



REPUBLIKA HRVATSKA
Ministarstvo regionalnoga razvoja
i fondova Europske unije



Optimalna struktura hibridnog pogona skidera

Mihael Cipek, Juraj Karlušić

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 cestovnim vozilima, a rezultiraju manjom potrošnjom goriva, boljim performansama, smanjenjenom emisijom štetnih plinova i čestica, nižom bukom ...
- Hibridni pogon sadrži dva ili više različita izvora energije te su prisutne njegove mnoge varijante.
 - Serijska struktura pogona
 - Paralelna struktura pogona
 - Serijsko-paralelna struktura pogona
- Složenost hibridnog pogona otvara mnoga pitanja u pogledu odabira strukture pogona, dimenzija komponenata i upravljanja tokovima energije, a sve zajedno ima utjecaj na efikasnost pogona.

Šumski zglobni traktor (skider)

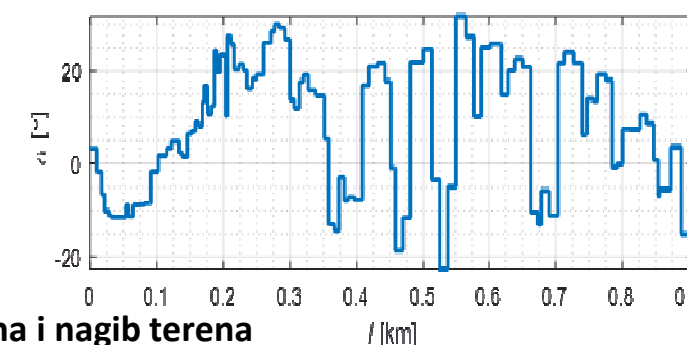
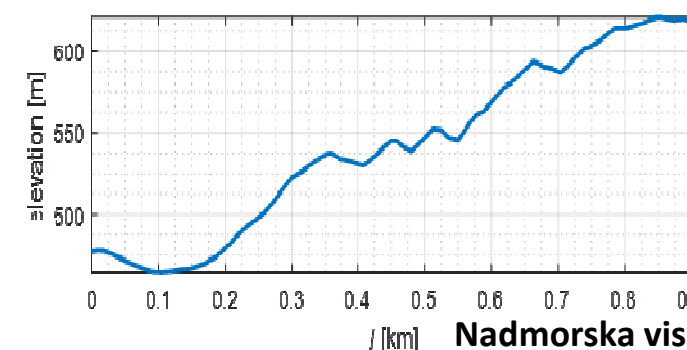
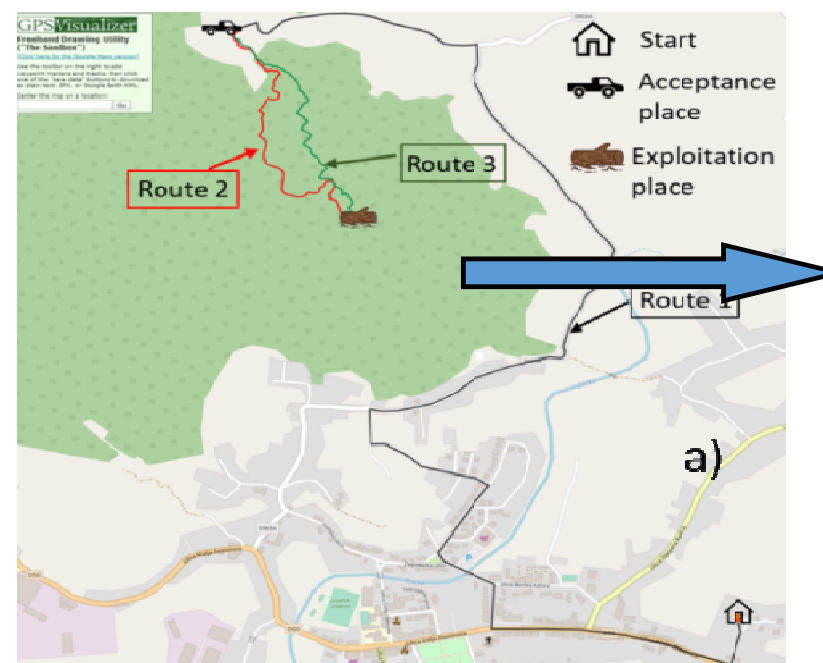
- koristi se za izvlačenje trupaca (posječenog drveća) iz šume (na brdovitom terenu)
- pogonski sklop sastoji se od dizelskog motora, ručnog mjenjača i pogona na sve kotače
- opremljen je vitlom
- vitlo i drugi pomoćni uređaji (hidraulični aktuatori) pokreću se pomoću ugrađenog hidrauličkog sustava



