



REPUBLIKA HRVATSKA
Ministarstvo regionalnoga razvoja
i fondova Europske unije



Procjena koristi od hibridizacije pogona skidera

Juraj Karlušić, Mihael Cipek

UVOD

- Ubrzano globalno zagrijavanje ohrabruje znanost i industriju u potrazi za novim tehnologijama u korist smanjenja stakleničkih plinova
- Trendovi hibridizacije i elektrifikacije koji slijede automobilsku industriju prisutni su i u van cestovnih vozila
- Manja potrošnja goriva, bolje performanse u vožnji, smanjenje štetnih plinova i čestica, niža buka ...
- Van cestovna vozila karakteriziraju intenzivna radna snaga i višesatne smjene te su često veliki potrošači goriva
- Poljoprivreda i šumarstvo zauzimaju šest posto udjela stakleničkih plinova u zemljama EU-27
- Stoga se postavljaju pitanja:
 - Koliko je isplativo pretvoriti konvencionalni šumski zglobni traktor (skider) na dizelski pogon snage 84 kW koji se trenutno nalazi u floti nacionalne šumarske tvrtke, u hibridnu varijantu?
 - Bi li takva preinaka rezultirala značajnim smanjenjem potrošnje goriva i stakleničkih plinova za nekoliko scenarija rada?

Šumski zglobni traktor (skider)

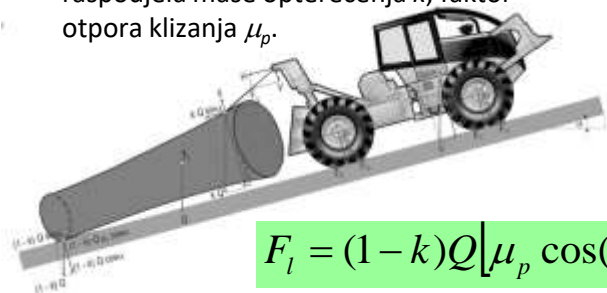
- koristi se za izvlačenje trupaca (posječenog drveća) iz šume (na brdovitom terenu)
- pogonski sklop sastoji se od dizelskog motora, ručnog mjenjača i pogona na sve kotače
- opremljen je vitlom
- vitlo i drugi pomoćni uređaji (hidraulični aktuatori) pokreću se pomoću ugrađenog hidrauličkog sustava



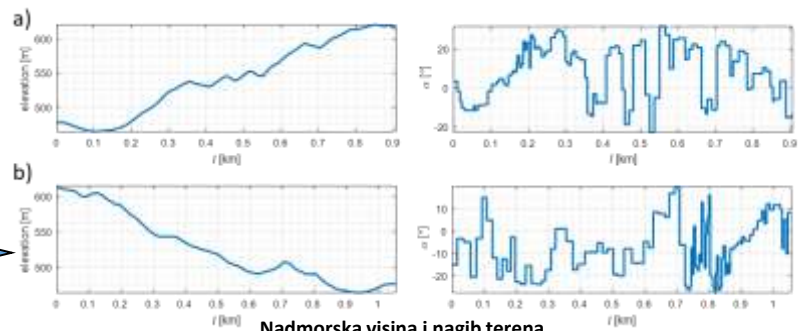
- Vitlo s dvostrukim bubnjem ima vučnu udaljenost 70 m i brzinu do 1,26 m/s.
- Trupci se pomoću vitla čeličnim užetom vuku do zaštitne ploče
- Za vrijeme vitlanja motor često radi u praznom hodu (pogoni pomoćne uređaje)

Radni i vozni ciklusi

- Razmatra se pet različitih ruta vožnje
- Ukupni rad traktora raspoređen je u dva radna dana
- Uzdužna dinamika gibanja pojednostavljena je na slučaju ukupne mase u točki.
- Model uključuje sile otpora kotrljanja te gravitacijske sile zbog nagiba terena
- Za klizanje trupaca po terenu definirana su tri parametra: otpor kotrljanja f , raspodjela mase opterećenja k , faktor otpora klizanja μ_p .



