

## **МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ ПРЕДАВАТЕЛНОТО ЧИСЛО НА ТРАНСМИСИЯТА НА АВТОМОБИЛ С ЕЛЕКТРИЧЕСКО ЗАДВИЖВАНЕ**

**Давид Стоилковски, Пенко Цветков Петков**  
[stoilkovskidavid@gmail.com](mailto:stoilkovskidavid@gmail.com), [ppetkov@vtu.bg](mailto:ppetkov@vtu.bg)

*Висше транспортно училище “Тодор Каблешков”,  
Гео Милев 158, София 1574,  
БЪЛГАРИЯ*

**Ключови думи:** *автомобил, електрическо задвижване, трансмисия, предавателно число, динамичен баланс*

**Резюме:** *В последните години на XX и изминалия период на XXI век проблемите за развитие на екологичен наземен транспорт придобиха особена актуалност. В тази връзка автомобилите с електрическо задвижване вече се приемат като потенциално необходими транспортни средства, алтернатива на конвенционалните, задвижвани от двигатели с вътрешно горене. Производството и експлоатацията на електрически автомобили обаче е свързано с някои все още нерешени проблеми, както от технически, така и от икономически аспект.*

*Високи показатели на експлоатационните свойства на електромобилите е възможно да бъде постигнато чрез прилагане на технико-обосновани методи на етапа на тяхното проектиране и конструиране, както и внедряване на съвременни технологии и материали при производството им. В работата се представя метод за определяне предавателното число на механичен редуктор, вграден между тяговия електродвигател и задвижващите колела на електромобил. Редукторът осъществява трансформиране на предавания въртящ момент. Получени са конкретни резултати, удовлетворяващи зададени условия на движение на електромобила.*

### **УВОД**

Повишените изисквания към енергийната икономичност и екологичната безопасност при експлоатацията на автомобилния транспорт налагат проектантите и конструкторите да търсят нетрадиционни решения на тези проблеми. За подобряване на енергийните показатели и ограничаване на негативното въздействие на автомобилите върху околната среда се прилага електрическо задвижване в автомобилните конструкции. В последните години перспективността на използването на електрически автомобили в световен мащаб значително нарасна. Тази тенденция се основава на общото развитие на енергетиката и усъвършенстването на основните електромобилни компоненти (тягово електрозадвижване, акумулаторни батерии, силова електроника, системи за регулиране и управление и др.). Като резултат от това се постигна увеличаване на пробегата на електромобилите и разшири областта на тяхното приложение. Един от проблемите при проектиране на електромобили е начинът на

предаване на въртящия момент от вала на ротора на тяговия електродвигател (ТЕД) към задвижващите ходови колела и в частност определянето на предавателното число на трансмисията.

### 1. Състояние на проблема на съвременния етап

Една от основните разлики между електромобилите и класическите автомобили, задвижвани от двигатели с вътрешно горене (ДВГ) се състои не само в принципа на работа на силовите им агрегати, но и в типа на използваните трансмисии за предаване на въртящия момент към задвижващите колела. В трансмисиите на автомобилите с ДВГ винаги се вграждат многостепенни предавателни кутии (ПК), при което колкото броят на предавките е по-голям, толкова по-добре теглително-скоростната им характеристика се приближава до оптималната.

По отношение на трансмисията на електромобилите (предавателно число, тип, брой предавки, конструктивни особености и др.) сред проектантите и конструкторите не съществува единно мнение [4], [7], [8]. Една група от тях подчертават, че при използване на ТЕД с електронно регулиране на честотата на въртене и въртящия момент не е необходима ПК за допълнително трансформиране на момента. Освен това, за разлика от ДВГ, ТЕД не се нуждае от система за отделянето му от трансмисията при празен ход, когато електромобилът е спрял. Понятието «празен ход» при електродвигателите не съществува [3]. Становището на друга група конструктори е, че ако се използват ТЕД с ниска честота на въртене, които развиват голям въртящ момент, за намаляване на тока и увеличаване на пробега на електромобила е необходима ПК. Използването на ПК допълнително увеличава механичните загуби в трансмисията.

Степента на трансформация на въртящия момент зависи от предавателното число на трансмисията, което се определя от съотношението [2]

$$(1) \quad u_T = M_k / (M_e \eta_T),$$

където  $M_k$  е задвижващият момент, приложен върху колелата на електромобила;  $M_e$  - въртящият момент на двигателя;  $\eta_T$  - к. п. д. на трансмисията.

