

# TOPOLOGIJA POGONA HIBRIDNIH ŽELJEZNIČKIH VOZILA

Danas su staklenički plinovi ključni za održavanje temperature Zemlje pogodne za život. Efekt staklenika stvara nepovoljne utjecaje na okoliš i utječe na klimatske promjene izravnim povećanjem prosječne temperature zraka. Jedan od glavnih uzročnika efekta staklenika su štetne emisije ispušnih plinova. Željeznica kao onečišćivač utječe lokalno na okoliš. Budući da današnja željeznička vozila dobivaju energiju izravno preko kontaktne mreže ili iz dizelskoga goriva koje pokreće dizelske motore s unutarnjim izgaranjem (MSUI), onečišćenje je usmjereno na vozila s MSUI-om.



dr. sc. **Mario Mišić**,  
dipl. ing. stroj.

mario.misic@yahoo.com

UDK: 629.4+629.06

## 1. Uvod

Štetne emisije ispušnih plinova mogu se smanjiti tzv. *downsizingom*, odnosno smanjenjem obujma MSUI-a zadržavanjem iste snage, hibridizacijom pogona ili potpunim uklanjanjem MSUI-a. Rad nije usmjeren na *downsizing*, nego na hibridizaciju pogona čija će topologija biti prikazana. Također će se osvrnuti na potpuno uklanjanje MSUI-a, a prikazat će se i topologija alternativnih pogona za željeznička vozila. MSUI se može ukloniti i potpunom ili djelomičnom elektrifikacijom pruga, što iziskuje upotrebu električnih vlakova koji nemaju MSUI. Na dijelu pruge koji ipak ne bi bio isplativ za elektrifikaciju, moraju se koristiti hibridna električna vozila. Promatrane su hibridizacije novih vozila koja uglavnom imaju vučne trofazne motore te je zato i topologija usmjerena prema njima.

## 2. Hibridni motorni vlakovi

Dizelski motor danas je jedan od većih onečišćivača i emisije ispušnih plinova propisane su za motorna željeznička vozila objavom UIC624 (tablica 1.).

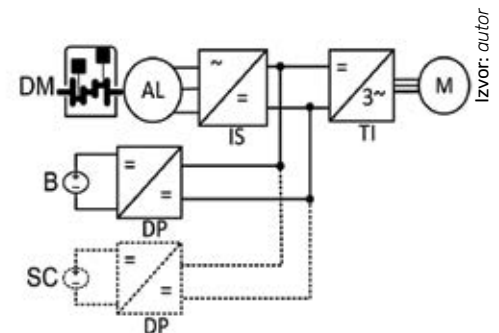
Da bi se dobile što manje vrijednosti štetne emisije ispušnih plinova, proizvođači hibridiziraju pogon. Hibridizacija podrazumijeva dodatnu ugradnju skladišta električne energije uz dizelski motor. Najčešća skladišta energije su baterije, no mogu se ugrađivati i superkondenzatori. Ovisno o namjeni željezničkog vozila, mogu se ugraditi samo baterije (B), samo superkondenzatori (SC) ili oba uređaja. Baterija ima sporiji odziv snage od superkondenzatora, no ima veću specifičnu gustoću snage i energije ( $e_B \approx 140 \text{ Wh/kg}$ ,  $e_{SC} \approx 14 \text{ Wh/kg}$ ). Za isti obujam uređaja, baterija ima deset puta više snage te će zato dulje biti puna. Superkondenzator ugrađuje se najčešće uz bateriju i služi za trenutačnu dobavu snage, što vozilu omogućuje bolje ubrzavanje ili svladavanje uspona.

Hibridizacija se najčešće izvodi na vozilima s električnim prijenosom snage, no nije nemoguće hibridizirati vozilo s hidrodinamičkim prijenosom snage. Pri električnome prijenosu snage pogonski se uređaji spajaju serijski, dok se kod hi-

drodinamičkoga prijenosa snage baterija s vučnim električnim motorom spaja paralelno.

