

## Ušteda u sustavu hlađenja motora hibridnoga vozila

### *Savings in the hybrid vehicle engine cooling system*

<sup>1</sup>Marko Markulija, <sup>2</sup>Dino Kalamari, <sup>3</sup>Miran Kovačić

<sup>1</sup>Tehnička škola Čakovec, Športska 5, 40000 Čakovec

<sup>2</sup>Međimurje IPC d.d., Mihovljanska 72, 40000 Čakovec

<sup>3</sup>Media-Soft d.o.o., Braće Graner 14, 40000 Čakovec

e-mail: <sup>1</sup>marko.markulija@mev.hr, <sup>2</sup>dino.kalamari@ipc.hr, <sup>3</sup>miran.k@live.com

**Sažetak:** *U autoindustriji uvijek postoji težnja povećanju efikasnosti vozila. Motivacija leži u mogućoj uštedi energije čime bi se smanjili troškovi vozila te bi isto bilo konkurentnije na tržištu. Uz uštedu energije potrebno je uzeti u obzir i ekologiju, kojom su propisani zakonski akti vezani za izvedbu vozila. Dinamika promjene zakona uvijek teži smanjenju lošijih utjecaja vozila na okolinu te time potiče proizvođače vozila na osmišljavanje novih tehnologija. Ovaj rad koncentrirana se na jednu komponentu vozila, na glavni ventilator sustava hlađenja. Ispitat će se moguća ušteda goriva promjenom izvedbe upravljanja ventilatorom. Trenutačno najčešća izvedba pomoću visko - spojke na čijem kraju se nalazi ventilator usporedit će se s električno pogonjenim ventilatorom. Vozilo za koje će se izvršiti proračun moguće uštede bit će hibridni kamion te će se kao izvor energije za ventilator koristiti pogonska baterija samog vozila. Dodatno će se uzeti u obzir i istražiti slučaj ako istu energiju za pokretanje ventilatora dobijemo rekuperacijom iz kočionoga sustava. Upotrebom simulacijskih programa dokazano je da postoji mogućnost uštede goriva zamjenom pogona ventilatora izvedenoga pomoću visko- spojke s električno pogonjenim motorom. Prednost te izvedbe je u uštedi goriva čime se ujedno smanjuje utjecaj na okolinu, jer su smanjene emisije štetnih plinova.*

**Ključne riječi:** *sustav hlađenja, visko- spojka, ventilator, električni motor, ušteda goriva*

**Abstract:** *In the automotive industry, there is always a tendency to increase vehicle efficiency. The motivation lies in the possible energy savings which would reduce vehicle costs and would also be more competitive in the market. In addition to energy savings, it is necessary to take into account the ecology, which prescribes legal acts related to the performance of vehicles. The dynamics of changing the law always strive to reduce the worse effects of vehicles on the environment and thus encourage vehicle manufacturers to design new technologies. This work concentrates on one component of the vehicle, the main cooling system fan. Possible fuel savings will be examined by changing the fan control design. Currently, the most common design using a visco coupling, with a fan at its end, will be compared to an electrically driven fan. The vehicle, for which the calculation of possible savings will be made, will be a hybrid vehicle and the battery of the vehicle will be used as a source of energy for the fan. In addition, the case will be taken into account and investigated, if the same energy for powering the fan is obtained by recuperation from the brake system. Using simulation programs, it has been proven that there is a possibility of saving fuel by replacing the fan drive performed using a viscous clutch with an electrically driven motor. The advantage of this design is in saving fuel, which also reduces the impact on the environment, because gas emissions are reduced.*