От друга страна предавателното число се изразява и като съотношение между ъгловите скорости на вала на двигателя и ходовите колела, т. е.

$$(2) \quad u_T = \omega_e / \omega_k = (\omega_e r_T) / V,$$

където  $\omega_e$  е ъгловата скорост на вала на двигателя;  $\omega_k$  - ъгловата скорост на ходовите колела;  $V$  - постъпателната скорост на транспортното средство;  $r_T$  - радиусът на търкаляне на колелата.

На практика при електромобилите в зависимост от стойността на предавателното число съществува голямо разнообразие от схемни решения и конструкции на трансмисии. При леките електромобили, където предавателното число не е голямо обикновено се прилагат едностепенни редуктори, често изпълнени като главно предаване, конструктивно обединено с диференциала. В качеството на пример на фиг. 1 е показан общ вид на такъв редуктор, вграден между ТЕД и задвижващия мост на лек електромобил. При по-големи стойности на предавателното число се използват схеми и конструират дву- или тристепенни трансмисии. Редуктори от такъв тип обикновено се използват в трансмисиите на товарни електромобили и електрически автобуси [6], [9].



Фиг. 1. Общ вид на редуктор, вграден в задвижващ мост на електромобил [8]

Характерът на изменение на показателите на ТЕД (мощност и въртящ момент от честотата на въртене) по механичната му характеристика е значително по-благоприятен в сравнение с изменението на показателите на работния цикъл на ДВГ (бензинов или дизелов) по скоростната характеристика. Затова проектантите на електромобили, вместо да монтират ПК с голям брой предавки, просто подбират предавателно число, което осигурява нормален компромис между показатели на теглително-скоростните свойства. В съществуващите разработки не е посочен комплексен метод за определяне на предавателното число на трансмисията, който да е приложим за автомобили с електрическо задвижване.

Целта на разработката е да се предложи обоснован метод за определяне на предавателното число на механичния редуктор, вграден между тяговия електродвигател и задвижващите колела, което да удовлетворява зададени условия на движение на електромобила.

## 2. Същност на метода

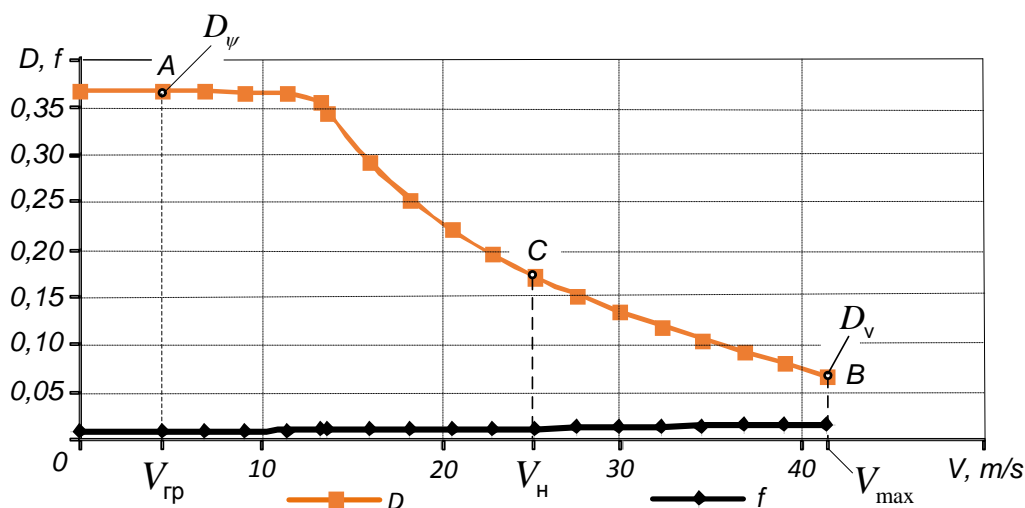
От краткия обзор на състоянието на проблема, извършен в т.1 следва, че при проектиране на електромобили възниква въпросът за определяне на предавателните числа, схемите и конструктивните параметри на трансмисията за предаване на въртящия момент от ТЕД към задвижващите колела. Същността на предлагания метод за пресмятане на стойността на предавателното число се базира на анализ на показателите на теглително-скоростните свойства на проектирания електромобил. Тези показатели най-добре се представят чрез динамичния баланс и динамичната характеристика на електромобила.