U postojećemu pogonskom sustavu željezničkih vozila s električnim prijenosom dizelski je motor spojkom vezan na alternator koji proizvodi izmjeničnu električnu struju ili na generator koji proizvodi istosmjernu struju. Takva struja najčešće ulazi u ispravljač koji ju ispravlja i pretvara u istosmjernu struju glavnoga kruga. Na glavni se krug spajaju vučni motori. Prilikom hibridizacije vozila takav pogonski sustav mora biti doraden zbog vraćanja energije u baterije (superkondenzatore). Danas se u većini slučajeva grade vozila koja su uglavnom pogonjena trofaznim vučnim motorima (M) i prema tome se topologija pogonskog sustava sastoji od dizelskog motora (DM) s alternatorom (AL) koji je spojen na ispravljač (IS), čiji izvodi ulaze u trofazni izmjenjivač (TI). Trofazni izmjenjivač dio je glavnoga strujnoga kruga i u njega ulaze izvodi iz dvosmjernog pretvarača (DP), koji je spojen na neko skladište energije (B, SC; slika 1.).

Hidrodinamički prijenos sastavljen je od dizelskog motora (DM) na koji je spojen

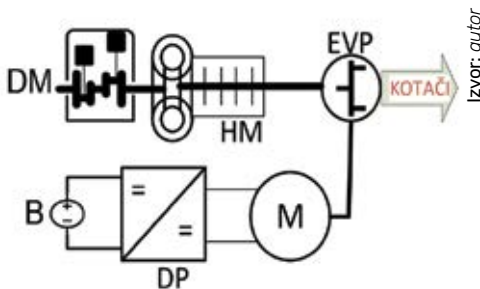


Slika 1. Topologija serijskoga hibridnog pogonskog sustava s dizelskim motorom

Tablica 1. Emisije ispušnih plinova dizelskih motora prema UIC624

Stanje	Nadnevak	Snaga, P kW	vrtnja radilice, n min <sup>-1</sup>	CO	HC	NOx	PM	Dim
				g/kWh				
UIC I	do 31. 12. 2002.			3	0,8	12	-	1,6 - 2,5
UIC II	1. 1. 2003.	P ≤ 560		2,5	0,6	6,0	0,25	
		P > 560	n > 1000	3	0,8	9,5	0,25	
	n ≤ 1000		3	0,8	9,9	0,25		

hidrodinamički mjenjač (HM), s kojega je kardanovim vratilima pogon razveden prema kotačima. Hibridizacija hidrodinamičkog prijenosa nije neuobičajena, ali nije i nemoguća. Da bi takav sustav radio, hibridizacija se provodi u paralelnome spoju. Baterija se preko kontrolera motora i dvosmjernog pretvarača (PR) može spojiti na vučni motor (M) koji valja upariti s hidrodinamičkim prijenosnikom. Izlazna vratila vučnog motora i hidrodinamičkog prijenosnika spajaju se u elektroničkom varijabilnom prijenosniku (EVP) koji upravlja raspodjelom snage (slika 2.).



Slika 2. Topologija paralelnoga hibridnog pogonskog sustava s dizelskim motorom

### 2.1. Nedostaci i prednosti motornih hibridnih pogonskih sustava

Hibridni vučni sustav ima dvije prednosti u usporedbi sa standardnim sustavom koji koristi samo dizelske motore kao izvor snage:

- Povećava učinkovitost dizelskog motora u području velikih brzina vrtnje. U tim područjima motor može prijeći u prazan hod i vuča se preusmjeriti na skladište energije (B, SC) te se na taj način štedi gorivo.
- Regenerativnim kočenjem može se dodatno uštedjeti energija njezinim pohranjivanjem u skladišta (B, SC).

Budući da hibridna željeznička vozila i dalje imaju svu opremu kao i standardna vozila, prostor za ugradnju hibridne opreme ograničen je. Baterije nisu većih gabarita i time je ušteda regenerativnim kočenjem ograničena. Do sada se ispitivanjima pokazalo da se učinkovitost goriva može poboljšati za najviše 30 posto regenerativnim kočenjem. Sustav ipak može pružiti neke prednosti:

- smanjiti troškove i produljiti vijek trajanja baterija jer nije stalno u radu
- smanjiti troškove održavanja dizelskog motora zbog olakšanog rada.