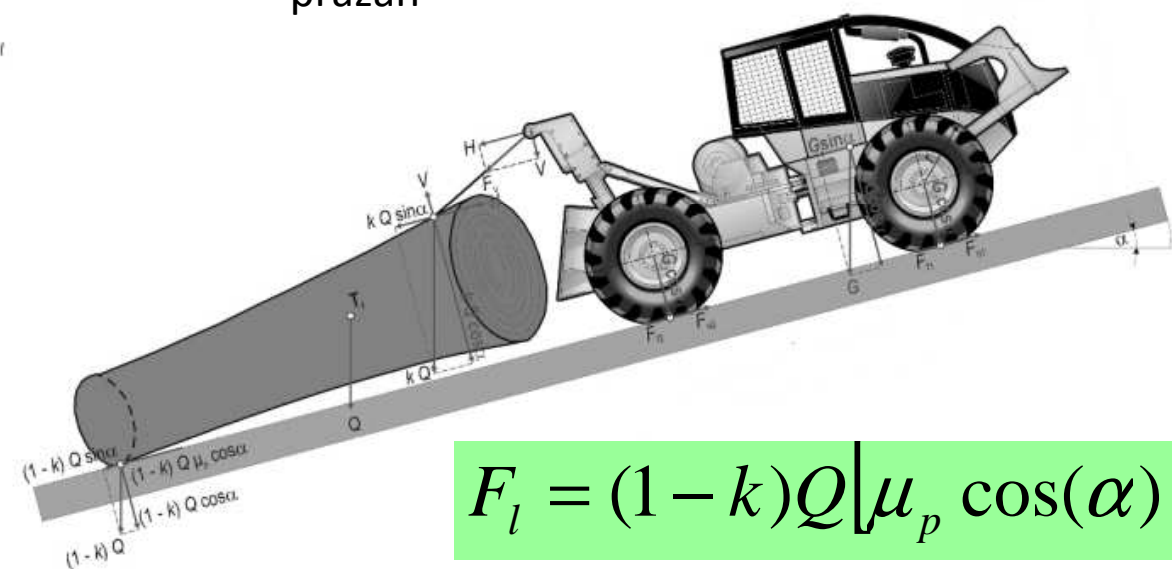
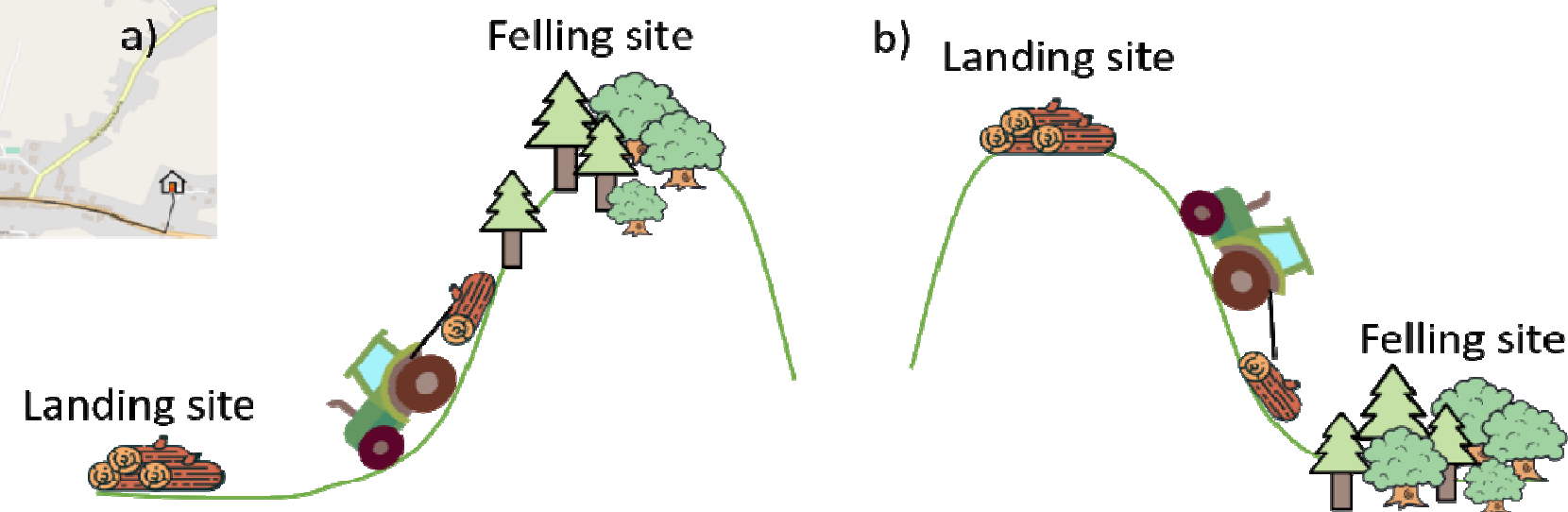
- Vitlo s dvostrukim bubnjem ima vučnu udaljenost 70 m i brzinu do 1,26 m/s.
- Trupci se pomoću vitla čeličnim užetom vuku do zaštitne ploče
- Za vrijeme vitlanja motor često radi u praznom hodu (pogoni pomoćne uređaje)

Radni i vozni ciklusi

- 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 .
- Odabrana vozna misija ima 910 m
- Odabrana su tri opterećenja:
 - maksimalni teret 6 t
 - srednji teret 3 t
 - prazan