В общия случай динамичният баланс на електромобила се изразява чрез уравнението

$$(3) \quad D = \frac{F_n - F_w}{mg},$$

където  $D$  е динамичният фактор;  $F_n = (M_e u_t \eta_t) / r_t$  - периферната сила върху задвижващите колела;  $F_w = k_w F_H V^2$  - силата от въздушното съпротивление ( $k_w$  -

коэффициентът на обтекаемост на транспортното средство;  $F_H$  - челната площ на автомобила;  $V$  - скоростта на движение);  $m$  - пълната маса на електромобила. Характерът на изменението на динамичния фактор от скоростта на движение е представено на фиг. 2 чрез динамичната характеристика на електромобила. Върху същата фигура е показана и графиката на коефициента на съпротивление при търкаляне.



Фиг. 2. Динамична характеристика на проектирания електромобил [5]

Ако във формула (3) силите  $F_n$  и  $F_w$  се заместят с техните изрази и се извърши съответно преобразуване, за предавателното число на трансмисията на електромобила се получава

$$(4) \quad u_T = \frac{mgDr_T + k_w F_H V^2 r_T}{M_e \eta_T}.$$

За осъществяване на правилен избор на предавателното число на трансмисията на електромобил е необходимо да се отчитат следните две условия:

- при движение върху хоризонтален път електромобилът трябва да достигне проектната зададена максимална скорост;
- електромобилът трябва да преодолява предписаният наклон на пътя, посочен в заданието за проектиране.

#### **Случай за достигане на зададената максимална скорост на движение**

При движение на електромобила върху хоризонтален път с асфалтобетонно покритие в много добро състояние ( $i = 0$  е наклонът на пътя в %) енергията, отдавана от тяговата акумулаторна батерия се използва за достигане на максималната му скорост  $V = V_{max}$  (т. В на фиг. 2). В случая предавателното число се определя като във формула (4) се заместят динамичният фактор със стойността  $D_v$ , скоростта с  $V_{max}$  и въртящият момент със стойността му при максимална скорост  $M_{e,v}$ . Получава се

$$(5) \quad u_T^v = \frac{mgD_v r_T + k_w F_H V_{max}^2 r_T}{M_{e,v} \eta_T}.$$

**Случай за преодоляване на зададения максимален наклон на пътя**

Динамичният фактор при преодоляване на максималния пътен наклон е  $D_\psi = \psi_{\max} = f_\psi + i_{\max}$ , където  $\psi_{\max}$  е коефициентът на общо пътно съпротивление;  $f_\psi$  - коефициентът на съпротивление при търкаляне (приема се  $f_\psi = 0,02$ ). Електромобилът е в състояние да преодолее максималния наклон  $i_{\max}$  при гранична скорост на движение  $V = V_{\text{гр}}$  (т. А на фиг. 2) и въртящ момент на ТЕД  $M_{e,\max}$ . За този случай предавателното число се пресмята също по формула (4) като динамичният фактор се замести с неговата стойност  $D_\psi$ , а скоростта - с  $V_{\text{гр}}$ , при което

$$(6) \quad u_T^\psi = \frac{mgD_\psi r_T + k_w F_H V_{\text{гр}}^2 r_T}{M_{e,\max} \eta_T}.$$

Участъкът от динамичната характеристика, ограничен от т. А и т. В определя възможността на електромобила да се движи със зададени скорости и да преодолява различни пътни наклони (например за т. С движението е с номинална скорост  $V_H = 25 \text{ m/s}$ ). Това характеризира претоварващите свойства на ТЕД и компонентите на тяговата система по температурен режим.

От разгледаните случаи следва, че задачата се свежда до избор на предавателно число на трансмисията  $u_T^{\text{опт}}$  между получените гранични стойности  $u_T^V$  и  $u_T^\psi$ , т. е.

$$(7) \quad u_T^{\text{опт}} = (u_T^V \div u_T^\psi).$$

При избиране на оптималното предавателно число на трансмисията трябва да се отчитат следните обстоятелства:

- избирайки предавателно число на редуктора, близко до  $u_T^V$ , електромобилът ще е в състояние да достигне зададената максимална скорост на движение  $V_{\max}$ , но могат да се намалят стойностите на показателите на динамичните му свойства (време и път за ускоряване и възможността да преодолее зададения пътен наклон);

- ако се избере стойност на предавателното число, близко до  $u_T^\psi$ , електромобила ще преодолява зададения максимален наклон на пътя  $i_{\max}$ , но ще трябва да се коригира максималната му скорост на движение.