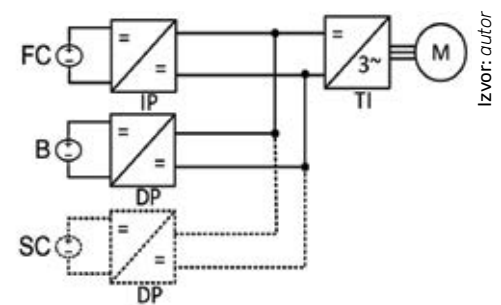
Slika 3. Hibridna lokomotiva T-HDB 800

Takvim je rješenjima najsklonija Toshiba koja razvija hibridnu manevarsku lokomotivu T-HDB 800 za Njemačku željeznicu (DB AG). Lokomotiva ima vučnu snagu od 750 kW, dva dizelska motora snage 2 x 490 kW, litij-ionsku bateriju od 120 kWh i vučne trofazne sinkrone motore s trajnim magnetima (slika 3.).

### 3. Hibridni vlakovi s gorivnim člancima

Vlakovi pogonjeni gorivnim člancima uvijek su hibridizirani jer gorivni članak (FC) ima loš odziv snage i da bi sam sudjelovao u vuči, mora postojati višak snage za ubrzanje i svladavanje uspona pruge, što povećava gabarite gorivnog članka, otežava ugradnju i drastično mu povećava masu. Takvi vlakovi nemaju štetnu emisiju ispušnih plinova jer se u gorivnome članku dobiva električna energija sintezom vode. U gorivnome članku spajaju se vodik iz spremnika i kisik iz zraka u vodu. Proizvodi kemijske reakcije gorivnog članka jesu čista voda i toplina.

U topologiji pogonskog sustava gorivni članak (FC) povezan je s istosmjernim pretvaračem napona (IP) DC/DC kako bi se povećao izlazni napon i gorivni članak zaštitio od naglih promjena opterećenja. Baterija (B) je spojena na dvosmjerni pretvarač (DP) kako bi se povećao izlazni napon. Za razliku od jednosmjernog pretvarača napona, dvosmjerni omogućuje punjenje i pražnjenje, zadržava stanje napunjenosti na unaprijed zadanim vrijednostima i štiti bateriju od preuranog oštećivanja. Po potrebi se može dodati superkondenzator (SC), koji je isto tako spojen na svoj dvosmjerni pretvarač (slika 4.).



Slika 4. Topologija hibridnoga pogonskog sustava s gorivnim člancima

### 3.1. Nedostaci i prednosti hibridnih pogonskih sustava s gorivnim člancima

Gorivni članci su u stalnome razvoju. Najvažnija je prednost ta što nema štetne emisije ispušnih plinova. Za sada se javljaju sljedeći problemi:

- Snaga gorivnih članaka nije dovoljna.
- Životni je vijek gorivnih članaka kratak.

Budući da je vodik vrlo zapaljiv i teško ga je ukapljivati, izazivao je poteškoće pri skladištenju i prijenosu. Do sada je skladištenje vodika predstavljalo problem, no kriogenim komprimiranjem znatno je poboljšana količina komprimiranog vodika i smanjena opasnost od eksplozije. Kriogeno stlačeni vodik nalazi se u takvoj posudi pod kriogenom (niskom) temperaturom i tlakom između 250 i 350 bara. Do sada se vodik skladištio na kriogene temperature tako da ga se ukapljivalo pod tlakom između standardne vrijednosti i 10 bara. Mogao se i skladištiti jakim stlačivanjem čak do 700 bara, za što je bilo neophodno graditi posude s vrlo debelom stjenkom.

lako danas ima manje primjera hibridnih vlakova s gorivnim člancima, komercijalni putnički vlak na gorivne članke nedavno je pokrenut u Njemačkoj. Alstoma Coradia iLint pogonjena je gorivnim člancima ukupne snage 400 kW, baterijama ukupne snage 225 kW i energije 111 kWh. Vodik je skladišten u kriogenim posudama s polimernom unutarnjom oblogom prekrivenom ugljičnim vlaknima omotanima stakloplastikom, zapremnine 89 kg vodika na 350 bara (slika 5.).