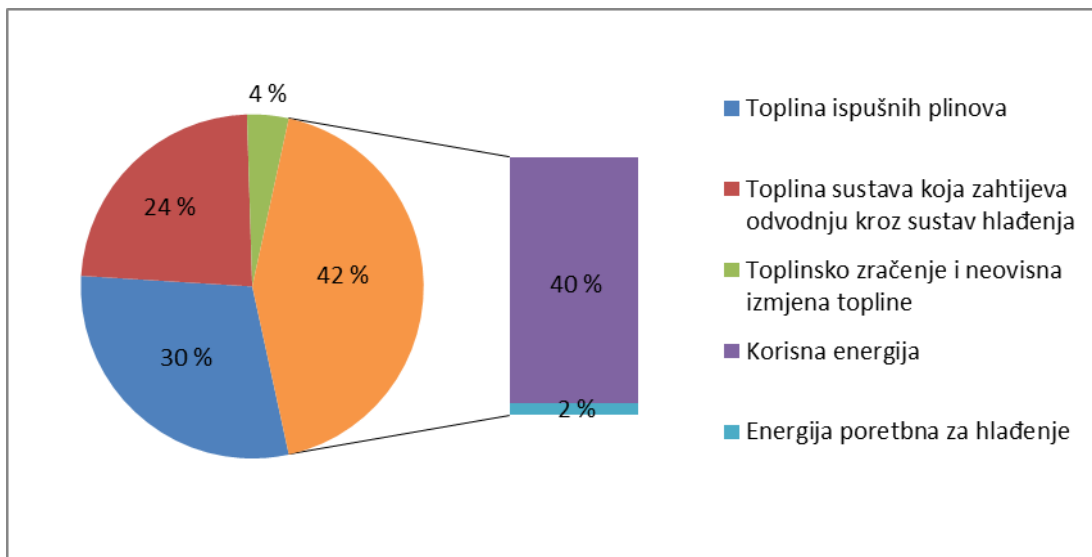
**Key words:** *vehicle cooling system, viscous coupling, fan (machine), electric motor, energy savings*

## **1. Uvod**

Ovaj rad razmatra mogućnost uštede energije na hibridnom kamionu koji za svoje kretanje koristi motor s unutarnjim izgaranjem i električni motor. U mnogim vozilima postoje komponente (potrošački dijelovi motora) koji su predimenzionirani te proizvode dodatne gubitke.

Prilikom pretvorbe energije uvijek dolazi do gubitaka energije. Kod hibridnoga kamiona pretvorbom goriva (dizel) u koristan rad dio energije predstavlja gubitke.

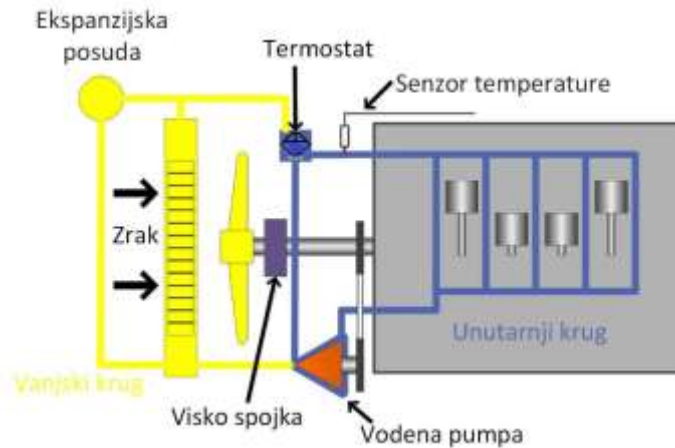
Načelno ukupna energija hibridnog kamiona dobivena iz goriva može se podijeliti na dva dijela. Podjela energije može se vidjeti na slici Raspodjela energije kod vozila (slika 1.). Prvi dio od 42 % predstavlja koristan rad, dok ostatak predstavlja otpadnu toplinu tj. gubitke. Problem predstavlja 24 % topline koja mora biti odstranjena iz motora pomoću dodatnoga sustava hlađenja. Odvođenje te topline iziskuje potrošnju energiju čime se udio korisnoga smanjuje na 40 %. Za odvođenje topline potrebno je 2 % korisnoga rada, što je fokus ovoga rada.