Ако от уравнение (2) се изрази постъпателната скорост на електромобила чрез ъгловата скорост на вала на ТЕД  $V = (\omega_e r_T) / u_T$  и се замести във формула (4), след преработка се получава израз от вида

$$(8) \quad M_e u_T^3 \eta_T - mg D u_T^2 r_T - k_w F_H \omega_e^2 r_T^3 = 0.$$

В получения израз предавателното число на трансмисията е от втора и трета степен. За решение изразът се представя чрез уравнението

$$(9) \quad ax^3 + bx^2 + cx + d = 0,$$

където  $a = M_e \eta_T$ ;  $b = -mg D r_T$ ;  $c = 0$ ;  $d = -k_w F_H \omega_e^2 r_T^3$ ;  $x = u_T$ .

След като уравнение (9) се раздели на величината  $a$  и вместо  $x$  се въведе променливата величина  $y = x + (b/3a)$  [ $x = y - (b/3a)$ ] се получава приведено уравнение, което има вида

$$(10) \quad y^3 + 3py + 2q = 0,$$

където  $3p = (3ac - b^2/3a^2)$ ;  $2q = (2b^3/27a^3) - (bc/3a^2) + (d/a)$ .

Като се има предвид, че  $c = 0$ , следва  $3p = -(b^2/3a^2)$  и  $2q = (2b^3/27a^3) + (d/a)$ .

За решение на кубичното уравнение (10) се прилага формулата на Кардано [1]. По този начин за предавателното число на трансмисията се получава

$$(11) \quad u_{\tau}^{\text{опт}} = \sqrt[3]{-q + \sqrt{p^3 + q^2}} + \sqrt[3]{-q - \sqrt{p^3 + q^2}} + \frac{mgDr_{\tau}}{3M_e\eta_{\tau}},$$

където  $p = -(b^2/9a^2)$ ;  $q = [(b^3/27a^3) + (d/2a)]$ .

### 3. Числени резултати

В качеството на пример на етап проектно изчисление на конкретен автомобил с електрическо задвижване е извършено пресмятане на предавателното число на трансмисията. Входните данни, необходими за изчисленията са представени в таблица 1.

Таблица 1. Входни данни за изчисление на предавателното число на трансмисията на електромобила [5]

№ по ред	Параметри и показатели	Стойност
1.	Конструктивни параметри	
1.1.	Пълна маса на електромобила $m$ , $kg$	1820
1.2.	Радиус на търкаляне на колелата $r_{\tau}$ , $m$	0,291
1.3.	Челна площ на електромобила $F_{\text{н}}$ , $m^2$	2,06
1.4.	Коефициент на обтекаемост $k_w$ , $(Ns^2)/m^4$	0,24
1.5.	К. п. д. на трансмисията $\eta_{\tau}$	0,97
1.6.	Максимален въртящ момент на ТЕД $M_{e,\text{max}}$ , $Nm$	295
1.7.	Въртящ момент на ТЕД при ъглова скорост $\omega_{e,v}$ $M_{e,v}$ , $Nm$	100
2.	Показатели на експлоатационните свойства	
2.1.	Максимална скорост на движение $V_{\text{max}}$ , $km/h$	148
2.2.	Максимален преодоляван наклон на пътя $i_{\text{max}}$ , %	35
2.3.	Гранична скорост при преодоляване на максималния наклон $V_{\text{гр}}$ , $km/h$	14
2.4.	Динамичен фактор при преодоляване на максималния пътен наклон $D_{\psi}$	0,37
2.5.	Динамичен фактор при максимална скорост $D_v$	0,07

Резултатите от изчисленията в съответствие с избраните условия на движение на електромобила и определената оптимална стойност на предавателно число на трансмисията са дадени в таблица 2. При стойност на  $u_{\tau}^{\text{опт}} = 6,367$  изменението на основните показатели теглително-скоростните свойства на електромобила спрямо зададените е, както следва: за максимална скорост на движение  $\Delta V_{\text{max}} \approx -3\%$ ; за преодоляван максимален наклон  $\Delta i_{\text{max}} \approx -5\%$ .