**4. Hibridni električni vlakovi**

Električni vlakovi napajaju se iz gornjeg voda, kontaktne mreže koja u Europi postoji u četiri različita sustava napajanja, izuzev nekih manjih lokalnih mreža pruga. Dva sustava napajanja izvedena su s istosmjernim naponom od 3 kV i 1,5 kV te s izmjeničnim naponom od 15 kV frekvencije 16⅔ Hz i od 25 kV frekvencije 50 Hz. Topologija pogonskog sustava za istosmjerni napon sastoji se od pantografa (P), istosmjernog pretvarača (PR), trofaznog izmjenjivača (TI) i vučnih motora (M). Ako su vozila namijenjena za izmjenični napon, topologija pogonskog sustava sastoji se od pantografa (P), transformatora (TR), ispravljača (IS) i trofaznog izmjenjivača (TI). Ako je vozilo namijenjeno na rad za sve sustave vuče, ima sve navedene uređaje.

Takva se vozila hibridiziraju ako su namijenjena za vožnju na elektrificiranim prugama i na pružnome odsjeku koji nema kontaktnu mrežu. Da bi se izbjeglo presjedanje putnika u slučaju višedijelnih vlakova ili zamjene lokomotiva, električna željeznička vozila mogu se hibridizirati kako bi poslužila u takvim vožnjama. Topologija hibridnoga električnog vozila obuhvaća sve dijelove kao i električno vozilo, uz dvosmjerni pretvarač za rad skladišta energije (baterije ili superkondenzatora) (slika 6.).

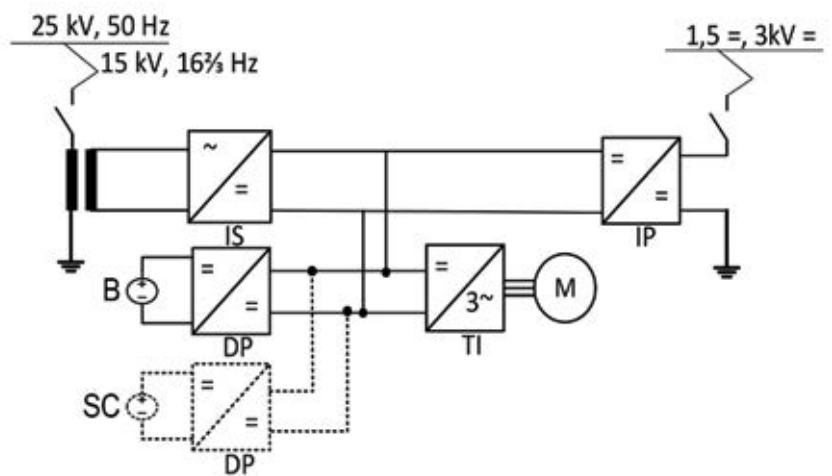
**4.1. Nedostaci i prednosti hibridnih pogonskih sustava električnih vozila**

Hibridna električna vozila mogu puniti skladište energije preko kontaktne mreže, što proširuje domet vozila. U odnosu na standardna električna vozila, hibridna električna vozila mogu regenerirati energiju kočenja natrag u skladište energije, omogućujući ponovno punjenje bez korištenja drugih izvora energije (MSUI, FC). Dodatno, korištenje elektrodinamič-



Izvor: 3

**Slika 5.** Hibridni vlak s gorivnim člancima Coradia iLint



Izvor: autor

**Slika 6.** Topologija hibridnoga pogonskog sustava električnog vozila

kih kočnica omogućuje smanjenje trošenja tarnih kočnica, smanjujući troškove održavanja vozila.

Treba napomenuti da takvo vozilo, dizajnirano s većom nazivnom snagom i boljom dinamikom kretanja, može lako biti uvedeno u promet na neelektrificiranome pružnom odsjeku jer ne zahtijeva dodatnu infrastrukturu. Sustav napajanja preko kontaktne mreže omogućuje ne samo pokretanje vozila, već i punjenje baterije

i tijekom boravka u kolodvoru i tijekom vožnje. To umanjuje potrebu za skupim punjačima baterija.

Takvo rješenje pogonskog sustava izradio je Astolm/Bombardier, čiji vlak Talen 3 BEMU nema nikakvu emisiju štetnih ispušnih plinova. Vlak se napaja preko kontaktne mreže od 15 kV, 16⅔ Hz. U njega je ugrađena litij-ionska baterija od 440 kWh koja se može napuniti za desetak minuta, a dostiže brzinu od 140 km/h (slika 7.).