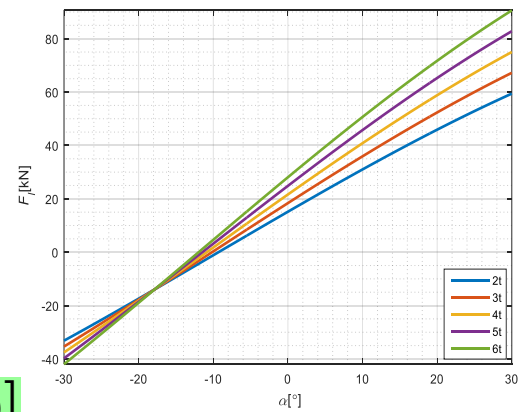
Ruta prvog radnog dana



Nadomska visina i nagib terena

F_l ukupna sila, Q težina trupca,
 G težina skidera, α nagib terena

$$F_l = (1 - k)Q[\mu_p \cos(\alpha) - \sin(\alpha)] + (G + kQ)[f \cos(\alpha) - \sin(\alpha)]$$

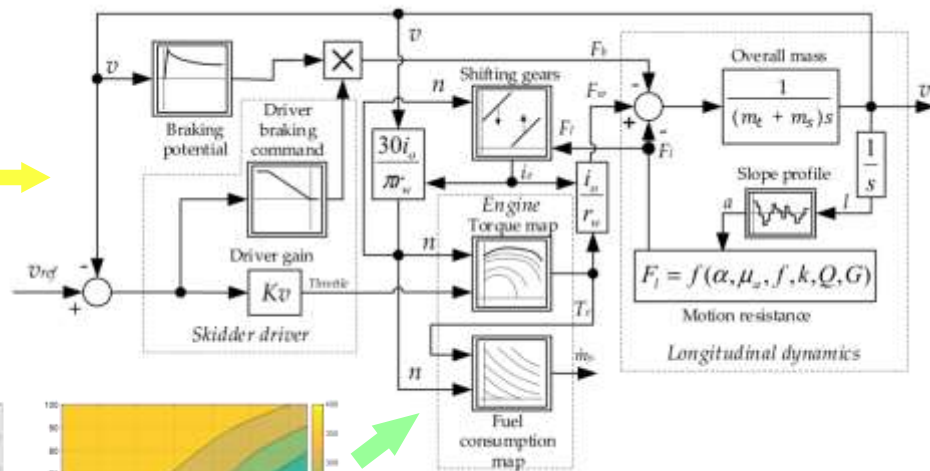
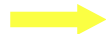
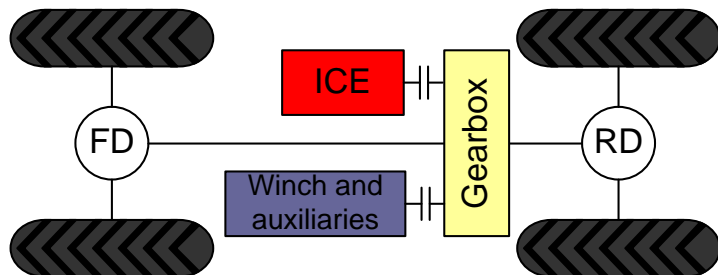


Ovisnost opterećenja o masi i nagibu

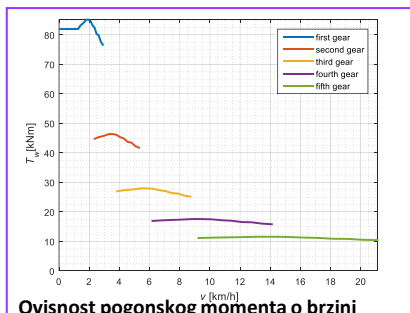
Model konvencionalnog skidera - EcoTrac 120V

- Pogonski sklop Skiddera sastoji se od dizelskog motora, desetostupanjskog (2x5) ručnog mjenjača i pogona na sve kotače

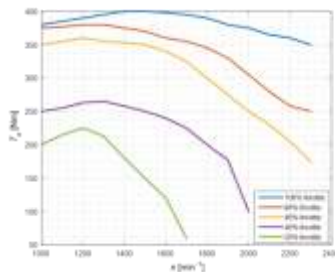
Pogon konvencionalnog skidera



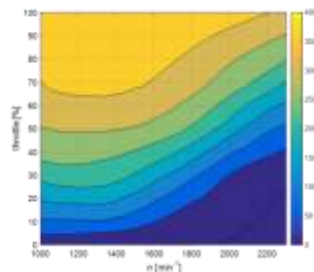
Blok dijagram konvencionalnog skidera



Ovisnost pogonskog momenta o brzini vozila



Krivulje ovisnosti momenta o položaju papučice akceleratora (lijevo) i mapa potrošnje goriva (desno)

