

DETERMINING THE POWER REQUIRED TO DRIVE A PROTOTYPE WITH HYDROGEN FUEL CELL

Assist. Prof. Dimitar Grozev, PhD

Transport Department,
University of Ruse "Angel Kanchev"
Tel.: 082 888 231
E-mail: dgrozev@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Ivan Beloev, PhD

Transport Department,
University of Ruse "Angel Kanchev"
Tel.: 082 888 352
E-mail: ibeloev@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Georgi Hristov, PhD

Department of Telecommunications,
"Angel Kanchev" University of Ruse
Tel.: 082 888 663
E-mail: ghristov@uni-ruse.bg

Abstract: *This report examines the required power of a urban vehicle prototype with hydrogen cells. The main objective is to obtain such a car with the lowest fuel consumption and the highest mileage under predetermined construction and road conditions. The results of the study make it possible to determine the required power and driving conditions in which the energy consumption is the lowest.*

Keywords: *Efficiency, Effectiveness, urban, vehicle, prototype, hydrogen cells*

JEL Codes: *L91*

ВЪВЕДЕНИЕ

Използваните изкопаеми горива за транспортиране, генерират над 2000 милиона тона емисии на въглероден двуокис. Очевидно е, че са нужни алтернативи и наред с електроенергията, а водородът е атрактивно гориво за автомобили, което тепърва се очаква да бъде развивано (Sciarretta A., 2007).

Настоящото изследване има за основна цел да отрази процеса по проектиране, разработване и популяризиране на прототип на автомобил от градски тип, задвижван с алтернативен източник на енергия. Паралелно с това ще бъде извършен обстоен анализ на възможностите и предизвикателствата, които трябва да бъдат решени за интегриране на алтернативен транспорт в съществуващата пътна инфраструктура на България. Включва се и изработката на автомобил Urban concept за участие в престижното международно състезание Shell Eco Maraton.

Класическият вид автомобилен транспорт има един основен недостатък и той е силно негативното му въздействие върху околната среда – проблем, който става все по-актуален. Той може да се разглежда в няколко насоки: изхвърляне на вредни вещества, източник на шум, консумиране на големи количества течни горива.

Основните методи за намаляване на вредните емисии, шума, течните горива, могат да се реализират чрез използването на алтернативните горива (био дизел, биогаз, природен газ, метан, водород и пр.), използване на автомобили с електро задвижване и използването на електрическа енергия от възобновяемите източници на енергия за зареждането им. За целта са необходими нови по своята същност системи (Hughes A., 2006).

Автомобилният транспорт е огромна индустрия и се очаква тази индустрия в близко бъдеще да претърпи сериозни промени, свързани с три основни фактора:

- Първият фактор - промените свързани с проблемите с енергийните ресурси. Автомобилният транспорт почти изцяло зависи от нефта. Запасите от нефт бързо намаляват и ще настъпи време, когато той ще стане недостъпен за транспорта. Различните мерки за повишаване ефективността при използването на горивото (намаляване на масата на автомобилите, увеличаване на коефициента на полезно действие на двигателите, внедряване на нови двигатели и др.) могат да забавят, но не и да предотвратят това. Транспортната система на бъдещето ще се наложи да работи без течното гориво. Разбира се, за тази радикална трансформация на такава голяма система, каквато е транспортната ще са необходими десетилетия, в които е нужно да се търсят решения, които да съкратят тези срокове.
- Вторият фактор, диктуващ необходимостта от промени се явява съвременното състояние на самата транспортна система. Годици наред в транспортната система се правят малки и несъществени изменения, които не могат да решат всички проблеми. Необходими са промени, защото съществуващата система не може да удовлетвори всички изисквания, които са предявени към нея.
- Третият фактор са разработваните в последните 20-30 години, нови технологии, които могат да променят радикално транспортната система и да я превърнат в нова система, която да бъде по-добра от съществуващата. В интерес на човечеството е новата транспортна инфраструктура да бъде внедрена по най-рационалния начин. Естествено е, че промяната изисква време, сериозни научни изследвания и внедряване на иновации.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Теоретични изследвания

Необходимо е да се определят динамичните характеристики и необходимата мощност за задвижване. Определянето на максималната скорост на движение на прототипа е в основата на всички останали изчисления за оразмеряване на задвижването на автомобила. Данните които се използват за определяне на максималната скорост на движение са време, дължина и брой обиколки. На фигура 1 е представена енергийната диаграма на автомобила (Harnefors L., 2002).