Nadmorska visina i nagib terena

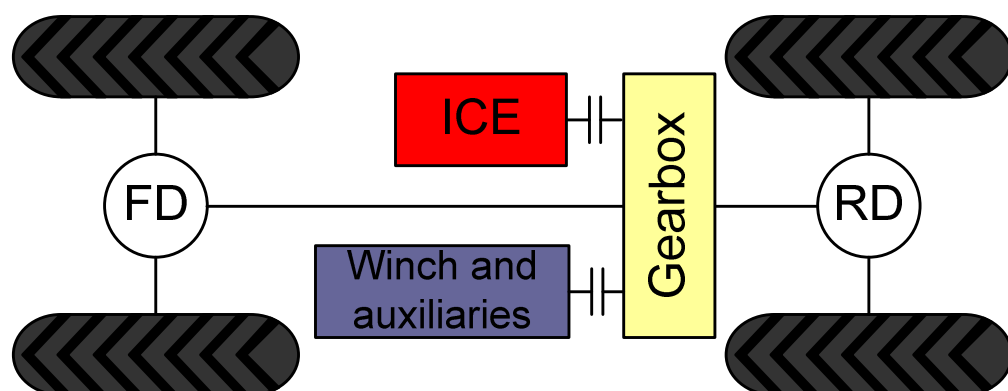


$$F_l = (1 - k)Q[\mu_p \cos(\alpha) - \sin(\alpha)] + (G + kQ)[f \cos(\alpha) - \sin(\alpha)]$$

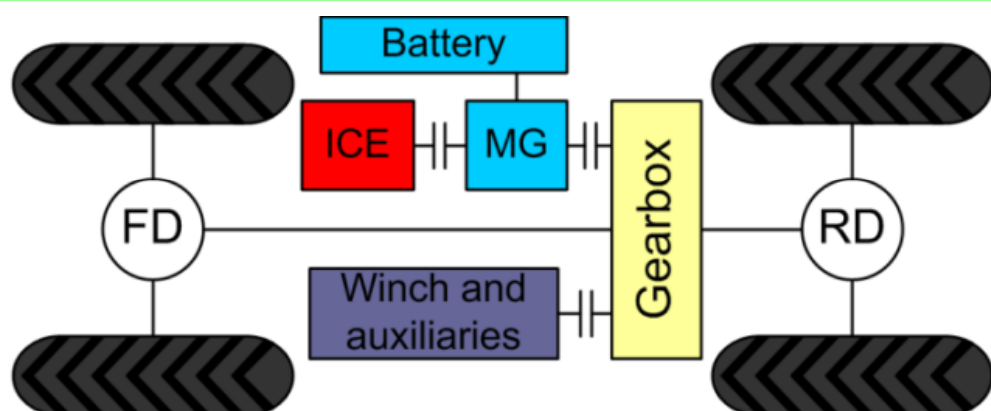
F_l ukupna sila, Q težina trupca,
 G težina skidera, α nagib terena

Konvencionalni i predloženi hibridni skideri

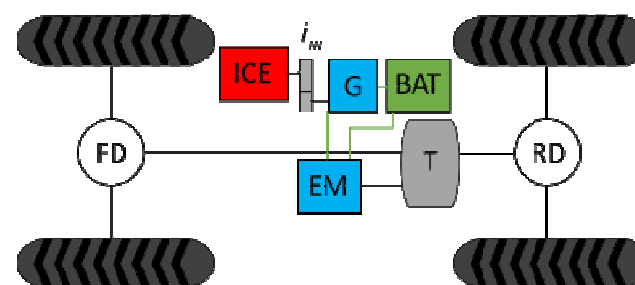
Konvencionalna struktura pogona



Predložena paralelna struktura



Predložena serijska struktura



Hybrid components' prices.

Component	Cost parallel (EUR)	Cost series (EUR)
Battery 15 kWh	2340	2340
Electromotor 64 kW	5000	
Electromotor 89,6 kW		7000
Electromotor 100 kW		7800
Total	7340	17,140

Cumulative consumption and costs.

Dobiveno kaskadnom optimizacijom

Skidder Type	Fuel Used (L)		Fuel Cost (EUR)	Savings
	1 Cycle	15,000 Cycles		
Conventional	2.62	39,300	66,928	–
Hybrid parallel	2.22	33,300	56,710	10,218
Hybrid series	2.36	35,400	60,286	6642

Ušteda goriva serijske strukture manja od paralelne strukture, a očekivani su veći investicijski troškovi.