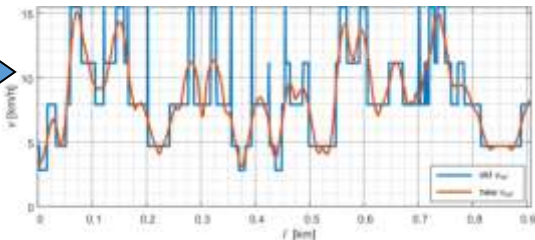


Odabir stupnja prijenosa i određivanje referentne brzine

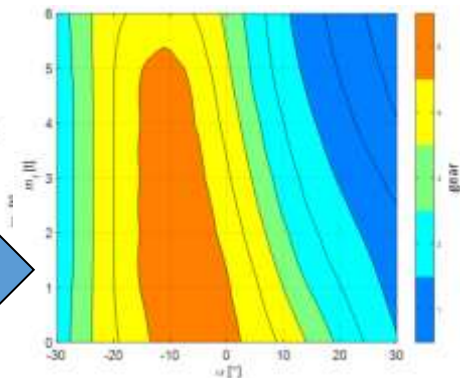
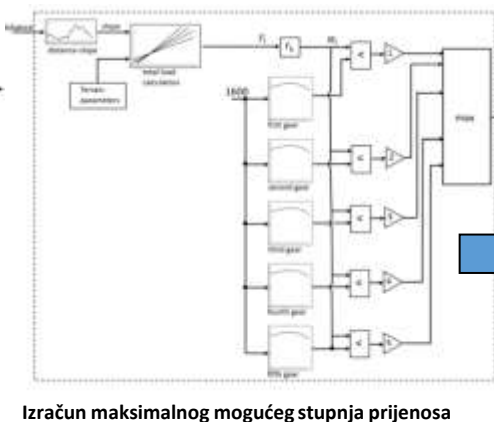
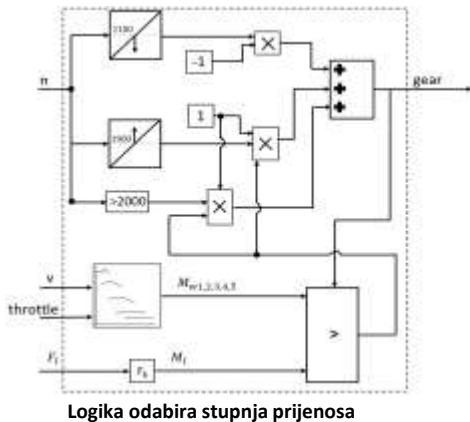
Referentna brzina definirana je prema stupnju prijenosa u kojem se nalazi skider i koji je jednak maksimalnom stupnju prijenosa u kojem se očekivano opterećenje može savladati. Zbog sigurnosti kod negativnog nagiba terena također smanjuje maksimalni dozvoljeni stupanj prijenosa.

Vrijednosti referentne brzine

Stupanj prijenosa	Referentna brzina [km/h]
1	2.8
2	4.7
3	7.9
4	11.2
5	15.5

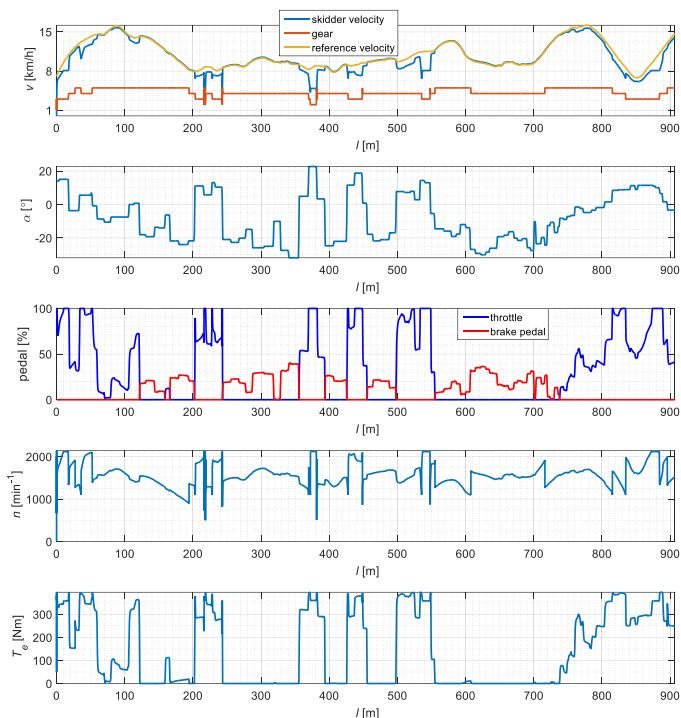


Odabir stupnja prijenosa vrši se ovisno o broju okretaja motora, kada broj okretaja motora prijeđe 1900 min⁻¹ prelazi se u viši, a kada prijeđe ispod 1100 min⁻¹ u niži stupanj prijenosa.