Izvor: 4

**Slika 7.** Hibridni vlak Talent 3 BEMU

## 5. Upravljanje energijom

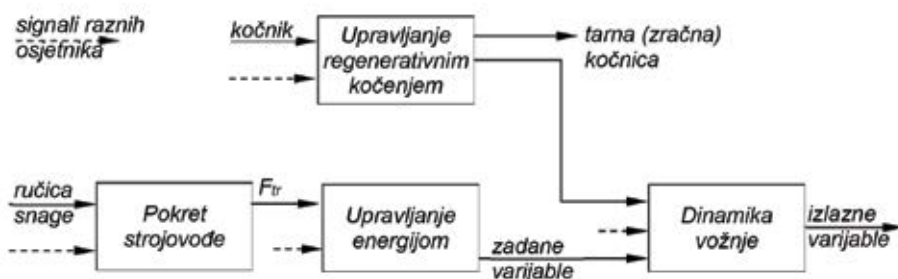
Izlazna snaga pogonskih uređaja električki je upravljana na zahtjev strojovođe. Budući da se radi o hibridnome pogonu, vektorski se upravlja okretnim momentom. Kada se ručica snage pomakne u smjeru za dodavanje snage, računalo preko strukture upravljanja daje zahtjev za okretnim momentom o kojemu ovisi vučna sila. Energija koja će biti utrošena prilikom vožnje vlaka iznosi:

$$(5.1)$$

$$E_{tr} = \int P_{tr}(t)dt = \int F_{tr}(t)v_{tr}(t)dt [J]$$

gdje je

- $P_{tr}$  - snaga vuče
- $F_{tr}$  - vučna sila vlaka (na obodu kotača).



Slika 8. Dijagram toka za upravljanje hibridnim željezničkim vozilom

Zahtjev okretnog momenta procjenjuje se na temelju tablice kao funkcije položaja ručice snage i brzine kotača ili vozila. Srednje vrijednosti interpoliraju se nelinearno. Pomicanjem ručice u smjeru oduzimanja snage, nastupa kočenje koje proizvodi energiju koja se skladišti.

Izlazne varijable upravljanja energijom zadane su vrijednosti za upravljački sustav (npr. okretni moment dizelskog motora, okretni moment vučnog motora itd.). Kada se promijeni način rada, zadane varijable pojedinih komponenti međusobno se koordiniraju prije nego što reagira upravljački sustav. Kada vozač djeluje na ručicu snage u negativnome smjeru, uspostavlja se regenerativno kočenje. Kako bi se iskoristilo regenerativno kočenje, zračna se kočnica ne koristi. Sustav prepoznaje signal kao zahtjev za negativnim okretnim momentom i upravljački sustav prenamjenjuje rad vučnog motora u kočenje (generatorski način rada). Glavno načelo rada jest to

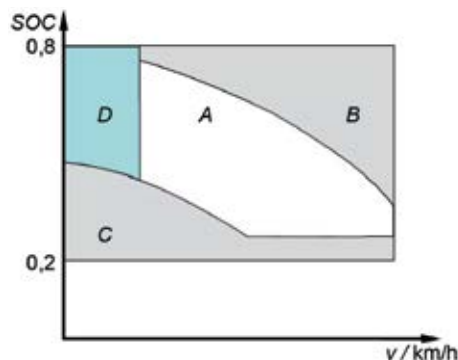
da regenerirana energija treba biti povećana do najveće moguće vrijednosti. Naravno, količina energije koja se može prenijeti ograničena je najvećom vrijednošću zakretnog momenta i snage vučnog motora te stanjem napunjenosti baterije i superkondenzatora.

### 5.1. Strategija

Strategija upravljanja energijom prati stanje napunjenosti baterije (SOC) i stanje gibanja vlaka te energiju preusmje-

rava prema vrijednostima. Postavljanjem tih parametara unaprijed može se odlučiti kako raspodijeliti izlaznu snagu baterija, superkondenzatora, dizelskog motora ili gorivnog članka. Radna točka pomiče se unutar područja D i A.

Osnovna ideja upravljanja energijom jest učinkovito iskorištavanje regenerativnoga kočenja. Važno je osigurati područje



Slika 9. Energetska područja skladišta energije

pohrane energije za regenerativno kočenje postavljanjem područja B. Osim toga u serijskome hibridnom sustavu važno je upravljati motorom pri optimalnoj brzini te pohranjivati energiju prilikom regenerativnoga kočenja (slika 9.).

