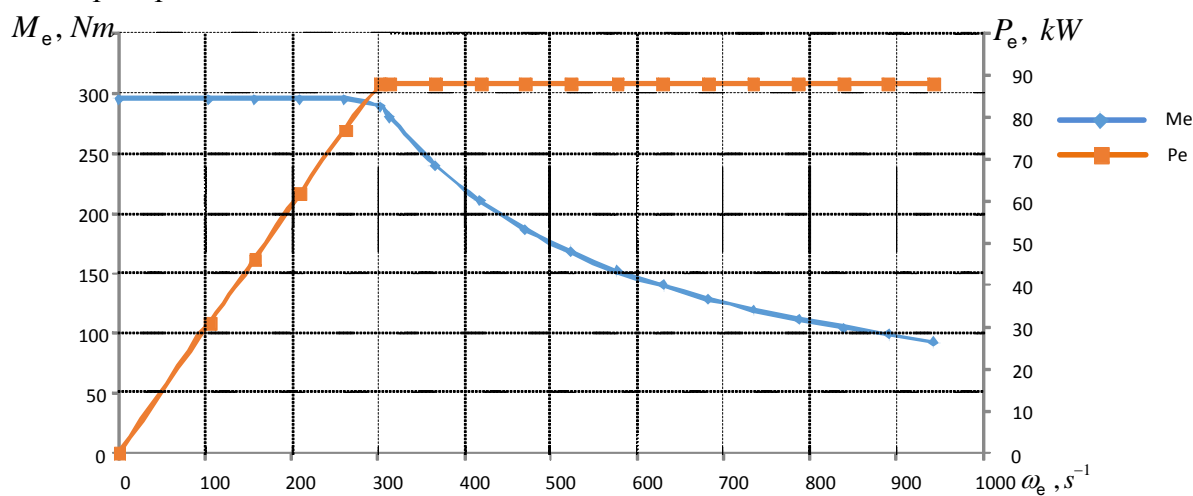
Като се отчитат изискванията за висока икономичност, подходяща теглителна характеристика в широк диапазон на изменение на честотата на въртене на вала, възможност за преодоляване на временни претоварвания, просто и евтино обслужване, за задвижване на проектирания автомобил е избран проминливотоков синхронен

електродвигател. Заводската стендова механична характеристика на избрания електродвигател е показана на фиг. 1 [11].



Фиг. 1. Заводска механична характеристика на избрания тягов електродвигател

На фиг. 2 е представена работна характеристика на електродвигателя, построена в зависимост от изменението на ъгловата скорост на въртене ω_e на вала на ротора.



Фиг. 2. Работна механична характеристика на тяговия електродвигател

2.4. Определяне на предавателното число на механичния редуктор

Предаването на въртящия момент от тяговия електродвигател към задвижващите колела на автомобила е прието да се осъществява посредством механичен редуктор с постоянно предавателно число. Стойността на предавателното число се определя от две условия. Първото условие е автомобилът при ъглова скорост на въртене на вала на електродвигателя $\omega_e = \omega_{e,v} = 942 \text{ s}^{-1}$ да достигне предписаната максимална скорост на движение върху хоризонтален път, т. е.

$$(3) u_{p,v} = (\omega_{e,v} r_T) / V_{\max},$$

където $r_T \approx r_{CT} = 0,291 \text{ m}$ е радиусът на търкаляне на ходовите колела.

Второто условие е за преодоляване на зададеното максимално пътно съпротивление. За целта трябва да бъде изпълнено неравенството

$$(4) u_{p,\psi} \geq (\psi_{1,\max} Gr_D) / (M_{e,\max} \eta_T),$$

където $\psi_{1,\max} = i_{\max} + f_\psi = 0,32 + 0,02 = 0,34$; $M_{e,\max} = 295 \text{ Nm}$ - максималният въртящ момент на електродвигателя при ъглова скорост на вала $\omega_{e,m} = 200 \text{ s}^{-1}$.