Ostvariv stupanj prijenosa za određenu masu i nagib

Simulacija rada konvencionalnog skidera



Vremenski dijagrami jednog scenarija vožnje

- Za svaki radni dan odabire se 8 različitih skupova parametara za cestu i opterećenje.
- Operacija vitlanja sastoj se od vezanja trupaca, povlačenja i čekanja u neutralnom načinu rada.

Pregled ruta vožnje za prvi radni dan

Route-dir.	m_t [t]	l [km]	f	μ_D	k	t [s]	g_c [l]
2-uphill-0	1.06	1.06	0.17	0	0	455	1.75
2-downhill-4.5	1.06	1.06	0.17	0.36	0.46	450	1.22
2-uphill-0	1.06	1.06	0.15	0	0	436	1.64
2-downhill-6	1.06	1.06	0.15	0.56	0.4	556	1.96
2-uphill-0	1.06	1.06	0.13	0	0	408	1.52
2-downhill-1.3	1.06	1.06	0.10	0.45	0.4	359	0.74
2-uphill-0	1.06	1.06	0.10	0	0	385	1.37
2-downhill-3.6	1.06	1.06	0.15	0.43	0.6	376	0.80
3-uphill-0	0.907	0.907	0.15	0	0	408	1.50
3-downhill-3	0.907	0.907	0.15	0.6	0.5	413	1.06
3-uphill-0	0.907	0.907	0.13	0	0	397	1.43
3-downhill-6	0.907	0.907	0.18	0.48	0.5	478	1.32
3-uphill-0	0.907	0.907	0.11	0	0	382	1.35
3-downhill-5.1	0.907	0.907	0.11	0.52	0.47	451	1.28
3-uphill-0	0.907	0.907	0.18	0	0	446	1.63
3-downhill-5.5	0.907	0.907	0.18	0.52	0.47	516	1.50

Operacije vitla za prvi radni dan

l_w [m]	m_t [t]	α [°]	μ_D	t_n/t_w [s]	g_w/g_n [l]	g_c [l]
10	4.5	14	0.6	41 / 10	0.03 / 0.26	51
23	6	25	0.56	84 / 22	0.73 / 0.053	106
9	1.3	19	0.34	30 / 9	0.066 / 0.019	39
35	3.6	21	0.51	114 / 34	0.072 / 0.072	148
21	3	11	0.43	71 / 20	0.039 / 0.044	91
15	6	27	0.42	60 / 15	0.041 / 0.038	75
19	5.1	16	0.6	70 / 19	0.059 / 0.044	89
31	5.5	20	0.48	107 / 30	0.088 / 0.067	137

Rezultati simulacija konvencionalnog skidera

Rezultati za prvi radni dan

Cycle	T_{cycle} [s]	g_{cycle} [l]
1	961	3.04
2	1103	3.75
3	806	2.36
4	914	2.33
5	917	2.64
6	955	2.84
7	922	2.76
8	1099	3.30
Average	960	2.88

Rezultati za drugi radni dan

Cycle	T_{cycle} [s]	g_{cycle} [l]
1	2102	6.60
2	2376	7.45
3	1878	6.10
4	2778	8.74
5	3133	9.70
6	3408	12.07
7	3134	10.92
8	2897	10.07
Average	2714	8.96