## 6. Zaključak

U radu prikazane su topologije pogonskih sustava hibridnih željezničkih vozila. Prema prikazu pogonskih uređaja i mogućnosti današnje tehnologije, moguće je hibridizirati svaku vrstu pogona na željezničkome vozilu. Na temelju pregleda topologija može se zaključiti da hibridizacija smanjuje stakleničke plinove za vlakove pogonjene dizelskim motorom, a u slučajevima električnih vlakova i vlakova s gorivnim člancima potpuno ih uklanja.

Razvojem novih sustava vuče započeto je učinkovito korištenje energije hibridnim sustavima i promjenama pogonskih sustava željezničkih vozila na neelektrificiranim željezničkim prugama. Cilj je razvoja ne ovisiti o fosilnome gorivu.

Željeznički sustav doprinosi društvu kao ekološki prihvatljiv prometni sustav s učinkovitim konfiguracijama željezničkih vozila. Svakako se može utjecati na smanjenje utjecaja štetnih plinova na okoliš pomoću hibridnih sustava. Kako bi se smanjio utjecaj na okoliš, cijeli željeznički sustav, uključujući objekte za napajanje energijom i željeznička vozila, mora se optimirati u skladu s napretkom razvoja pogonskih uređaja za pohranu energije.

## LITERATURA

- [1] Union Internationale des Chemins de fer. 2017. UIC CODE 624 - Exhaust emission tests for diesel traction engines. Pariz. Francuska.
- [2] K. Hiroyasu, O. Kotaro. 2021. Series Hybrid Locomotive Equipped with Energy-Saving Electrical Equipment for European Market. Toshiba Review. Vol. 76. No. 4. Tokio, Japan.
- [3] W. Klebsch, P. Heining, J. Geder, A. Hauser. 2018. Battery systems for multiple units. VDE. Berlin. Germany.
- [4] Y. Laperrière. 2019. Realize your vision with Bombardier TALENT 3 BEMU. APTA Rail Conference. Toronto. Kanada.

- [5] R. Furut, J. Kawasak, K. Kondo. 2010. Hybrid Traction Technologies with Energy Storage Devices for Nonelectrified Railway Lines. IEEJ Trans 5. Tokio. Japan. 291-297.
- [6] L. Zhang, Y. Yang, M. Sun, H. Liu. 2017. Energy management strategy based on dynamic programming for dual source Trolleybus. Tehnički vjesnik 24, 5. Slavon-ski Brod. Hrvatska. 1439-1447.
- [7] Y. U. Nugraha, A. F. Desanti, M. N. Yuniarto, A. Wikarta. 2019. Review of the Topology and Energy Management Hybrid Energy Storage on Electric Vehicle. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 694. Bristol. Ujedinjeno Kraljevstvo.
- [8] R. Thorne, A. Amundsen, I. Sundvor. 2019. Battery Electric and Fuel Cell Trains. Institute of Transport Economics (TØI). Oslo.
- [9] X. Liu, Q. Zhang, C. Zhu. 2009. Design of Battery and Ultracapacitor Multiple Energy Storage in Hybrid Electric Vehicle. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference Dearborn. MI. SAD.
- [10] K. Ogawa, T. Yamamoto, T. Yoneyama. 2006. Energy efficiency and fuel consumption of fuel cells powered test railway vehicle. Railway Technical Research Institute. Tokio. Japan.

**SAŽETAK**

**TOPOLOGIJA POGONA HIBRIDNIH ŽELJEZNIČKIH VOZILA**

*Topologija pogonskog sustava željezničkog vozila opisuje razvod snage od pogonskog uređaja do kotača. Cilj je prikazati topologije hibridnih željezničkih vozila koja se polako pojavljuju u prometu. Za razliku od standardnih topologija, topologija za hibridne vlakove nešto je složenija. Svrha je pokazati spregu pogonskih uređaja u hibridnim vlakovima i njihovu mogućnost ugradnje. Kod hibridnih vlakova, prema topologiji, strategijom upravljanja energijom pravovaljano se i u točno odabranome vremenu upravlja raspodjelom snage. Zato je dan i kratki osvrt na strategiju upravljanja energijom i na njezinu ulogu u hibridnim vlakovima. Navedene su i opisane topologije pogonskih sustava za hibridne vlakove pogonjene gorivnim člancima (HFCMU), dizelskim motorom (HDMU) ili kontaktom mrežom (HEMU).*