**Slika 1.** Raspodjela energije kod vozila [1]

## 2. Sustav hlađenja tekućinom kod hibridnog kamiona

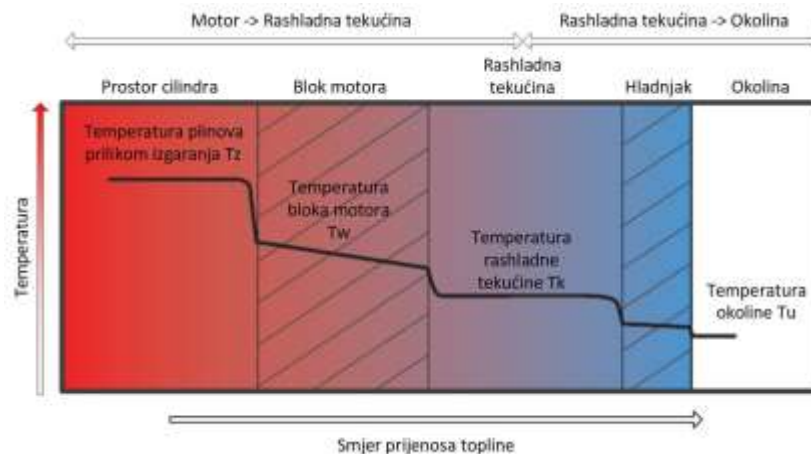
Ovaj sustav hlađenja za razliku od hlađenja zrakom omogućuje brzu odvodnju topline iz bloka motora. Kao rashladno sredstvo koristi se tekućina s velikim toplinskim kapacitetom - sredstvo Glysantin 48 [2]. Sustav hlađenja izveden je pomoću dva zajedno spojena kruga kojima upravlja termostat što je prikazano na slici Sustav hlađenja motora s unutarnjim izgaranjem (slika 2.). Ostali dijelovi sustava su senzor temperature, vodena pumpa [3], hladnjak (kiltera), visko spojka [4], ventilator [5] te kompenzacijska posuda.



**Slika 2.** Sustav hlađenja motora s unutarnjim izgaranjem

### 3. Prijenos topline kod sustava hlađenja

Prijenos topline prikazan je na slici Prijenos topline iz radnoga dijela cilindra do okoline (slika 3.). Toplina nastala izgaranjem goriva kod temperature od 2.000 °C djelomično prelazi na stijenke bloka motora, a djelomično kroz ispušni sustav vozila. Dio topline prenijet na stijenke prenosi se cijelim blokom motora te se dalje putem zračenja i strujanja zraka prenosi na okolinu. Drugi dio topline se prenosi sa stijenke cilindra na tekućinu za hlađenje. Tekućina se pomoću vodene pumpe prenosi do hladnjaka koji omogućuje prijenos topline s rashladne tekućine na okolinu.



**Slika 3.** Prijenos topline iz radnoga dijela cilindra do okoline [6]

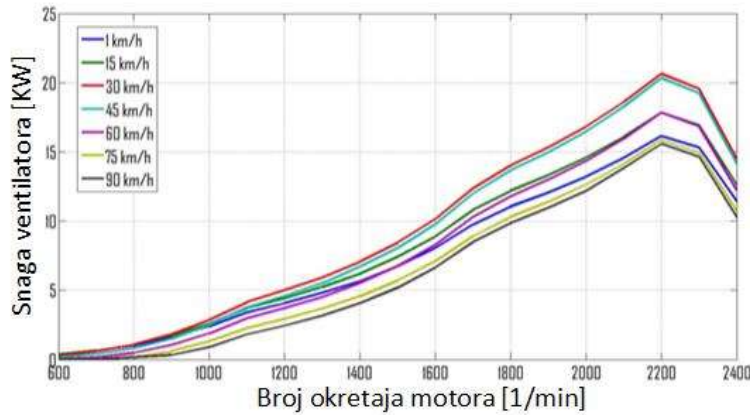
#### **4. Ideja za uštedu energije**

Većina sustava hlađenja izvedena je tako da je pogon ventilatora priključen na pogon motora. Između se stavlja upravljački sklop visko-spojka. Kao najveći problem toga upravljanja ističe se tromost sustava koju unosi bimetalni element, a koji za posljedicu ima vremensko odstupanje. Zato je potrebno držati temperaturu rashladne tekućine nižom od poželjne radne temperature motora (temperatura kod koje je bolje izgaranje, a ujedno ne dolazi do oštećenja materijala).