Следователно, задачата се свежда до избор на оптимално предавателно число на редуктора между граничните стойности $u_{p,\text{опт}} = u_{p,v} \div u_{p,\psi}$ [2].

Като се избере предавателно число на редуктора, близко до $u_{p,v}$, електромобилът ще развива зададената максимална скорост V_{\max} , но може да загуби динамиката на ускоряването. От друга страна, ако се избере предавателно число със стойност $u_{p,\psi}$, автомобилът ще преодолява зададения максимален наклон на пътя, но ще трябва да се коригира максималната му скорост на движение.

След изразяване на задвижващата сила F_k при движение на автомобила с максимална скорост V_{\max} , скоростта V чрез ъгловата скорост на въртене ω_e и съответни преобразувания, се получава кубично уравнение от вида

$$(5) M_e \eta_T u_p^3 - f G u_p^2 r_T - k_w F_H \omega_e^2 r_T^3 = 0.$$

Решението на уравнението е извършено чрез прилагане формулата на Кардано. За предавателното число на редуктора е получена стойност $u_{p,\text{опт}} = 6,857$, с която е извършено теглително-скоростното изчисление на електромобила.

3. Резултати от теглително-скоростното изчисление

Проектното теглително-скоростното изчисление е извършено за движение на автомобила върху хоризонтален път [6]. Пресмятанията са проведени на РС с използване на програмен продукт Excel. Резултатите от изчисленията са показани във вид на графични зависимости.

Силвият баланс, необходим за построяване на теглително-скоростната характеристика се изразява с уравнението

$$(6) F_k = F_f + F_w,$$

където $F_k = (M_e u_T \eta_T) / r_D$ е задвижващата сила; F_f - съпротивителната сила от търкаляне; F_w - силата от въздушното съпротивление.

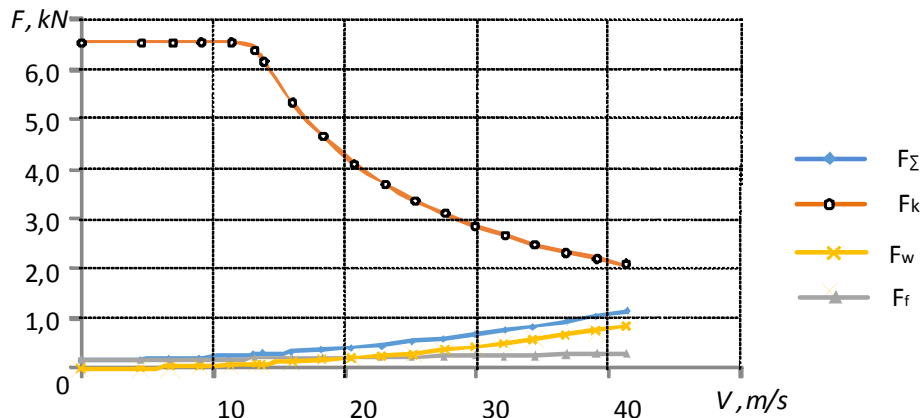
Сумарната съпротивителна сила при движение на автомобила е

$$(7) F_\Sigma = F_f + F_w = fG + k_w F_H V^2.$$

За изчисляване на текущите стойности на скоростта на движение се използва изразът

$$(8) V = (\omega_e r_D) / u_T, \text{ m/s}.$$

На фиг. 3 е показан видът на получената теглително-скоростната характеристика на проектирания електромобил.