**Ključne riječi:** topologija, hibridni vlak, hibridna lokomotiva, gorivni članci, baterije, superkondenzatori

**Kategorizacija:** stručni rad

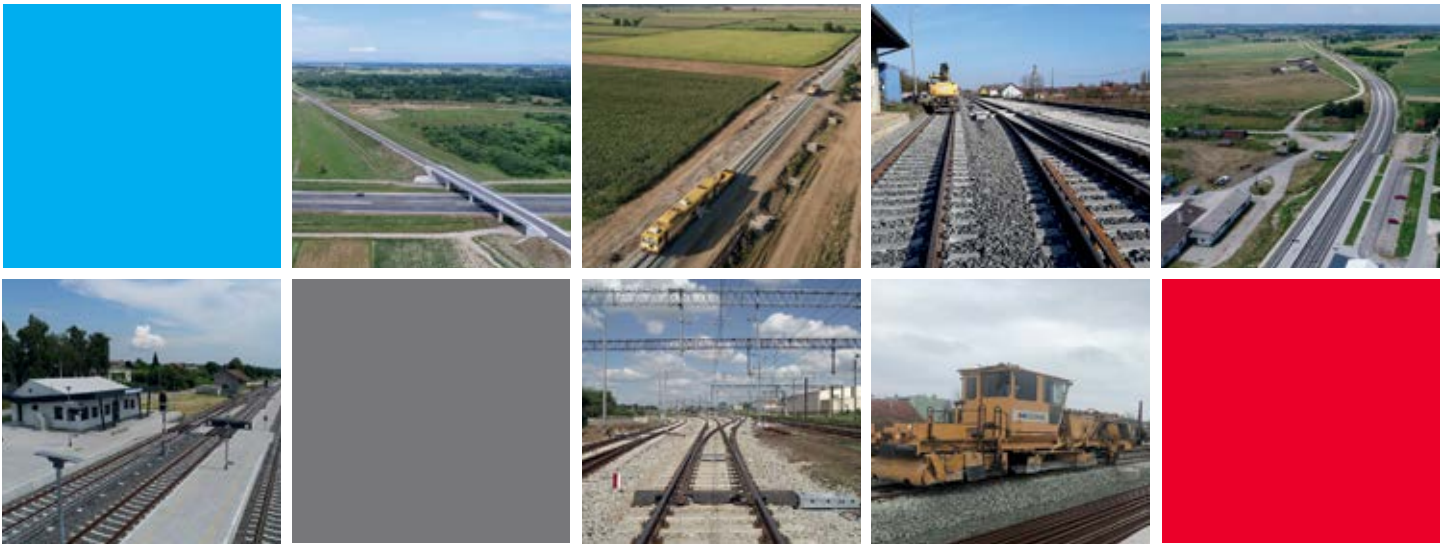
**SUMMARY**

**THE TOPOLOGY OF THE HYBRID RAILWAY VEHICLE POWER**

*The topology of the power system of a railway vehicle describes the distribution of power from the power device to the wheels. The goal is to show the topologies of hybrid railway vehicles that are slowly appearing in traffic. Unlike standard topologies, for hybrid trains the topology is somewhat more complex. The purpose is to show the coupling of power devices in hybrid trains and their possibility of installation. In the case of hybrid trains, according to the topology, the energy management strategy manages the distribution of power correctly and at the right time. Therefore, a small overview of the energy management strategy and its importance in hybrid trains is given. Topologies of the power system for hybrid trains powered by fuel cells (HFCMU), diesel engine (HDMU) or contact network (HEMU) are listed and described.*

**Key words:** Topology, hybrid train, hybrid locomotive, fuel cells, batteries, supercapacitors

**Categorization:** professional paper



U službi najboljih infrastruktura  
u Hrvatskoj



Gradimo održivu  
budućnost

Brazil | Danska | Hrvatska | Kolumbija | Letonija | Litva | Meksiko  
Peru | Portugal | Španjolska | Švedska | Urugvaj

[www.comsa.com](http://www.comsa.com)