Kako bi se uklonio nedostatak bimetala moguće je realizirati upravljanje ventilatorom bez vremenskog odstupanja. S tim načinom upravljanja smanjuje se temperatura odstupanja što omogućuje povećanje radne temperature motora. Povećanje radne temperature ima mnoge prednosti kao što su npr. broj okretaja ventilatora u mnogim slučajevima može biti smanjen, čime pada i potrošnja goriva za pokretanje ventilatora. Ujedno bržim zagrijavanjem ulja motora, ako ventilator može biti ugašen, osigurava se manje trenje cilindra, a time i ušteda goriva. Izvedba regulacije temperature bez vremenske zadržke moguća je pomoću električno pogonjenog ventilatora. Također velika prednost električno pogonjenog ventilatora je neovisnost o broju okretaja motora. Što znači da se može vrtjeti brže ako je potrebno te može po potrebi biti u stanju mirovanja. Druga prednost je da kod hibridnoga vozila postoji mogućnost dobivanja energije za pokretanje ventilatora izravno iz baterije ili postupkom rekuperacije iz kočionoga sustava.

#### **5. Određivanje snage motora ventilatora**

Iz grafa Snaga ventilatora na različitim okretajima pri različitim brzinama vozila (slika 4.) može se pročitati da je minimalna potrebna snaga pokretanja ventilatora 20.65 KW, tj. minimalna snaga električnoga motora. Ta snaga potrebna je kod kretanja vozila brzinom od 30 km/h te brojem okretaja 2200 1/min.



Slika 4. Snaga ventilatora na različitim okretajima pri različitim brzinama vozila

## 6. Kreiranje modela sustava hlađenja u MATLAB-u

Proračunom svim potrebnih parametara dobiva se model koji se sastoji od četiri diferencijalne jednačbe:

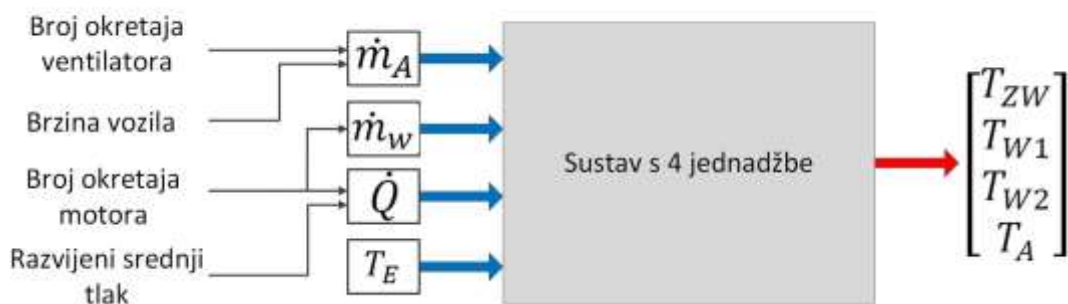
$$c_{ZW}M_{ZW} \frac{dT_{ZW}}{dt} = -\alpha_{W1}A_{W1}(T_{ZW} - T_{W1}) + \dot{Q} \quad (1)$$

$$c_{W1}M_{W1} \frac{dT_{W1}}{dt} = \alpha_{W1}A_{W1}(T_{ZW} - T_{W1}) - c_{W1}\dot{m}_W(T_{W1} - T_{W2}) \quad (2)$$

$$c_{W2}M_{W2} \frac{dT_{W2}}{dt} = -\alpha_{W2}A_{W2}(T_{W2} - T_A) + c_{W2}\dot{m}_W(T_{W1} - T_{W2}) \quad (3)$$

$$c_A M_A \frac{dT_A}{dt} = \alpha_{W2}A_{W2}(T_{W2} - T_A) - c_A \dot{m}_A(T_A - T_E) \quad (4)$$