Skalabilni modeli pogonskih strojeva

Tehnika Willansovih linija:

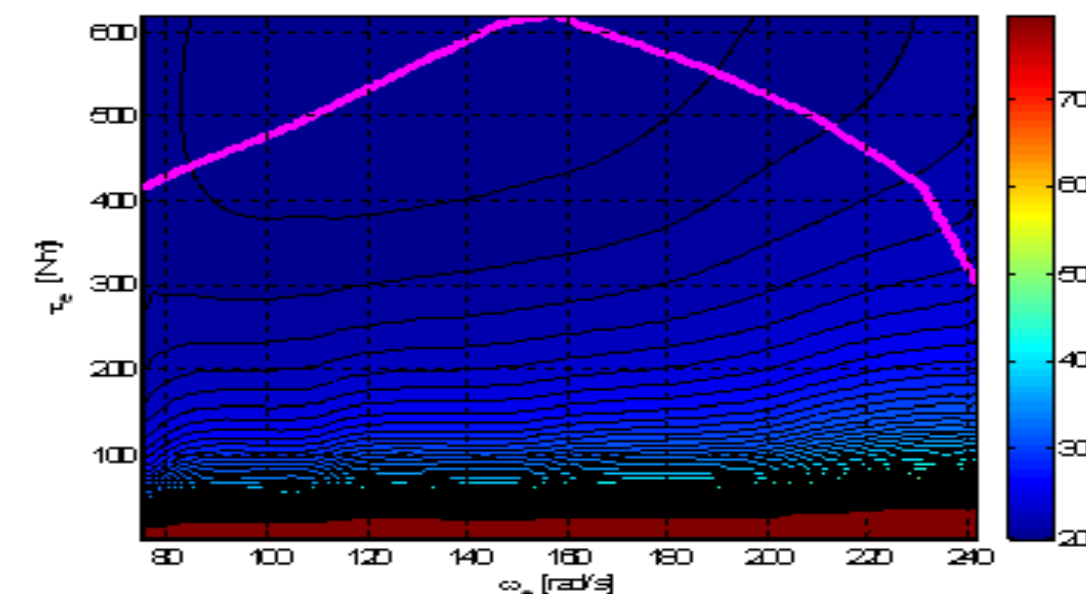
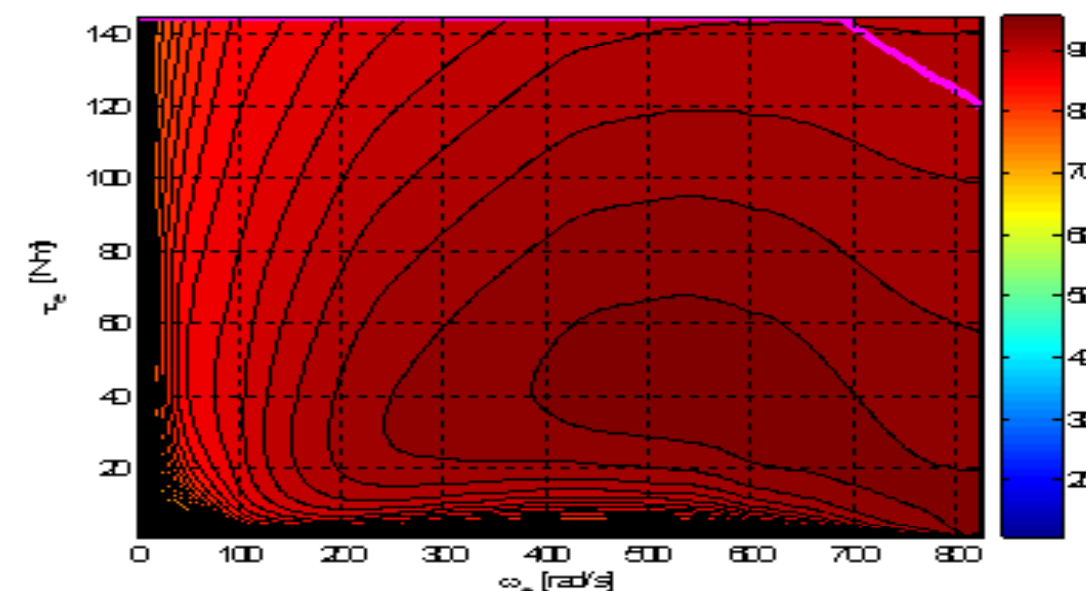
$$\eta_{mg} = \frac{P_{mg}}{P_{mg} + P_{mg,loss}}$$

$$P_{mg,loss}(\omega_{mg}, \tau_{mg}, S_{mg}) = c_1(\omega_{mg}) \frac{\tau_{mg}^2}{S_{mg}} + c_2(\omega_{mg}) \tau_{mg} + c_3(\omega_{mg}) S_{mg},$$

$$\dot{n}_f(\tau_e, \omega_e) = \frac{\tau_e \omega_e \dot{n}_f(\tau_e, \omega_e)}{1000 \cdot 3600}$$

$$\dot{n}_f(\omega_e, \tau_e, S_e) = c_1(\omega_e) \frac{\tau_e^2}{S_e} + c_2(\omega_e) \tau_e + c_3(\omega_e) S_e$$

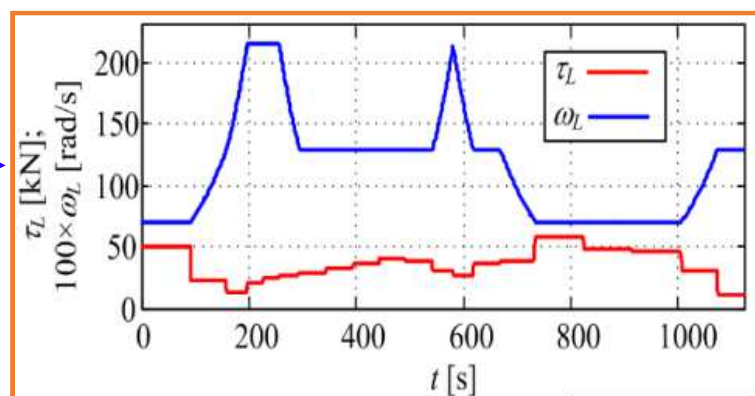
- Koeficijenti ovisni o brzini vrtnje dobiveni su numerički iz originalnih karakteristika.
- Točnost aproksimacije je velika za isti tip stroja.
- Skalirani motor ima isti raspon brzina vrtnje stoga je za različite raspone potrebno uvesti normalizaciju po brzini.