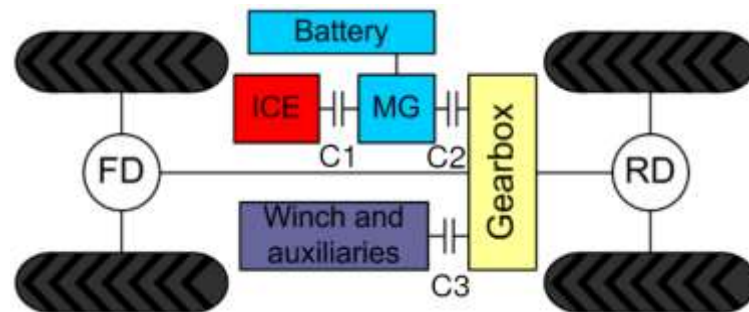
Ukupni rezultati za oba radna dana

Prvi dan	Vrijeme	Udio vremena [%]	Potrošeno gorivo [l]	Udio u potrošnji [%]
Ukupno	8 h		86.3	
Vožnja	7 h 12 min	90	82.76	96
Vitlanje	12 min	2.5	2.12	2.46
Prazni hod	36 min	7.5	1.41	1.54
Drugi dan	Vrijeme	Udio vremena [%]	Potrošeno gorivo [l]	Udio u potrošnji [%]
Ukupno	7 h 34 min		89.60	
Vožnja	7 h 17 min	96.57	88.4	98.66
Vitlanje	5 min	1.02	0.69	0.76
Prazni hod	12 min	2.41	0.4	0.45

- Prosječno vrijeme ciklusa prvog dana je 960 sekundi (30 ciklusa u 8 sati), a potrošnja goriva je između 2,33 i 3,30 litara s prosječnom potrošnjom od 2,88 litara po ciklusu (ukupno 86,3 litre).
- Prosječno vrijeme ciklusa drugog dana iznosi 2714 sekundi (10 ciklusa u 8 sati), a potrošnja goriva između 6,1 i 12,07 litara s prosječnom potrošnjom od 8,96 litara po ciklusu (ukupno 89,6 litara).

Izbor hibridne strukture

- Glavni zahtjev hibridizacije je održavanje performansi konvencionalnog pogonskog sklopa uz minimalne izmjene konstrukcije
- **Odabrana je paralelna hibridna konfiguracija P2**
- Dodatna snaga elektromotora može se koristiti za smanjenje vršnih momenata motora uzrokovanih snažnim ubrzanjem i vožnjom uzbrdo
- Stacionarna start-stop funkcija isključuje dizelski motor pa elektromotor preuzima pogon hidrauličnih crpki kod vitlanja
- Način rada određen je trenutnim stanjem napunjenosti baterije (SoC) i uvjetima opterećenja
- Za vrijeme vožnje dizelski motor će ostati uključen



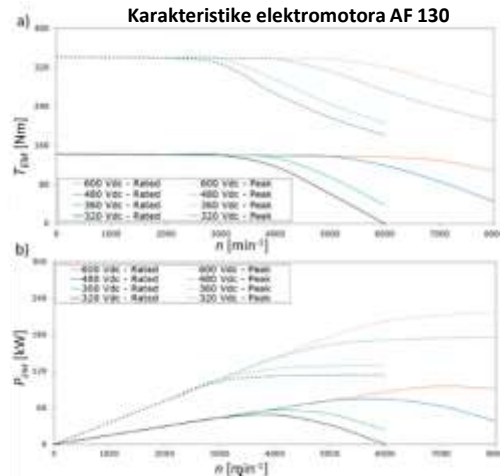
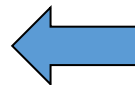
Predložena hibridna konfiguracija pogonskog sklopa

Načini rada hibridnog pogona

Work regime	Diesel engine	EM	C1	C2	C3
In optimal	On	Off	Engaged	Engaged	Disengaged
Low power	On	Generator	Engaged	Engaged	Disengaged
High power	On	Motor	Engaged	Engaged	Disengaged
Regenerative braking	On	Generator	Disengaged	Engaged	Disengaged
Winching	Off	Motor	Disengaged	Disengaged	Engaged
Stationary	Off	Motor	Disengaged	Disengaged	Engaged