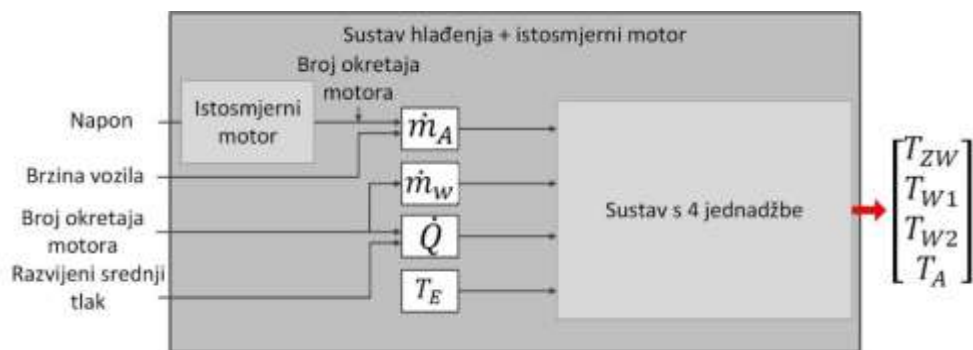
Prva jednačba opisuje podjelu topline na blok motora i na rashladnu tekućinu. Toplina koja prelazi na rashladnu tekućinu motora (ovdje se promatra samo dio koji je prenesen na tekućinu koja se nalazi u bloku motora) opisuje se pomoću jednačbe broj 2. U sljedećoj jednačbi opisan je prijelaz topline iz rashladne tekućine motora na rashladnu tekućinu hladnjaka. Posljednjom jednačbom definiran je prijelaz topline s rashladne tekućine hladnjaka na zrak okoline koji struji kroz hladnjak. Izradom modela sustava hlađenja hibridnoga kamiona (slika 5.) dobije se model s 4 ulazne varijable i 4 izlazne varijable. Sama regulacija sustava svodi se na regulaciju temperature  $T_{W1}$  čija maksimalna vrijednost može iznositi 105 °C [7].



**Slika 5.** Model sustava hlađenja

### 6.1. Nadograđivanje sustava s istosmjernim motorom te regulacija istoga

Za izradu modela istosmjerne struje koristile su se jednađbe statičkoga stanja motora [8]. Dinamička svojstva motora nije potrebno uzimati u obzir, jer sam sustav hlađenja je veoma trom (slika 6.). Regulacija se svodi na generiranje vrijednosti ulaznog napona istosmjernog motora u ovisnosti o izlaznoj veličini sustava, tj. temperaturi rashladnog sredstva  $T_{W1}$  na izlazu iz bloka motora. Za regulaciju je primijenjen standardni regulacijski krug s povratnom vezom [9]. Kao regulator se koristi PI regulator. Kao izvor napajanja koristi se baterija vozila koja na raspolaganju ima napon vrijednosti od 650 V. Motor odabran za pogon ventilatora zadovoljava sve zahtjeve te ima ograničenje napona na 540 V. To ograničenje ostvaruje se u PI regulatoru putem ANTI-wind up sklopa.



**Slika 6.** Model sustava hlađenja s istosmjernim motorom

## **7. Rezultati istraživanja s podacima dobivenim iz vozila voženoga na određenoj stazi u realnim uvjetima**

Podatci potrebni za simulaciju dobiveni su mjerenjem kretanja vozila u realnim uvjetima te su zaštićeni od strane proizvođača, koji se bavi proizvodnjom motornih vozila. Dobiveni podaci od strane proizvođača relevantni za simulaciju cjelokupnoga rashladnoga sustava su srednje razvijeni tlak, brzina okretaja motora, brzina vozila i temperatura okoline, dok su ostali parametri poput količina strujanja zraka kroz hladnjak, strujanje rashladne tekućine, razvijena ukupna energija u cilindru, dobiveni kroz simulacije u programskom paketu KULI ili kroz proračun na temelju poznatih dimenzija dijelova rashladnoga sustava kamiona.