Фиг. 1 Енергийна диаграма на автомобила

Данните които са използвани са измерени на пистата на Русенски университет в местност ДЗС (фиг. 2). На пистата се симулирани условия максимално близки до реалните с тези на пистат в Лондон, на която се провежда състезанието.



Фиг. 2. Информация за пистата, на която се проведени изследванията

Въз основа на дефинираните параметри на състезанието може да се изчисли средната скорост на движение на автомобила по пистата. Изчисленията показват, че минималната средна скорост трябва да бъде 25 km/h. Изчислената скорост от 25 km/h е в идеалния случай, когато не се налага автомобила да спира, но ако се вземе под внимание времето, което ще се загуби за всеки стоп, то при изчисляване на скоростта трябва да се вземе под внимание и времето за покой на автомобила. За да се направят тези изчисления е необходимо да се направят някои условни допускания за процеса от натискане на спирачката, спирането и момента на ускоряване на прототипа. Може да се приеме, че за протичане на тези процеси са необходими 30 sec, следователно за да се изпълни условието за приключване на състезанието за 35 min., една обиколка трябва да се прави за 2 min, което ще доведе до увеличаване на минималната средната скорост на 29 km/h.

Анализ на условията

Подборът на всеки един от компонентите е свързан с крайната енергийна ефективност на проектирания прототип. Енергийната ефективност може да бъде изчислена по формулата (Ehsani M., 2005):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (1)$$

където P_{out} е изходящата мощност, а P_{in} е входящата;

Големината на отделните компоненти и тяхното тегло също е от решаващо значение. Нивото на захранващото напрежение също трябва да се вземе под внимание, защото индустриалните стандарти в автомобилната индустрия са на 12V и 24V, докато източника на захранване на борда на прототипа е 48V, а управляващата електроника работи на 12V.

Динамични характеристики

При определяне на динамичните характеристики, трябва да бъдат взети под внимание 4 основни сили, които действат на автомобила при неговото движение: силата на ускорението, която е съпътствана с три противоположни момента създадени в резултат на въздушното съпротивление, съпротивлението при търкаляне на гумите и съпротивлението от наклона на пътя. Загубите причинени в резултат на въздушното съпротивление и съпротивлението при търкаляне не могат да бъдат възобновени, докато загубите причинени от изкачване и ускорение са в частност възобновяеми.

Аеродинамично съпротивление

Силата която се противопоставя на движението на превозното средство се състои от две компоненти: съпротивление от формата на автомобила и съпротивление от триене с молекулите на въздуха и повърхността на превозното средство. Когато автомобила се движи се създават две зони: една в челната част където въздушното налягане е високо и една в задната част където въздушното налягане е ниско, именно тези две зони са причината за появата на резултатния ефект, а именно противопоставянето на линейното движение на автомобила. Втория компонент е повърхностното триене, това е ефект който се появява в резултат на движението на въздушните молекули с различна скорост спрямо повърхността на автомобила. Тъй като скоростта на въздуха близо до автомобила се движи почти със същата скорост като превозното средство, за разлика от скоростта на въздуха, далече от автомобила, ще се появи триене. Аеродинамичните сили са все по-важни по отношение на изискванията за мощност на превозното средство при умерени и по-високи скорости.

$$F_a = \frac{1}{2} \delta C_d A v^2, \quad (2)$$

Където: δ (кг/м³) е плътност на въздуха, C_d е аеродинамичен коефициент зависещ от формата на превозното средство, A (м²) площта на най-широкото сечение на колата, а v (m/sec) е скоростта на движение. Аеродинамичния коефициент варира между 0,15 и достига до 0,50 за колите с лоша аеродинамична форма.