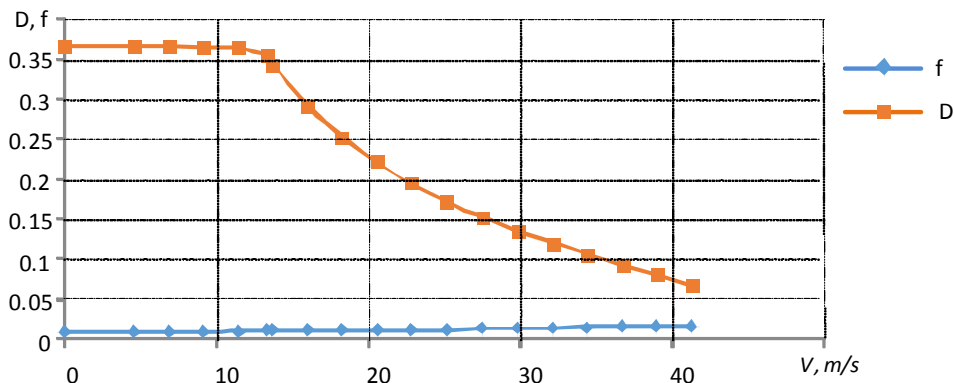


Фиг. 3. Теглително-скоростна характеристика на лек автомобил с електрическо задвижване

Динамичната характеристика на автомобила изразява изменението на динамичния фактор от скоростта на движение. Безразмерната величина динамичен фактор се определя по формулата

$$(9) \quad D = (F_k - F_w) / G.$$

Графиката на динамичната характеристика е представена на фиг. 4.



Фиг. 4. Динамична характеристика на автомобила

Ускоряемостта на автомобила характеризира способността му бързо да увеличава скоростта си на движение. Оценъчни показатели за ускоряемостта са ускорението, времето и изминатият път за ускоряване до зададена скорост. При определяне на показателите се приема, че автомобилът се движи праволинейно върху хоризонтален път с асфалтобетонно покритие без буксуване на задвижващите колела.

Ускорението за различни стойности на скоростта на движение се изчислява от израза

$$(10) \quad j = (D - f) \frac{g}{\delta_{в,к}},$$

където $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ е земното ускорение; $\delta_{в,к}$ - коефициентът, характеризиращ влиянието на въртящите се маси в автомобила.

При определянето на коефициента, характеризиращ влиянието на въртящите се маси се отчита обстоятелството, че редукторът в трансмисията на електромобила е с постоянно предавателно число. Тогава $\delta_{в,к} = 1 + \sigma_1 + \sigma_2$,

където $\sigma_1 = 0,025$ и $\sigma_2 = 0,035$ [6]. Получава се $\delta_{в,к} = 1,06$.

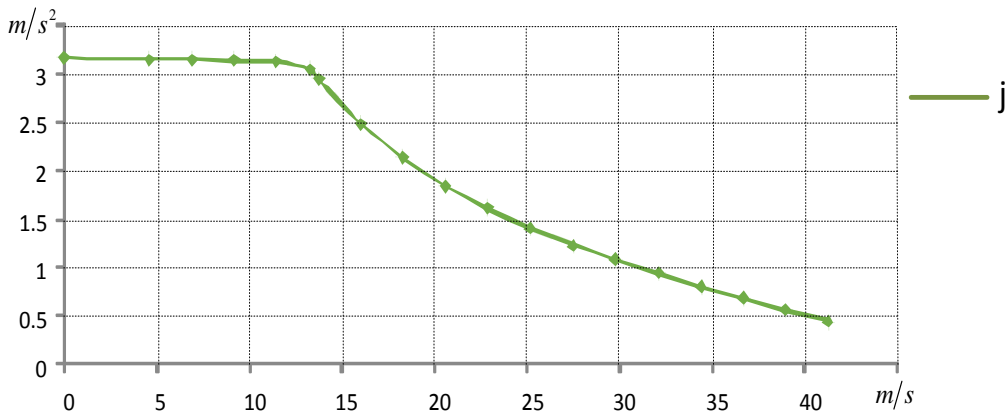
На фиг. 5 е показана графиката на ускорението на електромобила.