Statičke karakteristike (mape) ICE i MG

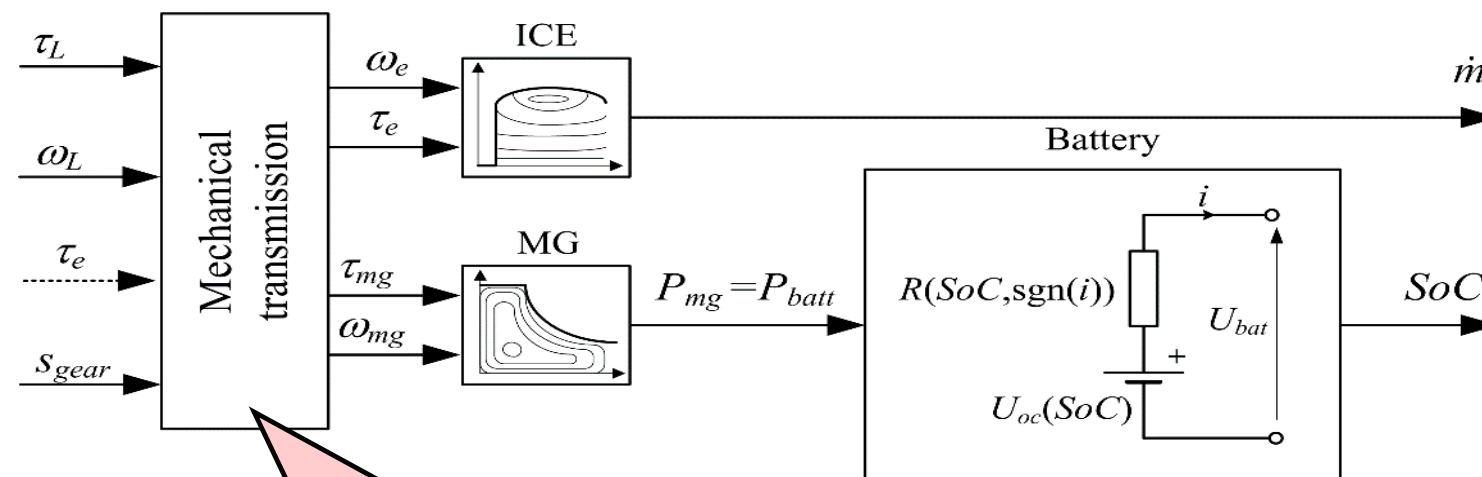
Optimiranje upravljačkih varijabli (off-line)

Kvazistatički model hibridnog pogona



Ulazni vektor

$$\mathbf{v}(t) = [\tau_R(t) \quad \omega_L(t)]^T$$



Kinematičke
jednadžbe

Izlazni vektor:

$$\mathbf{y}(t) = [m_f \quad SoC(t)]^T$$

“Off-line” optimizacija
Optimalni vektor upravljanja:

$$\mathbf{u}(t) = [\tau_e(t) \quad s_{gear}(t)]^T$$

Varijabela
stanja

Uzdužna dinamika:

Landing site



Felling site

$$\omega_L = \frac{v}{r}$$

$$\tau_L = r\{F_L + (m_L + m_S)\dot{v}\} =$$

$$= r\{g\{[m_L(1 - k)\mu_p + (m_S + km_L)f]\cos(\alpha) + [m_L + m_S]\sin(\alpha)\} + (m_L + m_S)\dot{v}\},$$

Optimizacijski problem

- Cilj optimizacije je pronaći upravljački vektor $\mathbf{u}(t) = [\tau_e(t) s_{gear}(t)]^T$, $0 \leq t \leq t_f$ koji minimizira potrošnju goriva (ciljnu funkciju):

$$\min m_f = \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_f(\mathbf{u}(t)) dt$$

$$\mathbf{u}(t) = [\tau_e(t) s_{gear}(t)]^T$$

ω_e ovisi o stupnju prijenosa i brzini vozila:

$$\min m_f = \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_f(\tau_e, \omega_e) dt$$

- Fizička ograničenja se moraju poštivati:

Maksimalni momenti i brzine strojeva:

$$\tau_{e,\min} \leq \tau_e \leq \tau_{e,\max}$$

$$\omega_{e,\min} \leq \omega_e \leq \omega_{e,\max}$$

$$\tau_{mg,\min} \leq \tau_{mg} \leq \tau_{mg,\max}$$

$$\omega_{mg,\min} \leq \omega_{mg} \leq \omega_{mg,\max}$$

Gornja i donja granica SoC

$$SoC_{\min} \leq SoC \leq SoC_{\max}$$

Održivost napunjenosti baterije

$$SoC(t_f) = 0.59$$

Početni SoC

$$SoC(0) = 0.59$$

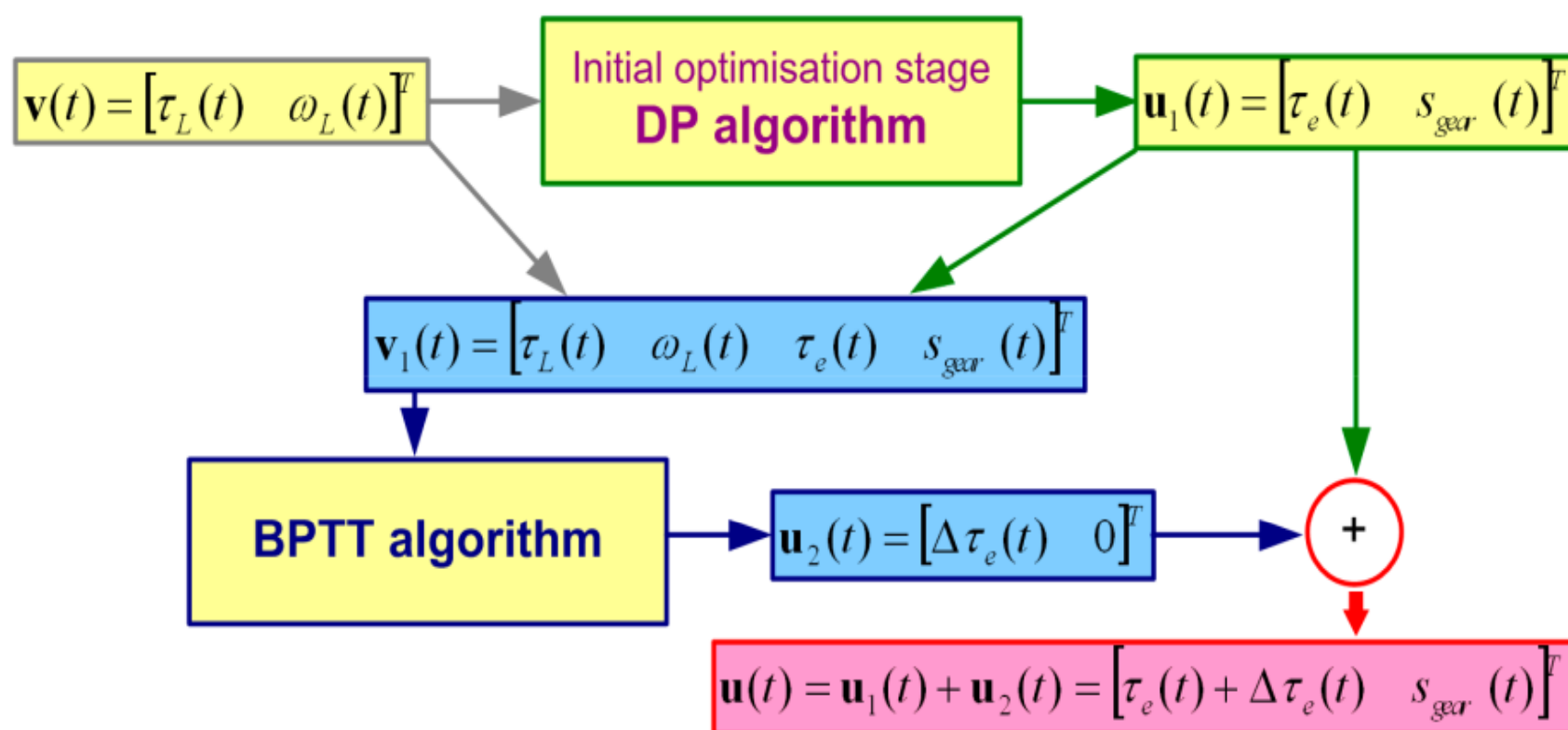
Optimizacijski algoritmi:

- Dinamičko programiranje (DP) [Bellman] je metoda za rješavanje složenih optimizacijskih problema raščlanjivanjem na jednostavnije dijelove (podprobleme).
- **DP osigurava globalni optimum !**
- Sve varijable (stanje, upravljanje i vrijeme) treba diskretizirati.
- Povećana rezolucija diskretizacije povećat će točnost algoritma, ali i vrijeme računanja.
- **Ograničeno na sustave niskog reda!**