Съпротивление от търкаляне

Хистерезисът в материала на гумите е причината за създаване на съпротивление при търкаляне на колелетата. Хистерезисът възниква, когато профилът на гумата се деформира, причинявайки асиметрично разпределение на земните реакционни сили. Хистерезисът се свежда до минимум, когато има високото налягане на гумата и твърдата повърхност на пътя. Съществуват и други фактори, влияещи върху съпротивление при търкаляне като; триенето между гумата и пътя и циркулиращия въздух в гумата. Силата на съпротивление при търкаляне се дава от:

$$F_r = C_r m g, \quad (3)$$

Където C_r , е коефициент на съпротивление от предвижване, m (kg) масата на автомобила, а g (m/sec²) е гравитационна константа.

Коефициентът на съпротивление от предвижване, се влияе от параметри като: материал на гумата, конструкцията на гумата, температурата на гумата, налягането на гумата, геометрията на протектора, пътния материал и наличието или отсъствието на течности на пътя.

Съпротивление от наклона на пътя

Теглото на превозното средство, изкачващо се нагоре или спускащо се надолу, ще създаде сила, насочена надолу. Тази сила ще се противопостави на движението при пътуване нагоре или ще подпомогне за движението надолу. Силата на съпротивлението от наклона на пътя се дава от:

$$F_c = mgsin(\alpha), \quad (4)$$

Където $m(\text{kg})$ е масата на автомобила, $g(\text{m/sec}^2)$ е гравитационна константа, $a(\alpha)$ е наклона на пътя.

Ускорение

При ускорението се разчита на общата теглителна сила на превозното средство минус сумирането на силите, които се противопоставят на движението на превозното средство. Нетната сила води до ускоряване на превозно средство в посока на силата. Силата за ускорение може да бъде описана като линейно движение:

$$F_{acc} = ma, \quad (5)$$

Където m (kg) е масата на автомобила, a (m/sec^2) е ускорението или изразено, като ротационно движение:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\sum T}{J}, \quad (6)$$

Където w (rad/s) е ъгловата скорост на завъртане на колелата, $\sum T$ (Nm) резултантния въртящ момент приложен на колелата, J (kg/m^2) е инертния момент на автомобила.

Определяне на необходимата мощност за движение на автомобила.

Въз основа на направения анализ и параметрите поместени в следващата таблица е извършено аналитично моделиране и определяне на необходимата мощност на автомобила (Michael H., 2001).

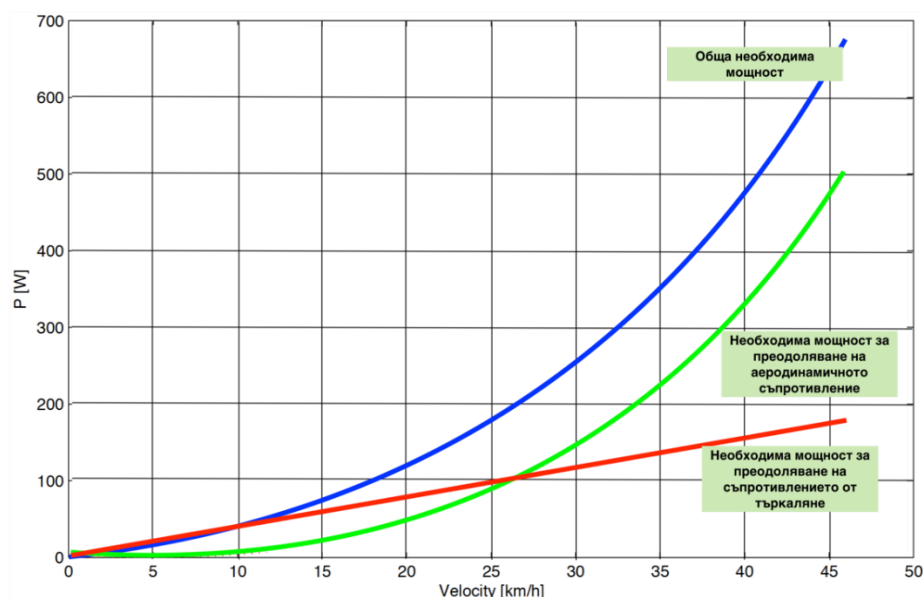
Таблица 1. Параметри на автомобила

№	Параметър	Стойност
1	Тегло на автомобила, kg	130 kg
2	Тегло на водача, kg	70 kg
3	Коефициент C_d	0.25
4	Максимална площ на сечение A_v	1.4 m^2
5	Съпротивление на гумите C_r	0.007
6	Радиус на гумите R_{wheel}	0.273 m
7	Плътност на въздуха при 15°C	1,225 kg/m^3