Времето за ускоряване на автомобила до зададена скорост на движение се определя чрез решението на интеграла

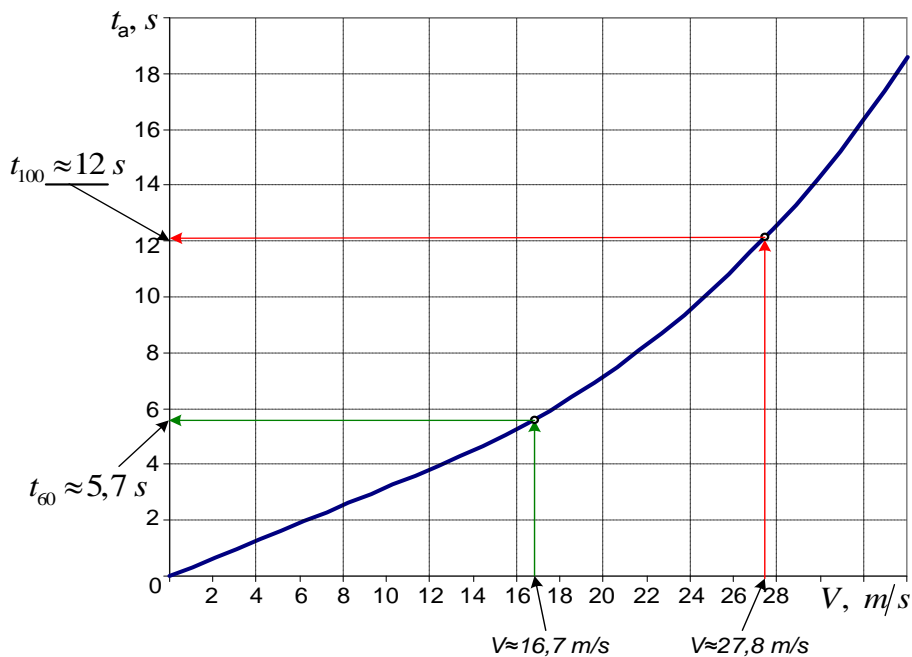
$$(11) \quad t = \frac{1}{j} \int_{V_1}^{V_2} dV, \text{ s}.$$

За решението на интеграла (11) е приложен числен метод, като е използвана графиката на ускорението на автомобила от фиг 5.

Графиката на времето за ускоряване е представена на фиг. 6. Върху графиката са показани времената за ускоряване на автомобила с електрическо задвижване до скорости $V = 100 \text{ km/h}$ ($V \approx 27,8 \text{ m/s}$) и $V = 60 \text{ km/h}$ ($V \approx 16,7 \text{ m/s}$).



Фиг. 5. Графиката на ускорението на автомобила



Фиг. 6. Графиката на времето за ускоряване на автомобила

4. Заключение

В таблица 4 за сравнение са представени стойностите на основни параметри и показатели на теглително-скоростните свойства на проектирания автомобил с електрическо задвижване и избрания прототип. От приведените данни в таблицата е видно, че при почти еднакви масови параметри и еднаква специфична мощност

(енергозапасеност) на проектирания електромобил и прототипа е получена разлика във времената за ускоряване. Времето за ускоряване до скорост $V = 100 \text{ km/h}$ на проектирания автомобил е приблизително с 2 s по-голямо от времето на прототипа. Вероятно разликата във времената се дължи на точността на аналитичните пресмятания или на измерването на времето при експерименталното изпитване на прототипа.

Таблица 4. Сравнение на основни параметри и показатели на проектирания електромобил и прототипа