Odabir i dimenzioniranje komponenti

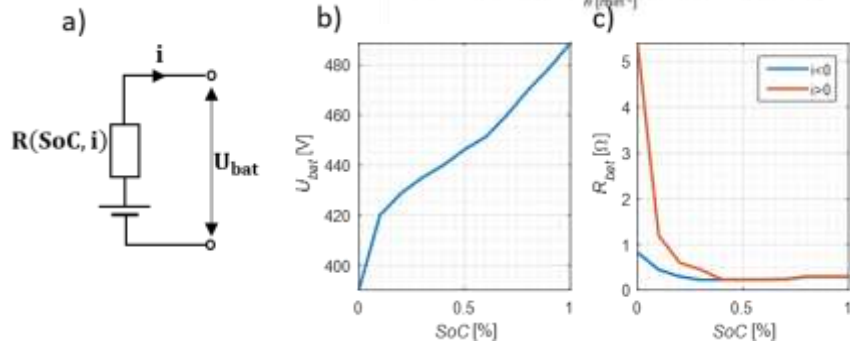
- Elektromotor i baterija odabrani su tako da zadovolje karakteristike vitla, najvećeg potrošača energije pomoćnih uređaja.
- Maksimalna snaga vitla je **83,16 kW**.
- Odabran je sinkroni motor AF 130 s nazivnim zakretnim momentom od 145 Nm i radnom snagom od **64 kW**. Najveća kratkotrajna izlazna snaga je **100 kW**.
- Baterija se sastoji od Li-Ion ćelija
- 250 ćelija podijeljeno je u dva paralelna bloka sa po 125 ćelija. Mogu isporučiti 100 kW snage. Masa baterije je 158 kg.



Parametri ćelije i baterije

	N	E (kWh)	Q (Ah)	P_{maks} (kW)	m_{bat} (kg)
Ćelija	1	0.06	15.9	0.4	0.63
Baterija	250	15	31.8	100	157.5

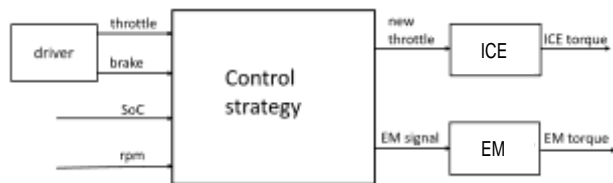
$$\frac{dSoC}{dt} = \frac{\sqrt{U_o^2(SoC) - 4R(SoC, i) \cdot P_{bat} - U_o(SoC)}}{2Q_{maks} \cdot R(SoC, i)}$$



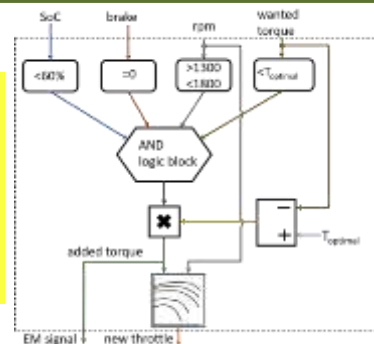
Ekvivalentni električni krug baterije (a), napon baterije ovisan o SoC (b), unutarnji otpor ovisan o SoC (c)

Strategija upravljanja

- Upravljačka jedinica određuje rad dizelskog motora i elektromotora pomoću jednostavne logike na bazi pravila (jednostavna strategija upravljanja)
- Pravila određuju momente ICE i EM na temelju položaj akceleratora, kočnice, stanja napunjenosti baterije i trenutnog broja okretaja motora.
- Četiri različita načina rada: samo ICE, ICE i EM, ICE koji puni bateriju i regenerativno kočenje

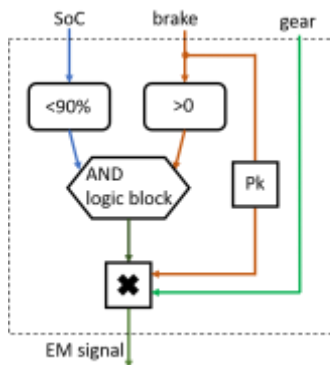


- Dizelski motor puni bateriju kada SoC padne ispod 60%
- Papučica kočnice otkazuje punjenje baterije ICE -om
- ICE daje veći okretni moment za punjenje u svom najučinkovitijem području

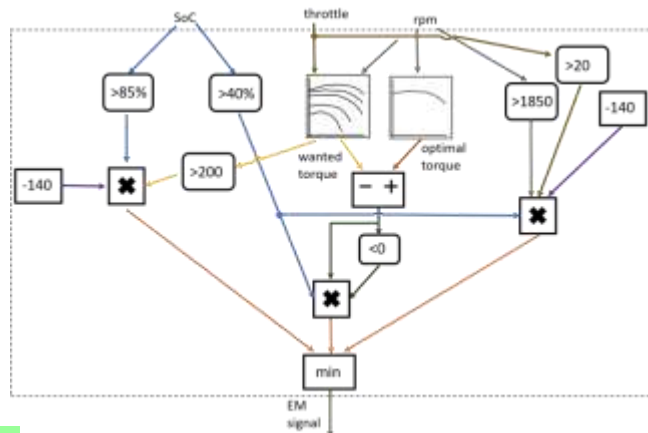


Punjenje baterije

- Regenerativno kočenje aktivira se pritiskom na papučicu kočnice
- Konvencionalna kočnica aktivira se ako kočion moment EM nije dovoljan