Използвайки общите уравнения за аеродинамично съпротивление и съпротивление при търкаляне търкаляне, може да се изчисли необходимата мощност за поддържане на средна скорост. Резултатите, които се виждат в приложената таблица и на фигурата се основават на теглото на водача от 70 кг и плътност на въздуха при температура от 15 ° C.

$$\begin{aligned} P_{\text{rolling}} &= C_r(m_v + m_d)g \\ P_{\text{drag}} &= \frac{1}{2} \rho C_d A_v v^3 \\ P_{\text{vel}} &= P_{\text{rolling}} + P_{\text{drag}} \end{aligned} \quad (7)$$

Както се вижда от приложените формули и резултатите на следващата фигура определянето на необходимата мощност за движение на автомобила по състезателната писта се определя от три компоненти (фиг. 3).



Фиг. 3 Необходима мощност при общо тегло 200 kg.

Зависимостта на общата необходима мощност спрямо скоростта на движение е обобщена в приложената таблица:

Таблица 2. Зависимост мощност – скорост на движение

№	Скорост, km/h	Необходима мощност, W
1	25 km/h	152 W
2	26 km/h	165 W
3	27 km/h	179 W
4	28 km/h	193 W
5	29 km/h	209 W
6	30 km/h	225 W
7	31 km/h	242 W
8	32 km/h	260 W
9	33 km/h	279 W
10	34 km/h	300 W
11	35 km/h	350 W

Въз основа на получените резултати, може да се направи извода, че при ниска скорост ще има по-големи загуби при преодоляване на съпротивлението от търкаляне, докато при увеличаване на скоростта загубите от аеродинамичното съпротивление стават значителни. Разбира се, загубите в резултат на преодоляване на търкалянето зависи от теглото на превозното средство, следователно необходимите мощности при ниски скорости на тежки автомобили са много по-високи.

Скоростта която бе изчислена за изпълнение на условията на състезанието е 27 km/h. Въпреки това е желателно автомобила да разполага с минимален скоростен аванс в случаи, когато има нужда от спиране на пистата и компенсиране на загубеното време. Именно за това се приема максимална скорост за движение на прототипа да бъде 35 km/h. Съгласно приложената таблица това води до увеличаване на необходимата мощност от 179 W при 27 km/h до 350 W при 35 km/h. Това води до необходимост от увеличаване на мощността с 95.5%.

Избор на постояннотоков електродвигател въз основа на изчислената мощност

За избор на постояннотоков електродвигател бе направен обстоен обзор на продуктите, които се предлагат на пазара. Водещ критерий за избора е въз основа на необходимата

мощност, надеждност и максимално високо КПД. За източник на енергия ще се използва водородна клетка, която има оптимална енергийна характеристика при максимално изходно напрежение от 36 волта. Именно за това бяха избрани два модела електродвигатели, които отговарят на всички гореизброени критерии. В таблицата са обобщени техните характеристики (Bosch R., 2000).

Таблица 3. Характеристики на постояннотокови електродвигатели Махон

№	Параметри	Модел RE50	Модел RE65
1	R[Ω]	0.254	0.365
2	Ct [mNm=A]	59.4	87
3	CN [rpm=V]	161	110
4	Weight [g]	1100	2100
5	Rth1 [K=W]	2.27	1.85
6	Rth2 [K=W]	3.8	1.3
7	ηmax	93	87

Избор на предавателно отношение

Задвижването трябва да позволява възможността за движение при определената максимална скорост.

Таблица 4. Зависимост предавателно отношение – скорост

№	Предавателно отношение	Скорост при 36V	Скорост при 48V
1	10:1	39 km/h	54 km/h
2	11:1	36 km/h	49 km/h
3	12:1	33 km/h	45 km/h
4	13:1	30 km/h	42 km/h
5	14:1	28 km/h	39 km/h
6	15:1	26 km/h	36 km/h
7	10:1	39 km/h	54 km/h

Предавателното отношение трябва да бъде проектирано, за да може да се постигне максималната скорост, която е изчислено да бъде най-малко 35 km/h. За по-голяма простота е избрана фиксирана предавателна система, тъй като предавателната кутия е по-тежка и трудна за автоматична работа с постоянно КПД.