№ по ред	Наименование на параметрите и показателите	Проектиран електромобил	Прототип – марка и модел Hyundai IONIQ Electric
1.	Пълна маса m , kg	1820	1880
2.	Типоразмер на пневматичните гуми	205/55 R 16 T	205/55 R 16 T
3.	Параметри на тяговия електродвигател: - тип; - максимална мощност $P_{e,max}$, kW ; - номинален въртящ момент при „стоп” режим $M_{e,n}$, Nm ; - максимална честота на въртене n_e , min^{-1}	променливо-токов, синхронен 88 295 9000	променливо-токов, синхронен 88 295 9000
4.	Специфична мощност (енергозапасеност) E , kW/kg	0,048	0,046
5.	Тягова акумулаторна батерия: - капацитет $Q_{аб}$, kWh ; - мощност $P_{аб}$, kW	28 98	28 98
6.	Трансмисия	безстепенна редукторна	безстепенна редукторна
7.	Максимална скорост на движение V_{max} , km/h	148	165
8.	Време за ускоряване до скорост $V = 100 \text{ km/h}$	12 s	10,2 s

Предложеният метод за аналитично определяне показателите на теглително-скоростните свойства на автомобил с електрическо задвижване на етап проектиране може да се използва в учебния процес по дисциплини, свързани с автомобилната техника. Методът е приложим и за практиката при проектиране на нови конструкции електромобили или конвертиране на автомобили, задвижвани от двигатели с вътрешно горене в електрически.

ЛИТЕРАТУРА:

[1]. Бербиренков И. А., В. В. Лохнин. Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе электромобиля. Известия Томского политехнического университета, 2011, т. 318, № 4. с. 148 – 150.

- [2]. Гурьянов Д. И., С. А. Пионтковская, А. Б. Петленко. Методика расчета передаточного числа трансмиссии электромобиля. Автотракторное электрооборудование, 2004, № 2. с. 22 – 24.
- [3]. Козлова Т. А. Разработка методики расчета и выбор рациональных конструктивных параметров тягового привода электромобиля. Диссертация, Нижний Новгород, 2017. 154 с.
- [4]. Косев К. П., Д. Н. Николова. Электромобили. С., Техника, 1979. 133 с.
- [5]. Мигаль В. Д., В. Я. Двадненко. Выбор электродвигателей для электромобилей и гибридных автомобилей. Вестник ХНАДУ, вып. 75, 2016. с. 116 – 119.
- [6]. Петков П. Ц. Ръководство за курсово и дипломно проектиране по автомобилна техника – първа част. С., ВТУ “Тодор Каблешков”, 2011. 137 с.
- [7]. Поддубко С. Н., А. В. Белевич, В. И. Адашкевич. Ходовой макет электромобиля: этапы создания и первые результаты. Механика машин, механизмов и материалов, 2017, № 4 (41). с. 7 – 14.
- [8]. Шабанов А. В., В. В. Ломакин. Характеристики электромобилей и тенденции развития электропривода. Журнал автомобильных инженеров, № 3 (86), 2014. с. 38 – 43 .
- [9]. Ютт В. Е., В. И. Строганов. Электромобили и автомобили с комбинированной энергоустановкой. Расчет скоростных характеристик. Москва, МАДИ, 2016. 108 с.
- [10]. Ehsani M., Y. Gao, S. E. Gay and A. Emadi. Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory and Design. CRC Press LLC, 2005. 395 p.
- [11]. http://www.automobile-catalog.com/car/2018/2453840/hyundai_ioniq_elektro.html

FEATURE OD TORQUE-SPEED CALCULATION FOR VEHICLE WITH ELECTRIC DRIVE

David Stoilkovski, Penko Tsvetkov Petkov
stoilkovskidavid@gmail.com, ppetkov@vtu.bg

University of Transport “Todor Kableschkov”
1574 Sofia, 158 Geo Milev str.,
BULGARIA

Key words: car, battery; electric drive, electric motor, torque-speed feature.

Abstract: One of the ways to overcome the effects of rising fuel costs and environmental pollution from transport is the use of electric power to propel vehicles. Calculation of the torque of the electric vehicle differs from the calculation of the vehicle with a conventional internal combustion engine. This article presents a sequence of calculating the torque velocity for an electric propulsion vehicle at the design stage. It is justified to choose a electric motor and to determine the gear ratio of the mechanical reducer. The main indicators characterizing the dynamic qualities of the electric vehicle are defined.