**Таблица 2. Изчислени стойности на предавателното число на трансмисията**

<b>№ по ред</b>	<b>Номер на изчислителната формула</b>	<b>Стойност на предавателното число</b>
1.	(5)	6,142
2.	(6)	6,729
3.	(11)	6,367

#### **4. Заключение**

1) На базата на динамичния баланс в процеса на провеждане на проектно теглително-скоростно изчисление на автомобил с електрическо задвижване е създаден метод за определяне с достатъчна точност на предавателното число на трансмисията.

2) С най-голяма точност оптималната стойност на предавателното число се определя при отчитане на масовите и габаритните параметри, конструктивните характеристики и зададените показатели на теглително-скоростните свойства на електромобила.

3) Окончателната стойност на предавателното число на трансмисията се уточнява при избора на кинематичната схема на задвижването и конструирането на редукторния механизъм

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

- [1]. Бронщейн И. Н., К. А. Семендяев. Справочник по математике. М., Наука, 1986. 544 с.
- [2]. Воронин Н. Н. Расчет редукторных механизмов в трансмиссиях автомобилей. Издательство СПбГАСУ, Санкт-Петербург, 2010. 82 с.
- [3]. Козлова Т. А. Методика поиска рациональных конструктивных параметров тягового привода электромобиля. Интернет-журнал “Науковедение”, том 8, № 5 (сентябрь – октябрь), 2016. <http://naukovedenie.ru>. 17 с.
- [4]. Косев К. П., Д. Н. Николова. Електромобили. С., Техника, 1979. 133 с.
- [5]. Стоилковски Д., П. Ц. Петков. Особенности на теглително-скоростно изчисление на автомобил с електрическо задвижване. Сп. “Механика, транспорт, комуникации”, Млад форум, ISSN 2367 – 6558, том 7, бр. 1, 2018, статия № 1589. с. VI-16 – VI-25.
- [6]. A Highly Efficient Two Speed Transmission for Electric Vehicle. EVS 28, KINTEX, Korea, may 3 – 6, 2015. Saphir Faid @ punchpowertrain.com. 22 p.
- [7]. Chander A., M. Kumar, Sh. Nambiat, H. Zaveri. Design and Study of Transmission System for Electric Vehicles. IJESC, Research Article, Volume 8, Issue № 3, 2018. pp. 16512 – 16514.
- [8]. Chang Chih-Ming and Siao Jheng-Cin. Performance Analysis of EV Powertrain system with/without transmission. EVS 25, Shenzhen, China, Nov 5 – 9. World Electric Vehicle Journal, Vol. 4 – ISSN 2032 – 6653, 2010 WEVA. 6 p.
- [9]. Zhang Z., C. Zuo, W. Hao, Y. Zuo, X. L. Zhao and M. Zhang. Three-speed Transmission System for Purely Electric Vehicles. International Journal of Automotive Technolgy, Vol. 14, № 5, 2013. pp. 773 – 778.

# A METHOD FOR DETERMINING THE TRANSMISSION GEAR RATIO OF AN ELECTRIC DRIVEN VEHICLE

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

*Todor Kableshkov University of Transport,  
158 Geo Milev Str., 1574 Sofia,  
BULGARIA*

**Key words:** *car, vehicle, electric drive, transmission, gear ratio, dynamic balance*

**Abstract:** *In the last years of the XX and the past period of the XXI century, the problems with the development of ecological ground transport have gained special relevance. In this regard, electric cars are already considered as potentially necessary, an alternative to conventional ones powered by internal combustion engines. Despite that, the production and operation of electric cars is linked to some still unresolved problems with both technical and economical aspect.*

*High-performance values of the operational properties of the electric cars are possible to be achieved by applying of technical and validation methods at the stage of the vehicle design and construction as well as by implementation of modern technologies and materials in production. A method for determining the gear ratio of a mechanical reducer integrated between the traction motor and the driving wheels of an electric car has been provided in the work. The gearbox establishes a transformation of the transmission torque. Specific results have been obtained, fulfilling the specified conditions of the electric vehicle.*