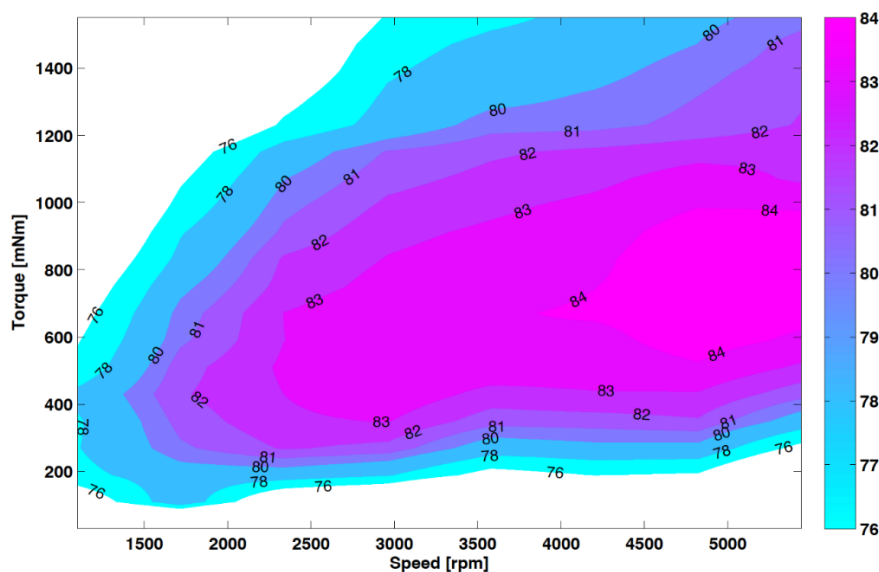
Както бе посочено номиналното изходно напрежение на водородната горивна клетка е 36V. Именно затова при оразмеряването на предавателното отношение се избира 11:1 което при 36V захранване на постояннотоковия електродеигател ще гарантира желана скорост от 35 km/h.

Изследване характеристиките на постояннотоковите електродвигатели

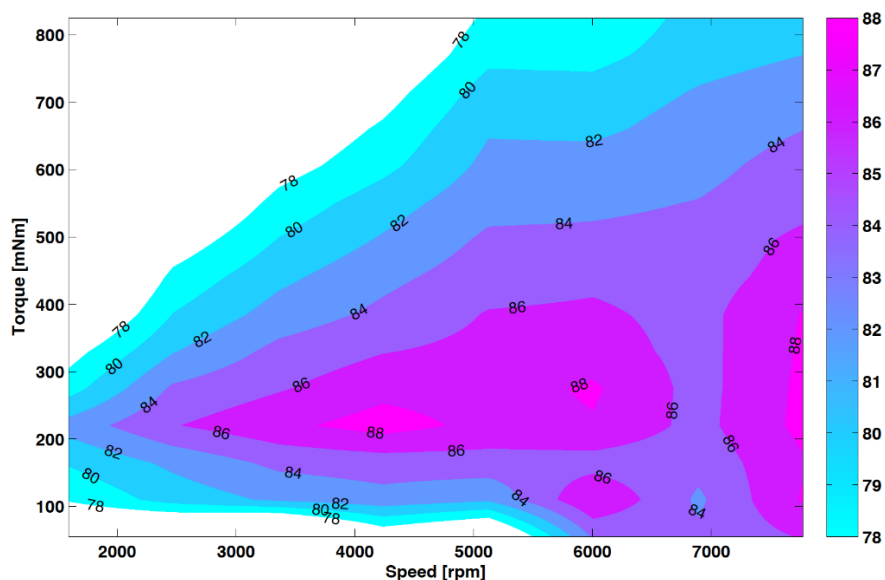
За да може да се разберат напълно динамичните характеристиките на избраните електрическите двигатели, Махон RE65 и RE50, трябва да се направят практически измервания (www.maxonmotor.com). С помощта на куплиран динамометър към измервателно устройство могат да се записват и анализират реални данни, които да се анализират и това да даде възможност за реална стойност на КПД на всеки един от моделите, което ще доведе до финалния избор на електродвигател.