Regenerativno kočenje



Paralelni rad EM i ICE

- Ako je potreban zakretni moment veći od optimalnog, ovisno o SOCu baterije upravljačka jedinica traži dodatni moment pomoću EM
- EM može pomoći i dodatnim momentom pri vršnoj vrijednosti okretnog momenta ICE
- Ako SoC prijeđe 85% EM se dodatno angažira

Simulacije hibridnog skidera

- za identičan radni i vozni ciklusi

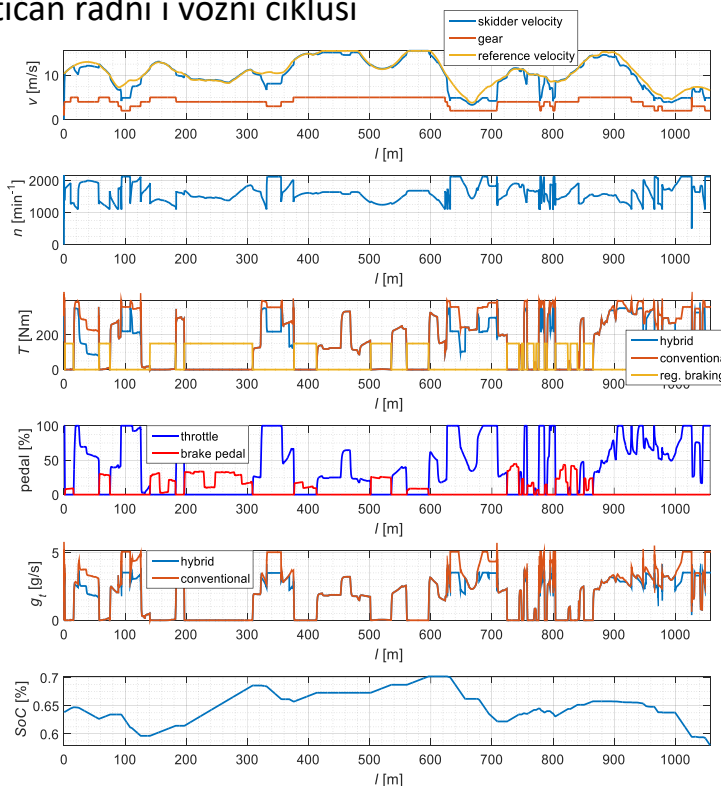
Vozna misija - prvi dan

Route - dir. - m_t [t]	l [km]	f	μ_p	k	SoC ₀ / Δ SoC [%]	t [s]	g_s [l]
2 - uphill - 0	1.06	0.17	0	0	65 / -23	455	1.55
2 - downhill - 4.5	1.06	0.17	0.36	0.46	41 / +10	450	1.12
2 - uphill - 0	1.06	0.15	0	0	51 / -11	436	1.49
2 - downhill - 6	1.06	0.15	0.56	0.4	36 / +4	603	1.82
2 - uphill - 0	1.06	0.13	0	0	40 / +2	408	1.47
2 - downhill - 1.3	1.06	0.13	0.56	0.4	41 / +14	359	0.67
2 - uphill - 0	1.06	0.10	0	0	55 / -8	385	1.24
2 - downhill - 3.6	1.06	0.10	0.43	0.6	43 / +16	376	0.71
3 - uphill - 0	0.907	0.15	0	0	59 / -15	408	1.31
3 - downhill - 3	0.907	0.15	0.6	0.5	42 / +10	413	0.95
3 - uphill - 0	0.907	0.13	0	0	52 / -10	397	1.27
3 - downhill - 6	0.907	0.13	0.48	0.5	40 / +11	478	1.16
3 - uphill - 0	0.907	0.11	0	0	51 / -10	382	1.20
3 - downhill - 5.1	0.907	0.11	0.52	0.47	37 / +17	451	1.06
3 - uphill - 0	0.907	0.18	0	0	54 / -12	446	1.49
3 downhill - 5.5	0.907	0.18	0.52	0.47	36 / +13	516	1.39