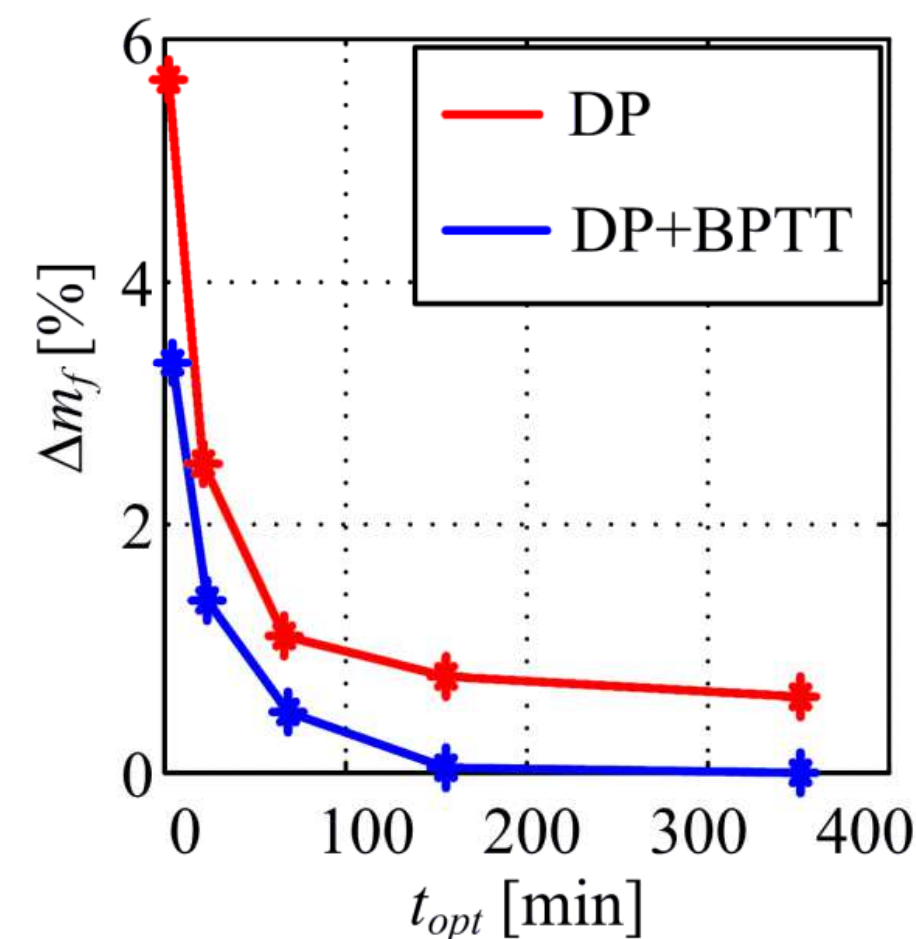
- BPTT je gradijentni algoritam [Kasać]
- Kod BPTT-algoritma upravljačke varijable su diskretizirane samo u vremenu, što značajno poboljšava točnost rezultata optimizacije u usporedbi s DP pristupom.
- Algoritam se može nositi s optimizacijom sustava većeg reda!
- **BPTT kao optimizacijski algoritam temeljen na gradijentu, ne može jamčiti pronalaženje globalnog optimuma.**
- **BPTT algoritam ima numeričkih problema s cjelobrojnim varijablama i logičkim stanjima.**

Kaskadna optimizacija:

- Glavne značajke DP i BPTT algoritama prilično su komplementarne, tako da mogu imati koristi jedan od drugog (npr. DP optimalno rješenje niske razlučivosti može se “poboljšati” pomoću BPTT algoritma kako bi se dobilo preciznije i općenito točnije rezultate.)