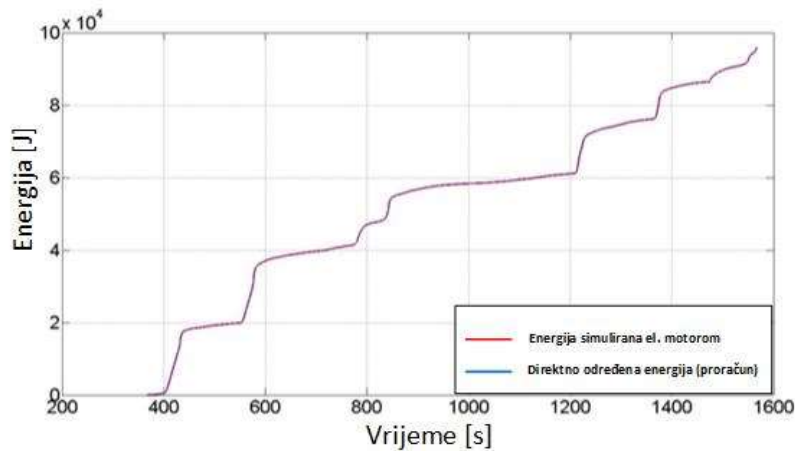
Za usporedbu moguće uštede goriva potrebno je odrediti ukupno potrebnu energiju potrošenu za pogon ventilatora pomoću visko-spojke. Taj podatak nije bio na raspolaganju. Ideja za izračun potrošnje energije ventilatora upravljanoga visko-spojkom je da se izmjereni podaci broja okretaja ventilatora sa staze simuliraju na modelu istosmjernoga motora gdje vršimo proračun potrošene energije.

### **7.1. Rezultati simulacije**

Broj okretaja ventilatora izmjerenih na stazi te broj okretaja istosmjernog motora odstupali su maksimalno 0.25 1/min. Sukladno tome i energija dobivena simulacijom odgovara potrošenoj energiji. Na slici Usporedba energije dobivene simulacijom te energije dobivene izračunom putem formule (slika 7.) može se primijetiti da je odstupanje grafova energije dobivene simulacijom te energije dobivene izračunom putem formule (iz realnih uvjeta). Odstupanje je zanemarivo te iznosi 0.05 %. Ukupna potrošnja energije iznosi 95.8 KJ. To je energija potrebna za okretanje ventilatora, dok je za ukupnu utrošenu energiju potrebno odrediti stupanj korisnosti dizelskoga motora koji zapravo pokreće taj ventilator. Stupanj korisnosti dizelskoga motora je promjenjiv te ovisi o okretnom momentu motora i okretajima. Simulacijom su određene vrijednosti stupnjeva korisnosti na zadanoj stazi te je na temelju tih vrijednosti određena srednja vrijednost stupnja korisnosti od 36.48 %. Također je uzet i stupanj korisnosti visko-spojke koji iznosi 90 % [1]. Na temelju tih stupnjeva korisnosti određuje se ukupan stupanj korisnosti



dizelskoga motora i visko-spojke te iznosi 32.83 %. Stoga ukupna potrošnja energije koju mora proizvesti dizelski motor iznosi 291.84 KJ.