Stanje napunjenosti baterije kod opreacija vitlom - prvi dan

l_w [m]	m_t [t]	α [°]	μ_p	r_{sp}/t_w [s]	Δ SoC [%]	g_c [l]
10	4.5	14	0.6	41 / 10	-1.8	51
23	6	25	0.56	84 / 22	-4.8	106
9	1.3	19	0.34	30 / 9	-0.3	39
35	3.6	21	0.51	114 / 34	-4.2	148
21	3	11	0.43	71 / 20	-1.8	91
15	6	27	0.42	60 / 15	-2.3	75
19	5.1	16	0.6	70 / 19	-3.9	89
31	5.5	20	0.48	107 / 30	-5.3	137

- Kod nizbrdice SoC se povećava zahvaljujući regenerativnom kočenju
- Kod simuliranih ciklusa SoC ne pada ispod 36 % i može se reći da je SoC baterije održiv tijekom cijelog radnog dana
- Tijekom vitlanja SoC se smanjuje do 5 %



Vremenski dijagrami jednog scenarija vožnje

Analiza troškova

- Prosječna Li-Ion baterija može izdržati 2000 ciklusa (20% smanjenja kapaciteta).
 - Uzeta je pretpostavka jedan ciklus odgovara jednom radnom danu!
 - Skidder radi 285 dana u godini s 8-satnim smjenama
- Prosječna ušteda goriva prema simulacijama iznosi **11,45%**, a samo tijekom životnog ciklusa baterije (očekivano 7 godina) moguće je uštedjeti oko 177 tisuća kuna (cijena goriva iz 2020) i smanjiti emisiju CO2 za 45 tona
- Veće uštede mogu biti moguće uvođenjem hibridnog sustava u veći broj skidera
- 121 EcoTrac 120V skider trenutno aktivan u Hrvatskoj

Usporedba potrošnje konvencionalnog i hibridnog skidera

Period	Conventional vehicle g_c [l]	Hybrid vehicle g_h [l]	Ušteda [l]	CO ₂ smanjenje [t]
Dan	87.5	77.6	9.9	0,018
Mjesec	2012	1785	227	0,536
Godina	24150	21420	2724	6,43
7 godina	169050	149940	19068	45

Dodatni troškovi komponenata i CO₂

Components	Cijena [kn]	CO ₂ za izradu [t]
Battery 1 kWh	1186	0.275
Battery 15 kWh	17784	4.125
Electromotor 64 kW	35000	-

CO₂ smanjenje ~ 41 [t]

Ušteda ~120000 [kunas] (~ 17000 EUR)

Zaključak

- Računalni kvazi-statički model skidera izrađen je korištenjem dostupnih podataka iz literature.
- Izračun potrošnje goriva izvršen je pomoću računalne simulacije skidera za:
 - pet voznih misija s različitim očekivanim parametrima opterećenja
 - koje su podijeljene u dva radna dana
- Predložena je paralelna hibridna konfiguracija P2 koja ne zahtijeva velike promjene u postojećem pogonu vozila te kojoj su:
 - Veličina baterije i EM odabrane prema karakteristikama snage vitla
 - Strategija upravljanja hibridnim pogonom temeljena na bazi pravila.
 - SoC je u održivom stanju.
 - ICE isključen za vrijeme operacija vitlom
- Predložena hibridna konfiguracija:
 - ima uštedu goriva oko 11 %
 - može se isplatiti tijekom 25 mjeseci
 - može smanjiti emisiju CO₂ za 45,8 tona (u razdoblju od 7 godina - očekivano trajanje baterije)

Hvala na pažnji!



mihael.cipek@fsb.hr

Publikacije povezane s izlaganjem:

Karlušić, J.; Cipek, M.; Pavković, D.; BeniĆ, J.; Šitum, Ž.; Pandur, Z.; Šušnjar, M. Simulation Models of Skidder Conventional and Hybrid Drive. *Forests* **2020**, *11*, 921. <https://doi.org/10.3390/f11090921>

Karlušić, J.; Cipek, M.; Pavković, D.; Šitum, Ž.; BeniĆ, J.; Šušnjar, M. Benefit Assessment of Skidder Powertrain Hybridization Utilizing a Novel Cascade Optimization Algorithm. *Sustainability* **2020**, *12*, 10396. <https://doi.org/10.3390/su122410396>

Karlušić, J.; Cipek, M.; Pavković, D.; Šitum, Ž.; BeniĆ, J.; Šušnjar, M. Benefit Assessment of Skidder Powertrain Hybridization, Digital. In Proceedings of the 4th South East Europe (SEE) Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems (SDEWES) conference, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 28 June–2 July 2020.