Таблица 5. Измерени параметри на RE 65 и RE 50 без натоварване

Напрежение ,V	Ток, А, RE65/RE50	Р измерено [W], RE65	Р измерено [W], RE50
15	0.53 / 0.30	8.0	4.5
20	0.59 / 0.34	11.8	6.8
25	0.62 / 0.36	15.5	9.0
30	0.79 / 0.36	23.7	9.0
35	0.80 / 0.36	26.6	12.3
40	0.80 / 0.41	30.4	15.6
48	0.90 / 0.43	43.2	16.0



Фиг. 4 Ефективност на RE65 в целия динамичен диапазон

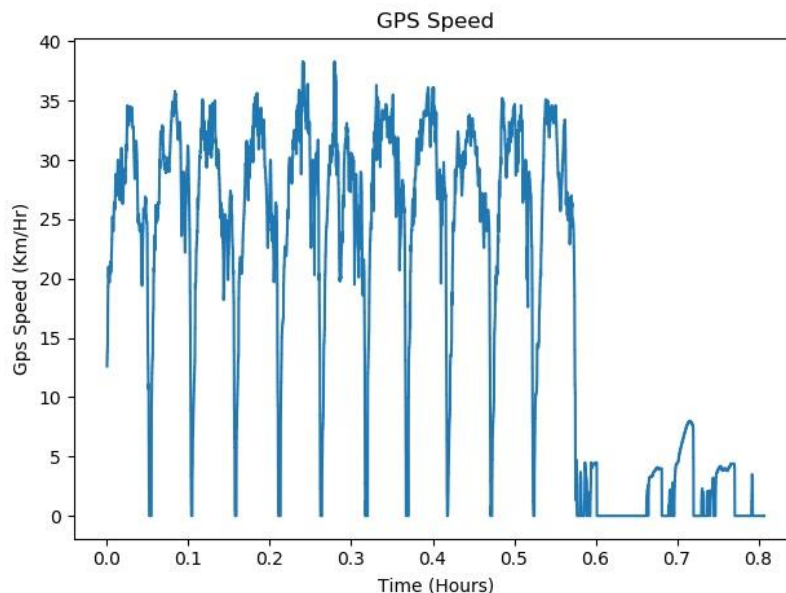


Фиг. 5 Ефективност на RE50 в целия динамичен диапазон

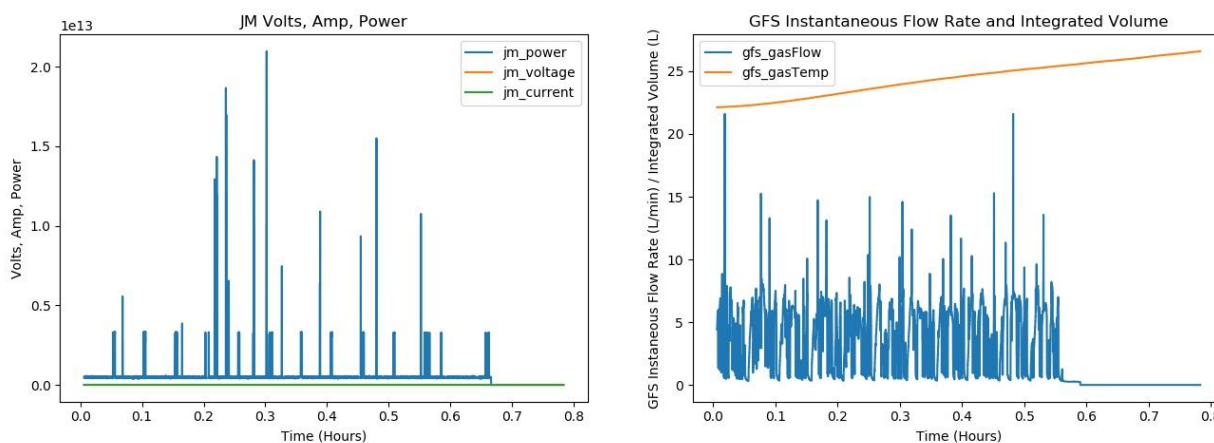
Получената стойност на КПД във всички измерени точки е показан на следващата фигура, като функция от оборотите и въртящия момент на електродвигателя. Фигурата показва, че електродвигателя има най-добър интервал на работа между 600 mNm – 1000 mNm и 4000 min^{-1} - 5700 min^{-1} . В тази област КПД е на максимума от 84%, което е с 3% по-ниско от това, което е посочено от производителя. Устройството работи добре до крайните точки при 20А и 48V, където КПД е все още над 80% (фиг. 4 и 5).