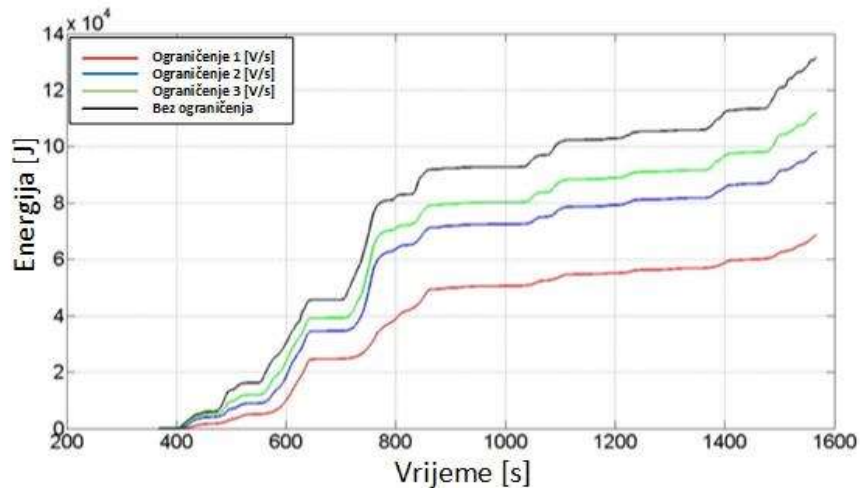


**Slika 7.** Usporedba energije dobivene simulacijom te energije dobivene izračunom putem formule

## 7.2. Simulacija sustava s električno pogonjenim ventilatorom

Izvršeno je nekoliko simulacija s varijacijama na različite parametre. Parametri, čije vrijednosti variraju, su zadana temperatura rashladnoga sredstva, tj. temperature regulacije te ograničenje porasta napona upravljanja ventilatorom. Zadane temperaturne vrijednosti su 85 °C, 87.3 °C i 95°C, dok su vrijednosti maksimalnih promjena napona 1 V/s, 2 V/s, 3 V/s i neograničeno. Vrijednost temperature od 87.3 °C izabrana je, jer je to srednja temperatura kamiona voženoga po stazi, dok je 95 °C izabrana iz razloga navedenih u dijelu koji se odnosi na ideje za uštedu.

Primjer rezultati simulacije za 95 °C za različita ograničenja promjene napona regulacije prikazan je na slici Prikaz potrošene energije hlađenja za različita ograničenja upravljačkoga napona na zadanoj stazi uz zadanu temperaturu 95 °C (slika 8.)



**Slika 8.** Prikaz potrošene energije hlađenja za različita ograničenja upravljačkoga napona na zadanoj stazi uz zadanu temperaturu 95 °C

U tablici Rezultati simulacije za različite radne temperature i ograničenja promjene napona (tablica 1.) prikazani su objedinjeni rezultati simulacija. Može se primijetiti da maksimalna ušteda goriva iznosi 0.18596 l/100km uz ispunjavanje svih uvjeta kao npr. prekoračenje dopuštene temperature, broja okretaja ventilatora, itd. Dodatno se još razmatrala mogućnost uštede za slučaj da se za pokretanje ventilatora koristi energija dobivena rekuperacijom iz kočionoga sustava. Ta mogućnost nije povoljna u većini simulacija. U usporedbi s ventilatorom pokretanim pomoću visko-spojke ispada da je potrebno više energije, a to je stoga jer je potrebna višestruka pretvorba energije i to iz mehaničke u električnu (stupanj korisnosti električnog motora 95 % [10] zatim u kemijsku (stupanj korisnosti baterije također 95 % [11] kao i obrnuto).