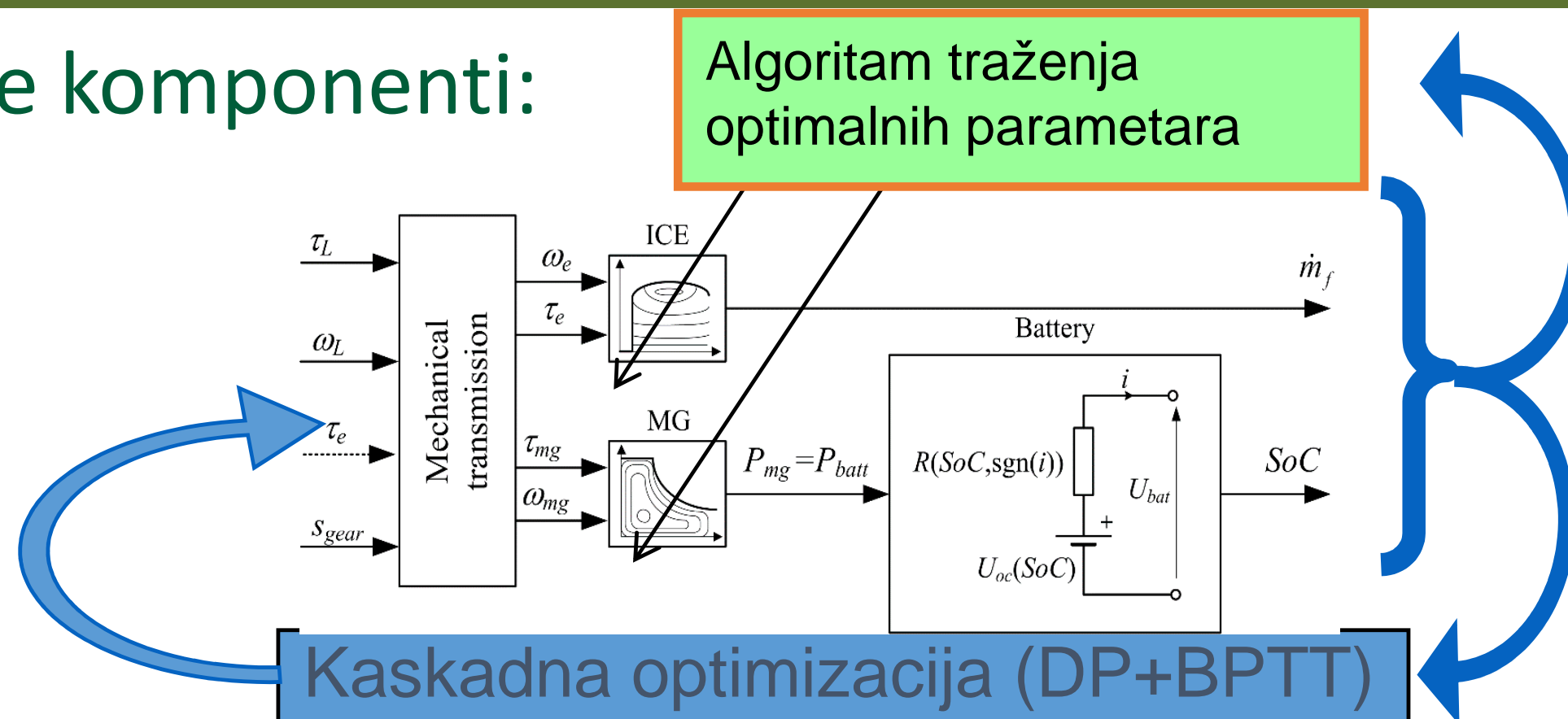
Functional diagram of cascade optimization approach.



*Cipek, Mihael; Kasać, Josip; Pavković, Danijel; Zorc, Davor: A novel cascade approach to control variables optimisation for advanced series-parallel hybrid electric vehicle power-train. Applied energy, 276 (2020), 115488, 12

Optimalno dimenzioniranje komponenti:

- Dimenzija baterije određena potrošnjom vitla stoga se ne razmatra.
- Promjenjive dimenzije motora s unutarnjim izgaranjem i elektromotora



m_f [g]		s_{mg}					
		0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
s_e	0.7	2380	2379	2340	2301	2210	2199
	0.8	2353	2348	2343	2335	2331	2322
	0.9	2305	2313	2312	2312	2309	2308
	1.0	2309	2299	2298	2295	2292	2291
	1.1	2303	2301	2297	2297	2294	2293

Zaključak

- Izrađeni su skalabilni računalni kvazi-statički modeli pogona hibridnih skidera serijske i paralelne strukture.
- Analizirana je optimalna potrošnja goriva pojedine strukture pomoću novog algoritma kaskadne optimizacije.
- Odabrana je paralelna hibridna konfiguracija P2 koja ne zahtijeva velike promjene u postojećem pogonu vozila, a ujedno je i najefikasnija.
- Skalabilnost komponenti je temeljena na tehnici Willansove linije.
- Optimalno dimenzioniranje komponenti se izvodi kombinacijom novog algoritma kaskadne optimizacije za optimizaciju upravljačkih varijable i algoritma pretraživanja parametara dimenzija.
- Istraživanje pokazuje kako različite veličine motora i električnog stroja mogu utjecati na potrošnju goriva.
- Daljnji rad bio bi usmjeren na korištenje sofisticiranijih metoda pretraživanja za pronalaženje optimalnih parametara veličine.

Radovi i publikacije povezane s izlaganjem:

Karlušić, Juraj; Cipek, Mihael; Pavković, Danijel; Šitum, Željko; BeniĆ, Juraj: Efficiency comparison of different powertrain structures intended for a hybrid skidder by utilizing a novel cascade optimization algorithm // e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 2 (2022), 100079, 11 doi:10.1016/j.prime.2022.100079

Karlušić, Juraj; Cipek, Mihael; Pavković, Danijel; Šitum, Željko; BeniĆ, Juraj; Šušnjar, Marijan: Benefit Assessment of Skidder Power-train Hybridization utilizing a novel Cascade Optimization Algorithm // Sustainability, 12 (2020), 24; 10396, 15 doi:10.3390/su122410396

Cipek, Mihael; Karlušić, Juraj; Pavković, Danijel; BeniĆ, Juraj; Šitum, Željko: Optimized Heavy-Duty Hybrid Powertrain Intended for a Future Articulated Forestry Tractor // Proceedings of the 17th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES 2022) – samo izlaganje / sažetak

Karlušić, Juraj; Cipek, Mihael; BeniĆ, Juraj; Pavković, Danijel; Šitum, Željko; Šušnjar, Marijan: Comparison of Different Powertrain Structures Intended for a Hybrid Skidder // Proceedings of the 16th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES 2021)

Hvala na pažnji!



mihael.cipek@fsb.hr