Резултати от тестването на автомобила

Получените резултати са резултат от опити, които са съобразени с изискванията на състезанието, което има изключително строги изисквания, които не могат да бъдат нарушавани. Всички параметри при движението на автомобила се регистрират от телеметрична система, която е в състояние да извлича всички данни за движението (координати, ускорение и др.) и пълна статистика за консумацията на енергия на системите на автомобила. На фиг. 6 и 7 е показана скоростта, консумацията на бордовата електроника и разхода на водород, която е засечена от телеметричната система монтирана на автомобила.



Фиг. 6 Скорост на автомобила км/час (Б)



Фиг. 7 Консумация на бордовата електроника (А) и разход на водород L/min (Б)

Фиг. 8 Брой обиколки и разстояние в km по GPS (А)
и изразходвана енергия/обиколка J (Б)

От анализа на резултатите (фиг. 6 - 7), могат да се направят два основни извода: автомобила притежава добри динамични характеристики и поддържа необходимата скорост на движение с минимален разход на енергия, най-големия разход на енергия се използва за ускоряване на автомобила при неговото потегляне и достигане до скорост около 22~25 км/ч.

ИЗВОДИ:

За компенсиране на значителния разход на енергия при потегляне на автомобила, ще се търсят решения в две основни насоки: реализиране на предавателна кутия с възможност за промяна на предавателното отношение при предаване на въртящия момент от двигателите и

прилагане на концепция за електромеханична схема за рекуперативно (генераторно) спиране, с цел използване на енергията от спиране за намаляване на необходимата енергия при потегляне.

This work was supported by the Bulgarian Ministry of Education and Science under the National Research Programme E+: Low Carbon Energy for the Transport and Households, grant agreement D01-214/2018.

REFERENCES

- Bhovsar,D. Tang,Z. Zhang,Y. Oriet,L. And Lang,E. "Methodology and initial analysis to compare hydraulic hybrid and electric hybrid for commercial vehicle," ACTA MECHANICA ET MOBILITATEM, Vol. 1(1), pp. 6—10.
- Chris, M. Masrur, David,A. Gao,W." Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives," Wiley press,2011,ISBN-10: 0470747730.
- Sciarretta A. (2007). Vehicle propulsion systems: introduction to modeling and optimization, L. Guzzella, 2nd ed. Springer.
- Hughes A. (2006), Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications, 3rd edition, Elsevier Ltd.
- Harnefors L. (2002), Control of Variable-Speed Drives, Applied Signal Processing and Control, Department of Electronics, Mälardalen University, Libris, Västerås.
- Ehsani M. (2005), Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles - Fundamentals, Theory, and Design, CRC Press LLC, Boca Raton.
- Michael H. (2001) Westbrook, The Electric Car: Development and Future of Battery, Hybrid and Fuel-Cell Cars, Institution of Engineering and Technology.
- Mohan N. (2003), Power electronics, M.Tore, William P. Robbins, Converters, Applications and Design, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken New Jersey.
- Omara, A. Sleptsov,M."Comparative Study of Different Electric Propulsion System Configurations Based on IPMSM Drive for Battery Electric Vehicles"
- Bosch R. (2000), Automotive Handbook, 5th edition, Society of Automotive Engineers (SAE), Stuttgart.
- www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8830469865502/2018EN-133.pdf
- Williamson,S."Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles".Springer Press.2013.Concordia University.Montreal. QC.ISBN 978-1-4614-7710-5.