**Tablica 1. Rezultati simulacije za različite radne temperature i ograničenja promjene napona**

Radna temp. (°C)	Ograničenje povećanja napona (V/s)	Maks. broj okretaja (1/min)	Maks. temp. odstupanja (°C)	El. potrošena energija (KJ)	Razlika viskokvačilo i el. pogonjen ventilator (KJ)	Uštedena energija (W)	Potrošnja - ušteda (l/100km)
85	1	667.0587	3.4720	147.45	144.39	120.43	0.12043
85	2	833.4589	1.5684	187.37	104.47	87.13	0.08713
85	3	834.9435	1.0824	205.49	86.35	72.01	0.07201
85	Bez ogra.	820.8096	0.2020	228.24	63.6	53.04	0.05304
87.3	1	646.3890	3.3539	123.32	156.52	130.54	0.13054
87.3	2	805.7703	1.5146	159.78	132.06	110.14	0.11014
87.3	3	805.2796	1.0406	176.53	115.31	96.17	0.09617
87.3	Bez ogra.	790.9236	0.1952	199.66	92.18	76.88	0.07688
95	1	575.4464	3.0184	68.866	222.97	185.96	0.18596
95	2	719.8685	1.3277	98.309	193.53	161.41	0.16141
95	3	716.9118	0.9013	111.93	179.91	150.05	0.15005
95	Bez ogra.	703.6768	0.1793	131.60	160.24	133.64	0.13364

## 8. Zaključak

Ovim radom objašnjena je mogućnost smanjenja potrošnje goriva uz različite načine regulacije ventilatora hladnjaka. Današnje tehnologije regulacije temelje se na visko-spojci kao elementu regulacije. Stoga je u ovom radu napravljena usporedba visko-spojke i električno pogonjenoga ventilatora. Najveća prednost električnoga motora je neovisnost broja okretaja u odnosu na visko-spojku kod kojeg se ventilator barem vrti minimalnom brzinom, te je ograničen s maksimalnim brojem okretaja motora. Neovisnost broja okretaja te veći maksimalni broj okretaja omogućuju povećanje radne temperature motora, jer postoji mogućnost sprječavanja prekoračenja zadane temperature.

Usporedbom rezultata simulacije ventilatora s visko-spojkom i električno pogonjenoga ventilatora može se zaključiti da postoji mogućnost uštede goriva od 0.18596 l/100 km. Također, napravljena je i analiza uštede goriva rekuperacijom iz kočionog sustava pri čemu je ušteda niža zbog dvostruke pretvorbe energije, te iznosi 0.07939 l/100 km. Sljedeći korak u uštedi mogao bi

biti u realizaciji prediktivne regulacije hlađenja kod koje bi se analizirala nadolazeća staza te sukladno njoj prilagodilo hlađenje.

## Literatura

- [1] Hoepke, E., Breuer, S., Appel, W., Brähler, H., Dahlhaus, U., Esch, T., . . . Rhein, B. (2008). *Nutzfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- [2] *www.abis-ostrow.com.pl*. (13. 09 2020). Von [http://www.abis-ostrow.com.pl/files/editor/Tabelki/BASF/Glystantin\\_G48.pdf](http://www.abis-ostrow.com.pl/files/editor/Tabelki/BASF/Glystantin_G48.pdf) abgerufen
- [3] Ignatowitz, E. (2011). *Chemietechnik*. Hann-Gruiten: Nourney, Vollmer GmbH& Co. KG.
- [4] Wallenstein, C. (1998). *Grundlagen der Nutzfahrzeug*. München: MAN Nutzfahrzeuge Aktiengesellschaft.
- [5] Grundmann, R., & Schönholtz, F. (-). *Grundlagen der Ventilatorentechnik*. Bad Hersfeld: TLT-Turbo GmbH.
- [6] Mollenhauer, K. &. (2007). *Handbuch Dieselmotoren*. Berlin: Springer.
- [7] Angermann, A., Michael, B., Martin, R., & Ulrich, W. (2007). *MATLAB - Simulink - Stateflow*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- [8] Parspour, N. (2008). *Die Gleichstrommaschine (Skriptum)*. Pfaffenwaldring: Universität Stuttgart.
- [9] Horn, M., & Dourdoumas, N. (2004). *Regelungstechnik*. München: Pearson Studiums.
- [10] Klemm, M. (kein Datum). *Energietechnik (Skriptum)*. Dresden: Institut für Energietechnik, Professur Kraftwerkstechnik.
- [11] Sauer, D. U. (kein Datum). *Optionen zur Speicherung elektrischer Energie in Energieversorgungssystemen mit regenerativer Stromerzeugung (Skriptum)*. Aachen: Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA).