

# Električni cestovni sustavi

---

**Vujčić, Matea**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:017981>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-29**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

MATEA VUJČIĆ

# **ELEKTRIČNI CESTOVNI SUSTAVI**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

# ELEKTRIČNI CESTOVNI SUSTAVI

ZAVRŠNI RAD

**Student:** Matea Vujčić

**Mentor:** Tamara Džambas

Zagreb, rujan 2023.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

OBRAZAC 2

## TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: **Mateja Vujčić**

JMBAG: **0036524120**

Završni ispit iz predmeta: **Ceste**

Naslov teme završnog ispita:	HR	<b>Električni cestovni sustavi</b>
	ENG	<b>Electric road systems</b>


Opis teme završnog ispita:

Predmet rada su električni cestovni sustavi koji omogućuju punjenje električnih vozila prilikom vožnje po cestama koje su opremljene s takvim inovativnim tehnologijama. U radu je potrebno opisati osnovne tipove takvih sustava koji se međusobno razlikuju s obzirom na način napajanja vozila električnom energijom: konduktivni prijenos energije s kontaktne mreže (nadzemni), konduktivni prijenos energije s ceste te induktivni prijenos energije s ceste. Iste je potrebno usporediti te navesti njihove osnovne prednosti i nedostatke s različitih aspekata kao što su: tehnička izvedivost, utjecaj na postojeću infrastrukturu, troškovi ugradnje, održavanja i eksploatacije, sigurnost prometa, utjecaj na okoliš, opskrba električnom energijom i sl. Pri tome je potrebno je opisati i aktualne pilot projekte iz navedenog područja, koji se odvijaju u suradnji s proizvođačima automobila, istraživačkim institutima, vladama i energetske tvrtkama diljem svijeta.

Datum: **17.04.2023.**

Komentor:   
(Ime i prezime komentora)

Mentor: **Tamara Džambas**  
(Ime i prezime mentora)

  
(Potpis mentora)

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Općenito o ECS-ima.....	3
2.1. Definicija i podjela .....	3
2.2. Prednosti i nedostaci.....	4
2.3. Nastanak i razvoj.....	5
2.4. Stupanj tehnološke spremnosti.....	6
3. Vrste ECS-ova.....	8
3.1. Induktivni sustav .....	8
3.1.1. Općenito .....	8
3.1.2. Prednosti i nedostaci.....	9
3.2. Konduktivni sustav s kontaktnom mrežom .....	10
3.2.1. Općenito .....	10
3.2.2. Prednosti i nedostaci.....	12
3.3. Konduktivni sustav s prijenosom struje direktno s ceste.....	12
3.3.1. Općenito .....	12
3.3.2. Prednosti i nedostaci.....	14
4. Usporedba različitih ECS-ova.....	15
4.1. Tehnički aspekti .....	15
4.1.1. Tehnička izvedivost.....	15
4.1.2. Utjecaj na postojeću infrastrukturu .....	16
4.1.3. Utrošak električne energije.....	16
4.1.4. Širina primjene .....	18
4.2. Eksploatacijski aspekti .....	18
4.2.1. Održavanje.....	18
4.2.2. Trajnost.....	19
4.3. Financijski aspekti.....	20
4.4. Sigurnost.....	22
4.5. Utjecaj na okoliš.....	23
5. Aktualni pilot projekti .....	24
5.1. OLEV .....	24
5.2. eHighway.....	26
5.3. Elways .....	28
6. Zaključak .....	30
Literatura .....	31

## Sažetak

Električni cestovni sustavi (ECS) su ceste koje omogućuju dinamičko napajanje električnih vozila dok se ona voze po njima. Predstavljaju obećavajuće rješenje za problem smanjenja emisija stakleničkih plinova. U zadnjih dvadesetak godina pokrenuta su 24 pilot projekta, među kojima su se definirale tri glavne vrste električnih cestovnih sustava: induktivni, konduktivni prijenos energije s kontaktne mreže i konduktivni prijenos direktno s ceste. Induktivni je beskontaktni i oslanja se na inducirani magnetizam, dok se konduktivni sustavi napajaju zahvaljujući kontaktu između kabla i pantografa te tračnice i mehaničke ruke.

Na temelju detaljne usporedbe različitih vrsta ECS-a, može se zaključiti da su induktivni sustavi trenutno najpopularniji, s obzirom na uštedu koja se odnosi na količini materijala za njihovu ugradnju te činjenicu da su najmanje skloni oštećenjima. Konduktivni sustavi s kontaktnom mrežom generiraju struju najveće snage te osiguravaju najbolju interoperabilnost i najmanje smetnji u prometu tijekom i nakon ugradnje. Konduktivni sustavi s napajanjem direktno s ceste najjeftiniji su te prihvaćaju najviše različitih tipova vozila, no zahtijevaju povremeno čišćenje tračnice ugrađene u kolnik, koja služi za napajanje istih. Druge vrste ECS-a praktički ne zahtijevaju održavanje, osim onog redovnog. Za sve se vrste očekuje sličan uporabni vijek. Bitan aspekt je i jednostavnost ugradnje, odnosno nadogradnje postojeće ceste – sustav s kontaktnom mrežom u ovom je pogledu najbolji jer ne zadire u asfalt.

Od postojećih pilot projekata, najrazvijenija tri su različitih vrsta. OLEV je induktivni sustav u Južnoj Koreji koji pokriva nekolicinu ruta autobusa javnog prometa i predstavlja rješenje u gradskoj sredini. eHighway konduktivni sustav s kontaktnom mrežom namijenjen je za teretna vozila, dok je Elways s prijenosom energije direktno s ceste kompatibilan sa svim vozilima. Sva tri pilot projekta već su temeljito testirana, sada im slijedi optimizacija, povećanje interoperabilnosti s drugim vrstama prometa te široka, javna implementacija.

*Ključne riječi: električni cestovni sustav; održivi razvoj; induktivno napajanje; konduktivno napajanje; stupanj tehnološke spremnosti*

## **Abstract**

Electric road systems are roads that enable dynamic charging of electric vehicles while they drive on them. They are a promising solution to the problem concerning greenhouse gas emissions. In the last two decades, 24 case studies have been developed, among which three different types of electric road systems were defined – inductive charging, conductive charging via catenary, and conductive charging via in-road rail. Inductive charging is contactless and relies on induced magnetism, while conductive systems are powered thanks to mechanical contact between cables and a pantograph or a rail and a mechanical arm, respectively.

A thorough comparison of the different types of systems has led to the conclusion that the inductive ones are more popular, less prone to damage and have better visibility than their counterparts. Conductive systems with a catenary generate the most power, are most interoperable, and impact traffic the least, during and after installation. Conductive systems with an in-road rail are the cheapest and are suitable to power most different types of vehicles. All types are estimated to have a similar lifetime. They require no maintenance, except for the conductive in-road rail system whose rails require infrequent cleaning. Another important aspect is the ease of installation or enhancement of an existing road – the conductive catenary system wins here because it does not disturb the asphalt.

Of all the existing case studies the three most developed are all different types. OLEV is an inductive system developed in South Korea. It covers multiple public transport bus routes and offers a solution for the urban environment. eHighway is a conductive system with a catenary and is intended for heavy duty vehicles, and Elways is a conductive in-road rail system compatible with all different types of vehicles. All three case studies have already been tested and proven. Optimization, increasing interoperability, and wide, public implementation are to follow.

*Keywords: electric road system; sustainable development; inductive charging; conductive charging; technology readiness level*

## 1. Uvod

Kroz povijest, ljudi su kroz tehnološka postignuća, u cilju povećanja životnog standarda, zanemarili utjecaj dotičnih na okoliš. Problem očuvanja okoliša javio se relativno nedavno, tek u 20. stoljeću, kada je došlo do velikih otkrića u svim područjima života, znanosti i tehnologije, uključujući ekologiju. Udovčić je u djelu "Neodrživost održivog razvoja" vrlo lijepo opisao situaciju: „... visoka razina kulturnog, znanstvenog i tehnološkog razvitka mora poslužiti kao temelj za razuman i skladan odnos između čovjeka i okoliša. ... Valja očekivati da će današnji sukob između tehnološkog razvitka i očuvanja okoliša biti pokretačka snaga koja će korigirati postojeće tehnologije i koja će uvesti nove tehnologije koje će manje onečišćavati okoliš.“ [1]

U drugoj polovici 20. stoljeća postupno se razvijaju pojam i koncept održivog razvoja. On nema fiksnu definiciju, no dvije najšire prihvaćene su sljedeće: „trajno gospodarenje prirodnim bogatstvom“ te „razvitak koji zadovoljava potrebe i aspiracije sadašnjosti bez ugrožavanja mogućnosti i potreba budućih generacija“. [1] Ovaj koncept potaknuo je mnoge svjetske, europske i državne odredbe i direktive. Pariški sporazum i direktive EU koje limitiraju emisije ugljikovog dioksida, te Europski zeleni dogovor koji limitira emisije stakleničkih plinova samo su neki od značajnih dokumenata glede očuvanja okoliša, specifično emisija štetnih plinova u atmosferu. [2, 3]

Prometni sektor odgovara za 11.9% svih svjetskih stakleničkih plinova, a u Europi za čak 23%. [2, 3] Najveći problem predstavljaju osobni automobili zbog svoje brojnosti. Motori na unutarnje izgaranje stvaraju velike količine stakleničkih plinova. U tablici 1.1 vidljive su prosječne specifične emisije iz automobilskih motora po jedinici energije u gorivu. Ugljikov monoksid (CO), dušični oksidi (NO<sub>x</sub>) i ugljikovodici (C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>) predstavljaju značajan problem. [1]

**Tablica 1.1:** Prosječne specifične emisije iz automobilskih motora po jedinici energije u gorivu. [1]

Vrsta motora	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	Pepeo i čađa
	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]
benzinski	26	57	10 000	22	1 000	600	40
dizelski	25	74	500	180	1 100	240	400

Električni automobili već su napravili primjetnu razliku, no postavlja se pitanje: može li bolje? Teretna cestovna vozila odgovaraju za 27% zagađenja od prometnog sektora, dok predstavljaju samo 2% svih vozila na cestama. [4] Električna teretna vozila koja se statički napajaju, iako postoje, ne koriste se u praksi jer su vrlo skupa, tehnički teško izvediva, komplicirane tehnologije proizvodnje i, jednostavno rečeno, neisplativa.





Električni cestovni sustavi javili su se kao, među ostalim, moguće rješenje problema cestovnog prijevoza tereta. Oni omogućuju dinamičko napajanje vozila. U usporedbi s drugim tehnologijama kojima je cilj rješavanje istog problema, ECS-i eliminiraju potrebu za velikim baterijama, oslanjaju se na postojeću i čvrsto utemeljenu energetska infrastrukturu te imaju potencijal da održe fleksibilnost teretnog sektora. [5]

Može se reći da su ECS-i dosad najbolji odgovor prometnog sektora na pitanje održivog razvoja.

Zadatak ovog rada je predstaviti različite vrste električnih cestovnih sustava te ih međusobno usporediti. Zadatak je postignut definiranjem i karakteriziranjem svake vrste sustava u poglavlju 3, detaljnim predstavljanjem pilot projekta za svaku od vrsta u poglavlju 5 te njihovom usporedbom na temelju raznih relevantnih aspekata u poglavlju 4.

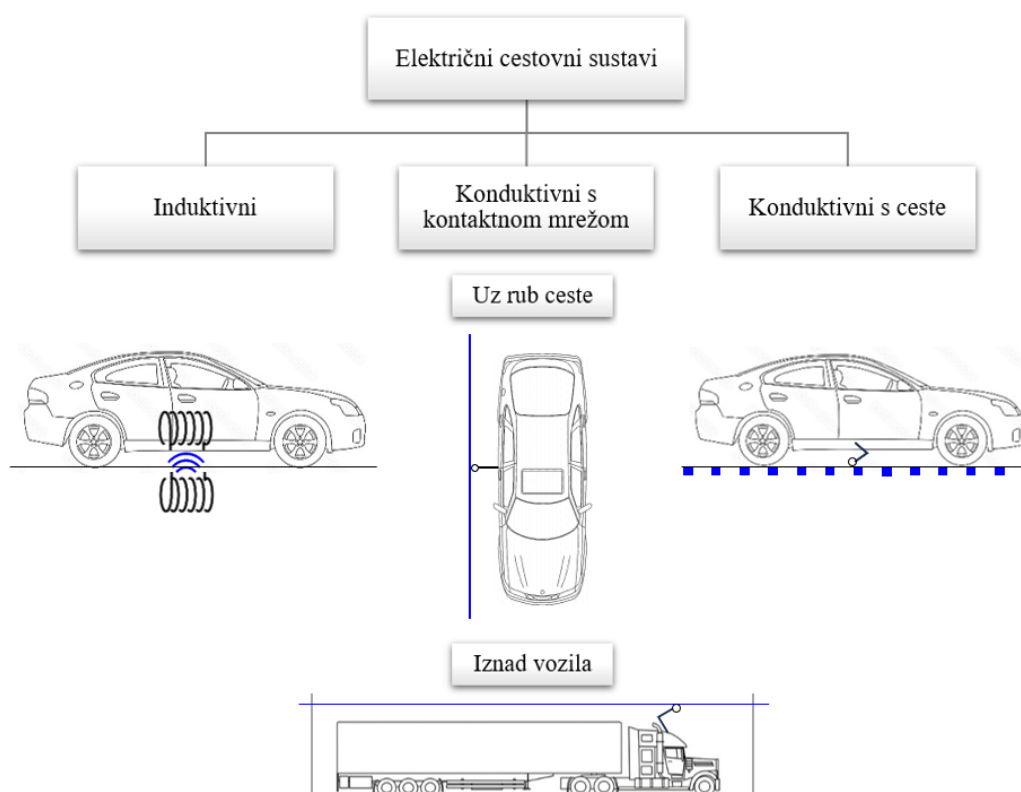
Rad se velikom većinom temelji na podacima iz specijalnog projekta Svjetskog cestovnog udruženja (engl. *World Road Association, PIARC*) pod nazivom „Električni cestovni sustavi: Rješenje za budućnost?“ (engl. *Electric Road Systems: A Solution for the Future?*). Ovo je daleko najopsežnija literatura na temu ECS-a. Ostali su izvori na dotičnu temu većinom članci u časopisima, u zbornicima konferencija i na vjerodostojnim web stranicama pomoću kojih su u rad dodane detaljnije informacije.

Za definiranje i objašnjavanje određenih pojmova iz građevinske struke, konkretnije prometnog sektora, korišteni su materijali iz relevantnih predmeta na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

## 2. Općenito o ECS-ima

### 2.1. Definicija i podjela

Električni cestovni sustavi su takvi cestovni sustavi koji omogućuju punjenje električnih vozila prilikom vožnje, odnosno omogućuju dinamičko napajanje na cestama koje su opremljene s određenim tehnologijama. Oni su relativno nov koncept koji se razvija u posljednjih dvadesetak godina, no već postoji općeprihvaćena podjela takvih sustava na tri različite vrste, ovisno o načinu napajanja vozila električnom energijom: konduktivni prijenos energije s kontaktne mreže, konduktivni prijenos energije direktno s ceste te induktivni prijenos energije. [6] Ilustracija ove podjele može se vidjeti na slici 2.1.



Slika 2.1: Prikaz podjele ECS-a po načinu napajanja vozila (ilustracija napravljena na temelju [6]).

Bez obzira na tehnologiju napajanja određenog ECS-a, svi daju isti rezultat, a to je mogućnost kontinuiranog i automatskog punjenja električnih vozila dok se ona kreću po prometnici propisanom ili manjom brzinom. Kod svake od tri glavne vrste sustava, energija se može prenijeti u bateriju vozila ili direktno u pogonski sustav. Ako struja ide direktno u pogon, vozilo nema mogućnost "skladištenja" energije za korištenje kasnije, odnosno za vožnju izvan električnog cestovnog sustava. [6]

Električni cestovni sustavi zamišljeni su kao dopuna, odnosno obogaćenje postojećih stacionarnih sustava za punjenje električnih vozila, a ne kao njihova zamjena. Iz ovog razloga, iako je u teoriji moguće koristiti ECS-e dok je vozilo u stanju mirovanja, ta mogućnost neće biti razmatrana u ovome radu.

## 2.2. Prednosti i nedostaci

ECS-i imaju mnogo prednosti u odnosu na klasične prometnice. U nastavku su navedeni razlozi zašto je ova tehnologija u tolikom zamahu u posljednjem desetljeću i zašto je ona toliko primamljivo rješenje:

- smanjenje emisije ugljičnog dioksida i drugih štetnih stakleničkih plinova,
- rast popularnosti i smanjenje cijena proizvodnje električnih vozila,
- statičkih sustava za napajanje električnih vozila je premalo i nepraktični su,
- napajanje na statičkim sustavima traje relativno dugo,
- baterije standardnih električnih vozila kratkog su doseg (u kontekstu duljine ostvarenog puta do idućeg potrebnog punjenja),
- nema potrebe za velikim i skupim baterijama u električnim vozilima (povećavaju im se dimenzije i cijena zbog pokušaja ostvarenja što većeg doseg – pri dinamičkom punjenju putem ECS-a doseg baterije nije relevantan pošto se vozilo kontinuirano napaja),
- mogućnost napajanja velikih teretnih vozila,
- nestabilnost i nepredvidljivost tržišta goriva (benzin, dizel, plin),
- vozila s pogonom na unutarnje izgaranje u odnosu na električna su neisplativa i male energetske efikasnosti (u tonama po prijeđenom kilometru),
- lokalna kvaliteta zraka, a time i vode, tla i živog svijeta znatno povećana,
- smanjena lokalna zagađenja,
- smanjena buka od prometa u odnosu na vozila s pogonom na gorivo,
- povećana kvaliteta života ljudi koji žive i rade u blizini prometnice,
- povećana udobnost vožnje,
- smanjeni dugoročni troškovi,
- visoka razina automatizacije sustava,
- potencijal za nastanak novih radnih mjesta,
- konstantan razvoj, komercijalizacija i smanjenje cijena obnovljivih izvora energije te
- poticanje ideja održivog razvoja u generalnoj javnosti. [6]

Navedene su karakteristike generalne prednosti koje vrijede za bilo koju vrstu i tehnologiju ECS-a. Specifične prednosti različitih vrsta sustava obrađene su u poglavlju 3.

Svako rješenje, koliko god dobro bilo, sadrži i određene nedostatke. Mane električnih cestovnih sustava nisu mnoge, no potrebno ih je navesti:

- velike početne investicije,
- nova, ne pretjerano široko istražena tehnologija,
- relativno mala interoperabilnost različitih vrsta ECS-a,
- manjak realnih, praktičnih implementacija,

- potreba za nabavom novih vozila koja mogu biti punjena putem ECS-a,
- kompleksnost tehnologije i potreba za znatno većom kompetencijom izvođača,
- vrlo veliki utrošak struje, odnosno energije te
- nesigurnost prema novim tehnologijama od strane javnosti i vladajućih tijela. [6]

Navedene su karakteristike generalni nedostaci svih ECS-a, neovisno o vrsti. Specifične mane različitih vrsta sustava obrađene su u poglavlju 3.

### 2.3. Nastanak i razvoj

Prva ideja o dinamičkom napajanju cestovnih vozila rodila se davne 1882. godine u Berlinu, kada je Werner Von Siemens spojio autobus na kontaktnu mrežu inspiriranu željeznicom i time stvorio električni trolejbus. Desetljeće kasnije, 1894. godine, Maurice Hutin i Maurice Leblanc patentiraju sakupljač struje koji ima mogućnost beskontaktnog napajanja električnog vozila. Nakon ova dva izuma, dolazi do vrlo dugog zatišja u razvitku tehnologije ECS-a. [6]

Krajem devedesetih godina prošlog stoljeća, zahvaljujući mnogim napretcima u znanosti, tehnologiji i ekologiji, dolazi do novog rađanja ideje dinamičkog napajanja vozila. Prvi stvarno implementirani sustav bio je induktivni Conductix-Wampfler postavljen 1998. u gradu Rotorua u Novom Zelandu. Do 2002. godine sustav se proširio na još dva grada u Italiji. Šest godina kasnije sustav PRIMOVE razvija se i testira u Bautzenu u Njemačkoj. [6]

2009. godine u Švedskoj rađa se prvi moderni induktivni ECS, Elways. Ovo je sustav s napajanjem direktno s ceste. Prvi moderni sustav s kontaktnom mrežom je eHighway iz 2010. godine, izgrađen u Berlinu. Kroz idućih nekoliko godina tehnologija ECS-a, bilo induktivnih, bilo kontaktnih, širi se te nastaju novi projekti i sustavi diljem svijeta - Opbrid Busbaar u Španjolskoj, PRIMOVE u Belgiji, WAVE, ORNL i Witricity u SAD-u, Magneto DC u Kanadi, OLEV u Južnoj Koreji, WPS Nissan u Japanu, Politecnico di Torino u Italiji, Heliox u Nizozemskoj, Quick-POINT u Poljskoj, IPT Technologies u Ujedinjenom Kraljevstvu, Furrer+Frey u Švicarskoj te Qualcomm HALO u Italiji. Ovo su neki od ukupno 24 pilot projekta koji postoje danas te u na vrlo različitim razinama tehnološke spremnosti (više u podnaslovu 1.3). Neki su tek u fazi konceptualizacije, dok su neki već spremni za javnu uporabu. [6]

Od 24 projekta njih je 16 fizički izvedeno. Čak ih je 11 induktivnih, tri su induktivna s napajanjem direktno s ceste, a samo dva su kontaktna s kontaktnom mrežom. Analiza razloga zbog kojih su izvedena samo dva ECS-a s kontaktnom mrežom, iako je to vrlo uhodana tehnologija zahvaljujući velikoj sličnosti sa željeznicama, zanimljiva je, no nije tema ovoga rada.

Nakon 2016. godine može se vidjeti prekretnica u razvoju ECS-a. Do tada je dosta sustava već bilo dobro definirano i testirano u kontroliranim uvjetima, pa proizvođači počinju težiti optimizaciji svojih sustava. Pokušavaju se smanjiti količine skupih materijala u dijelovima ECS-a, omogućiti

interoperabilnost i javno korištenje, produžuju se postojeće dionice ECS-a, dodaje se više vozila na postojeće dionice, grade se komponente koje mogu učiniti vozila na unutarnje izgaranje kompatibilnima s ECS-om, provjerava se očekivani uporabni vijek, slažu se planovi održavanja, slažu se poslovni modeli s vladinim tijelima i drugim interesnim sudionicima itd.

Na slici 2.2 prikazana je karta svijeta na kojoj su označene sve zemlje koje nekim dijelom sudjelovale u određenom ECS projektu. U nekim slučajevima, na primjer kod Portugala, provela se samo računalna studija, dok je u Švedskoj već implementirano tisuće kilometara ECS sustava. Na kartu su također ucrtane firme koje provode dotične projekte. Žute pravokutne oznake na slici predstavljaju interaktivne bilješke i linkove na web stranice. Link na interaktivnu kartu nalazi se [ovdje](#). [6]



*Slika 2.2: Karta svijeta s označenim svim zemljama i glavnim firmama sudionicima u projektima električnih cestovnih sustava. [6]*

## 2.4. Stupanj tehnološke spremnosti

Stupanj tehnološke spremnosti je pojam koji se u nekoliko navrata pojavljuje u ovom radu i bitan je za zorni prikaz i usporedbu različitih sustava. Stupnjevi tehnološke spremnosti (engl. *Technology Readiness Level*, TRL) predstavljaju mjerni sustav koji kvantificira razinu razvoja i istraženosti određene kompleksne tehnologije za vrijeme njenog razvitka. Mjerni je sustav razvila NASA 70-ih godina prošlog stoljeća u svrhu svojih tada cvjetajućih projekata. Danas se TRL sustav koristi ne samo u NASA-i, već i u mnogim drugim projektno orijentiranim profesijama. [7] Projektne usmjerene djelatnosti su one djelatnosti u kojima se poslovanje odvija putem projekata. [8]

NASA-ina originalna skala i opisi različitih stupnjeva vidljivi su u tablici 2.2. U različitim djelatnostima u kojima je TRL sustav našao primjenu prilagodili su opise svome području. Tablica 2.2 prikazuje prilagodbu ovog sustava na područje električnih cestovnih sustava te prilagođene vrijednosti TRL-a.

**Tablica 2.2:** Vrijednosti i pripadni opisi TRL-a u NASA-inom originalu te vrijednosti i pripadne definicije TRL-a prilagođeni ECS-ima. [6, 7]

NASA		Prilagodba na ECS-e	
TRL	Opis	Opis	TRL
1	Osnovna načela promatrana i primijećena.	Promatranje osnovnih načela, formuliranje tehnoloških koncepata i namjene.	1-2
2	Formulirani tehnološki koncept i namjena.		
3	Analitička i eksperimentalna kritična funkcija i/ili karakteristični dokaz koncepta.	Eksperimentalne kritične funkcije, dokaz koncepta, laboratorijska validacija.	3-4
4	Validacija komponente i/ili makete u laboratorijskom okruženju.		
5	Validacija komponente i/ili makete u relevantnom okruženju.	Validacija tehnologije izložene uvjetima okoline, demonstracija prototipa sustava/podsustava.	5-6
6	Model sustava/podsustava ili demonstracija prototipa u relevantnom okruženju.		
7	Prototip sustava demonstriran u operativnom okruženju.	Demonstracija prototipa, demonstracija cijelog funkcionalnog sustava.	7-8
8	Stvarni sustav dovršen i "osposobljen za let" kroz testiranje i demonstraciju.		
9	Stvarni sustav "dokazan u letu" kroz uspješne misije.	Cijeli sistem testiran i uspješan kroz operacije nad njim.	9

Više o postojećim ECS-ima i njihovim pripadnim stupnjevima tehnološke spremnosti u poglavljima 4 i 5.

### 3. Vrste ECS-ova

U ovom su poglavlju predstavljene glavne tri grupe električnih cestovnih sustava navedenih u prethodnom poglavlju. Ostali mogući, no rjeđe primjenjivani i manje istraživani sustavi su: otvorena petlja, zatvorena petlja, sustav snažno spregnute magnetne rezonancije (engl. *Strongly Coupled Magnetic Resonance*, SCMR) i induktivni prijenos s vozila na vozilo. [3]

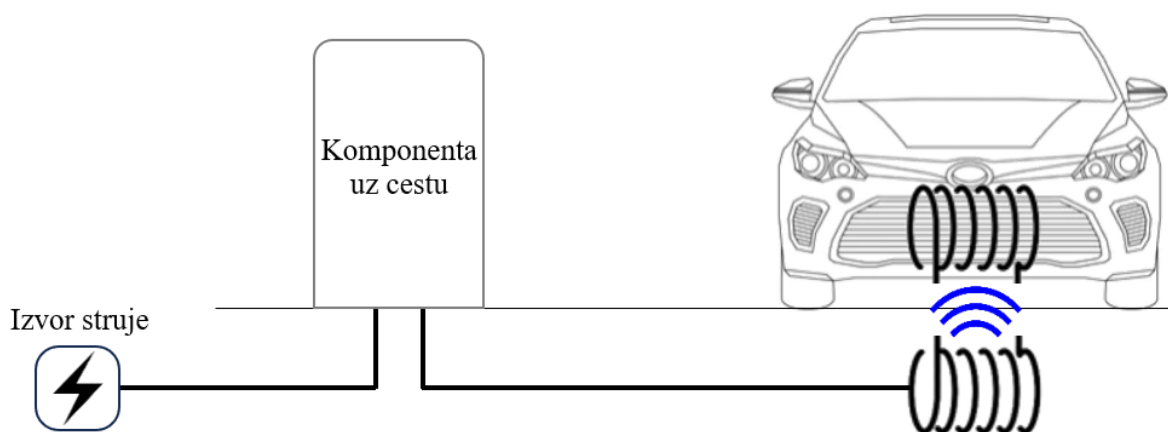
Dotični sustavi nisu predmet ovoga rada, no navedeni su u svrhu prikazivanja sveukupnog dosega tehnologije električnih cestovnih sustava.

#### 3.1. Induktivni sustav

##### 3.1.1. Općenito

Koncept dinamičkog induktivnog, odnosno bežičnog punjenja vozila predložen je još davne 1894. godine u sklopu Hutinovog i Leblancovog patenta za sakupljač struje za električna vozila bez mehaničkog kontakta između sakupljača i kontaktne mreže. Prva stvarna implementacija ovog koncepta realizirala se devedesetih godina prošlog stoljeća u Novom Zelandu u obliku statičkog punjenja električnih mini autobusa javnog prijevoza. [6]

Dinamičko induktivno punjenje bazira se na prijenosu električne energije od primarnih zavojnica unutar prometnice do sekundarnih zavojnica unutar automobila, bez ikakvog mehaničkog dodira među dotičnim elementima. Struja iz izvora (na primjer iz gradske mreže) u primarnim zavojnicama biva transformirana u izmjeničnu struju visoke frekvencije kako bi se stvorilo magnetno polje. To polje na sekundarnim zavojnicama u vozilu stvara induciranu voltažu, što uzrokuje tok električne struje po



*Slika 3.1: Shematski pojednostavljeni prikaz principa rada ECS-a s induktivnim prijenosom energije (ilustracija napravljena na temelju [6]).*

Sastavni dijelovi sustava ovog načina napajanja mogu se podijeliti u tri kategorije: dijelovi unutar ceste, dijelovi na vozilu te dijelovi uz cestu. Specifični dijelovi i njihove namjene navedene su u tablici 3.1. Općenito, komponente su vrlo slične onima za statičko punjenje električnih vozila.

**Tablica 3.1:** Prikaz sastavnih dijelova ECS-a s induktivnim prijenosom energije. [6]

Kategorija	Dio	Namjena	Napomena
Unutar ceste	Primarne zavojnice	Induciranje magnetnog polja.	Najčešće od bakra s feritnom jezgrom.
	Strujni kablovi	Provođenje struje od komponente pored ceste do primarne zavojnice.	–
Na vozilu	Sekundarne zavojnice	Transformiranje magnetnog polja u električnu struju.	Najčešće od bakra s feritnom jezgrom.
	Upravljačka elektronika	Upravljanje vozilom i svim njegovim funkcijama.	–
	Baterija	Sastavni dijelovi svakog električnog vozila.	–
	Električni motor		
Pored ceste	Veza s izvorom struje	Spoj sustava na izvor energije	Skupa čine komponentu pored/uz cestu.
	Pretvarači energije	Pretvaranje energije i struje u primjenjiv oblik.	
	Transformatori		
	Jedinice za hlađenje	Hlađenje dijelova.	
	Komunikacijski sustavi	Slanje informacija i podataka nadležnim organizacijama.	

Pri prolasku prikladnog električnog vozila određenom minimalnom brzinom, komponenta pored ceste dotično vozilo detektira i automatski šalje struju primarnim zavojnicama. Pri prolasku vozila preko primarnih zavojnica inducira se magnetno polje i vozilo biva napajano. [6]

### 3.1.2. Prednosti i nedostaci

Prva, vrlo očita prednost induktivnog načina punjenja električnih vozila jest to što je ono bežično, odnosno bez mehaničkog kontakta između ceste i dijela električnog vozila koji je namijenjen za primanje struje (u ovom tipu ECS-a to su sekundarne zavojnice). Pošto za bežično napajanje nisu potrebni nikakvi dodatni dijelovi vozila koji vire iz specifičnog profila ili presjeka vozila, eliminira se mogućnost oštećenja ili otkidanja dotičnih dijelova. Ovime se smanjuju eksploatacijski troškovi ne samo vozila, već i ceste te se povećava sigurnost. Ušteda je vidljiva i u pogledu količine materijala - nije potrebna izgradnja konstrukcije za prijenos struje na vozilo uz cestu ili iznad nje. Iz svih prijašnjih razloga proces ugradnje induktivnih cestovnih sustava u pravilu je jednostavniji i kraće traje.

Još jedna prednost induktivnih sustava jest mogućnost malog skretanja sa sredine traka bez prestanka napajanja. Kako bi se vozilo napajalo, ono ne treba ostati na vrlo strogoj putanji, odnosno prijemni



uređaj (sekundarne zavojnice) na vozilu ne treba biti direktno iznad odašiljača (primarne zavojnice) u cesti. Magnetno polje širi se i na veći prostor nego li je određen trakom ceste.

Također, nepostojanje dodatnih vidljivih konstrukcija uz, iznad ili na površini prometnice znači da ne može doći do vozačeve dekoncentracije i gubitka pažnje zbog vizualnog podražaja ponavljajućeg uzorka (na primjer stupovi na kontinuiranim razmacima, ravne linije koje određuju tračnicu u prometnici kod konduktivnog sustava s prijenosom struje direktno s ceste). [6]

S druge strane, jedna od mana ovog načina napajanja jest sama novina tehnologije. Značajan razvoj i istraživanja događaju se tek u zadnjem desetljeću, zbog čega ova tehnologija još nije toliko razvijena i uhodana koliko su konduktivni sustavi.

Prenamjena postojećih cesta u ovaj ECS bila bi komplicirana zbog postojanja elemenata unutar kolnika. Bilo bi potrebno iskopati dio kolnika te ga nakon ugradnje ponovno asfaltirati, što uzrokuje nepotrebne prekide na površini prometnice.

Ostale mane su potreba za instalacijom spoja na izvor struje na relativno malim razmacima te manja nazivna snaga u odnosu na konduktivne sustave. Potonja je mana velikog značaja pošto se realna implementacija ECS-a trenutno svodi na javni prijevoz te prijevoz tereta, a zbog svoje manje nazivne snage induktivni sustavi nemaju mogućnost napajanja teretnih vozila. Iz ovog je razloga sustav trenutno u praksi limitiran na javni prijevoz. [6]

## **3.2. Konduktivni sustav s kontaktnom mrežom**

### **3.2.1. Općenito**

Konduktivni prijenos električne energije putem kontaktne mreže najuhodaniji je i najprimjenjiviji električni cestovni sustav, većinom zbog svoje velike sličnosti sa željeznicama. Prvi puta je primijenjen čak 1882. godine u Berlinu u obliku nadzemne kontaktne mreže na koju je trolejbus povezan s pantografom na njegovom krovu. [6]

Ovaj se način napajanja temelji na direktnom i kontinuiranom kontaktu između vozila (najčešće putem pantografa) i kontaktne mreže. Dijelovi sustava mogu se kategorizirati u dvije glavne grupacije: dijelovi na vozilu te dijelovi uz cestu. Specifični dijelovi i njihove namjene opisani su u tablici 3.2 i vidljivi su na slici 3.2. Slično kao i kod induktivnog sustava, konduktivni sustav s kontaktnom mrežom napaja vozilo koje putuje određenom minimalnom brzinom. [6]

Dvije varijante ovog sustava su s kontaktnom mrežom iznad vozila i s kontaktnom mrežom sa strane vozila, odnosno uz rub ceste, kako je prikazano na slici 2.1. Princip funkcioniranja ova dva podsustava potpuno je isti.



Slika 3.2: Konduktivni ECS s kontaktnom mrežom iznad vozila  
 (slika preuzeta i prilagođena iz [9]).

**Tablica 3.2:** Prikaz sastavnih dijelova ECS-a s konduktivnim prijenosom energije s nadzemne kontaktne mreže. [6]

Kategorija	Dio	Namjena	Napomena
Na vozilu	Produživi pantograf	Prihvatanje struje s kontaktne mreže.	Produživi kako bi se spriječio gubitak kontakta, a time i prijenos struje, radi visinskih nepravilnosti u cesti i kontaktnoj mreži.
	Upravljačka elektronika	Upravljanje vozilom i svim njegovim funkcijama.	–
	Baterija	Sastavni dijelovi svakog električnog vozila.	–
	Električni motor		–
Pored ceste	Stupovi	Oslonci za strujne kablove kontaktne mreže.	Postavljeni na kontinuiranim razmacima, prate cestu.
	Kablovi	Elementi kontaktne mreže.	–
	Rasklopna oprema	Pretvaranje izmjenične u istosmjernu struju.	Dijelovi trafostanica.
	Transformatori struje		
	Ispravljači struje		
	Pretvarači struje		
	Komunikacijski sustavi		

### 3.2.2. Prednosti i nedostaci

Glavna je prednost ovog načina napajanja to što je tehnologija stara i uhodana. Kako je sustav napravljen po uzoru na vlakove, postoji mnogo realnih i dugotrajnih implementacija. Zahvaljujući ovome, količina znanja i iskustava o ovome području vrlo je velika u odnosu na druge vrste ECS-a. Samim time su i osobe uključene u projektiranje, gradnju i održavanje ovakvih i sličnih sustava vrlo iskusne i kompetentne, što olakšava cijeli proces od planiranja pa sve do kraja uporabnog vijeka ECS-a. Sama izgradnja ovakvog sustava dodatno je olakšana time što konduktivni sustav s kontaktnom mrežom nikako ne utječe na strukturu prometnice - drugim riječima, prenamjena već postojeće ceste bila bi vrlo brza i jednostavna te bi nimalo ili minimalno zadirala u postojeće konstrukcije i strukture. [6] Time plan i program održavanja prometnice ostaje nepromijenjen, osim dodatnih postupaka vezanih uz elemente za napajanje vozila. Dosad navedeni faktori svi utječu i na financijske prednosti konduktivnih ECS-a.

Kontaktne mreže sposobne su prihvaćati i prenositi struju vrlo velikih jačina, što omogućuje napajanje teretnih vozila. Također, dosadašnji pilot projekti, implementacije i testiranja dokazuju da je uz ove sustave moguće sigurno doseći i održavati brzine vozila čak preko 100 km/h. [6]

Loša karakteristika kontaktne mreže jest njen veliki vizualni utjecaj na vozača. Ona ne samo da zauzima dobar dio vidokruga vozača, već zbog ritmičnosti ponavljanja elemenata (poput, na primjer, stupova uz cestu) može stvoriti optičke iluzije i nelagodu u očima vozača. Osim toga, stupovi mogu znatno smanjiti preglednost u krivinama ako su postavljeni uz unutarnji rub krivine. [10] Elementi ECS-a uz cestu zauzimaju i značajan fizički prostor uz prometnicu, što može dovesti do potrebe za otkupljivanjem zemljišta i pravno-legalnih postupaka. [6] Veliki broj elektrificiranih, metalnih i žičnih elemenata izloženih klimatskim prilikama također povećavaju mogućnost kvarova i frekvenciju održavanja ovakvih ECS-a.

U varijanti sustava s kontaktnom mrežom iznad vozila, zbog jačine struje i potrebne udaljenosti kontaktne mreže od tla, ovaj je sustav namijenjen samo za veća vozila, odnosno teretna vozila i autobuse. [9] Također, kontaktne mreže mogu onemogućiti siguran pristup prometnici u iznimnim situacijama (helikopter hitne službe ne može sletjeti). [6] Zbog same veličine kontaktne mreže izgradnja tunela na potrebnim dionicama prometnice bila bi otežana. Nedostaci navedeni u ovom paragrafu nisu prisutni u verziji sustava s kontaktnom mrežom sa strane vozila jer je u ovome slučaju pantograf jednake duljine za sva vozila te ne zatvara pristup prometnici odozgora.

### 3.3. Konduktivni sustav s prijenosom struje direktno s ceste

#### 3.3.1. Općenito

Princip funkcioniranja ECS-a s konduktivnim prijenosom energije direktno s ceste na vozilo vrlo je sličan onome s kontaktnom mrežom. Glavna je razlika između njih to što je kontaktne mreže „prebačena“ u samu konstrukciju ceste. Iz tog se razloga dijelovi ovog sustava dijele na jednu kategoriju

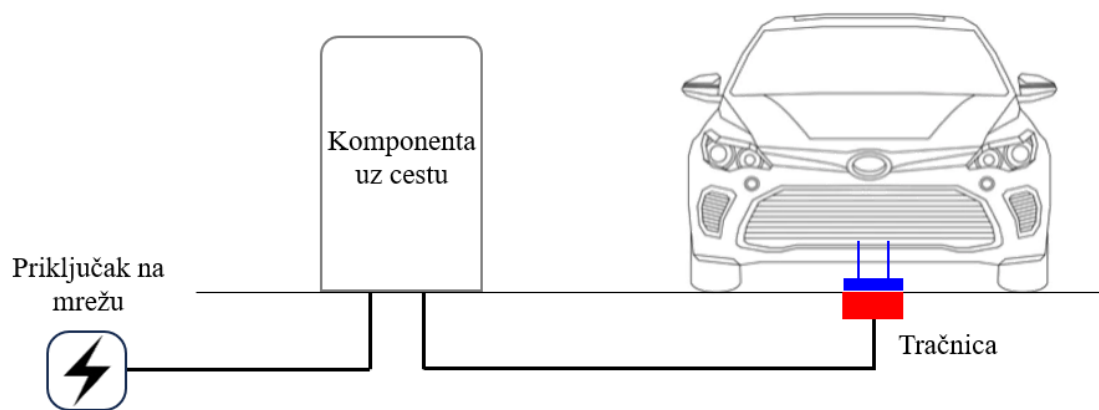
više nego sustavi s kontaktnom mrežom, a ta dodatna kategorija su dijelovi unutar ceste. [6] Prikaz, podjela i namjena dijelova prikazani su u tablici 3.3.

**Tablica 3.3:** Prikaz sastavnih dijelova ECS-a s konduktivnim prijenosom energije direktno s ceste. [6]

Kategorija	Dio	Namjena	Napomena
Unutar ceste	Tračnica	Prijenos struje na receptor na vozilu.	–
	Strujni kablovi	Provođenje struje od izvora do tračnice.	–
	Drenažni sustav	Odvodnja svih oblika vode od elektrificiranih elemenata.	–
Na vozilu	Receptor struje	Prihvatanje struje iz tračnice.	Mehanička ruka ili pantograf.
	Upravljačka elektronika	Upravljanje vozilom i svim njegovim funkcijama.	–
	Električni motor	Sastavni dijelovi svakog električnog vozila.	–
	Baterija		
Pored ceste	Transformatori	Upravljaču elektrifikacijom određenog segmenta ceste.	–
	Priključci na mrežu		
	Komunikacijski sustavi		

Pri detekciji vozila koje se kreće po cesti, komponente pored ceste elektrificiraju potrebni segment ceste. Kada se vozilo poravnalo s tračnicom, mehanička se ruka automatski produžuje od dna vozila do tračnice. Ruka i tračnica u fizičkom su dodiru. [6]

Na slici 3.3 shematski je i pojednostavljeno prikazan princip rada ove vrste ECS-a.



*Slika 3.3: Shematski pojednostavljeni prikaz principa rada ECS-a s konduktivnim prijenosom energije direktno s ceste (ilustracija napravljena na temelju podataka iz [6]).*

### 3.3.2. Prednosti i nedostaci

Prednost ECS-a s konduktivnim prijenosom struje iz tračnice u cesti je široka mogućnost primjene, točnije mogućnost napajanja ne samo osobnih, već i velikih teretnih vozila. Zahvaljujući postojanju mehaničkog kontakta pri prijenosu energije, moguće je prenijeti struju velike snage pomoću koje se mogu pokretati teža vozila.

Iako ova tehnologija nije stara, već postoje značajne baze podataka i izvori znanja, vještina i iskustava koji vrijede za konduktivne sustave s kontaktnom mrežom te se oni mogu lako primijeniti i prilagoditi ECS-u s napajanjem direktno s ceste. Zbog postojanja kompetentnih interesnih sudionika, pojednostavljen je proces planiranja, izgradnje i održavanja konstrukcije tijekom uporabnog vijeka. Održavanje je dodatno pojednostavljeno i ekonomičnije zahvaljujući činjenici da su svi elementi sustava vidljivi, odnosno u ravnini su s površinom prometnice, što ih čini lako dostupnima i promjenjivima. [6]

Ista činjenica predstavlja i nedostatak sustava. Izloženost konduktivnih elemenata konstrukcije okolišu i prometu čini sustav podložnijim oštećenjima, bilo od korištenja, korozije, kontaminacije ili nakupljanja nečistoća kroz vrijeme. Česta oštećenja vode do frekventnijih i skupljih kontrola i sanacija. Ovo također predstavlja i sigurnosni problem, ne samo zbog izloženosti elektrificiranih elemenata klimatskim prilikama, nego i zbog mogućnosti prelaska vozila kotačem preko tračnice. Kroz vrijeme neki dijelovi ECS-a mogu izviriti ili se slegnuti u površinu prometnice i oštetiti kotač vozila koje prelazi preko njega. Motociklisti predstavljaju najrizičniju skupinu. [6]

Dodatni problem proizlazi iz činjenice da je pantograf (ili mehanička ruka) na dnu vozila. Svaki predmet koji se može naći na cesti, od vrećice do kamena, u kombinaciji s brzinom kojom se samo vozilo kreće, može uzrokovati znatnu štetu na takvom pomičnom elementu. Zbog toga bi i održavanje vozila zahtijevalo češće tehničke preglede.

Isto kao i kod induktivnih sustava, prenamjena postojećih cesta u ovaj ECS bila bi komplicirana zbog postojanja elemenata koje je potrebno ugraditi u kolnik.

## 4. Usporedba različitih ECS-ova

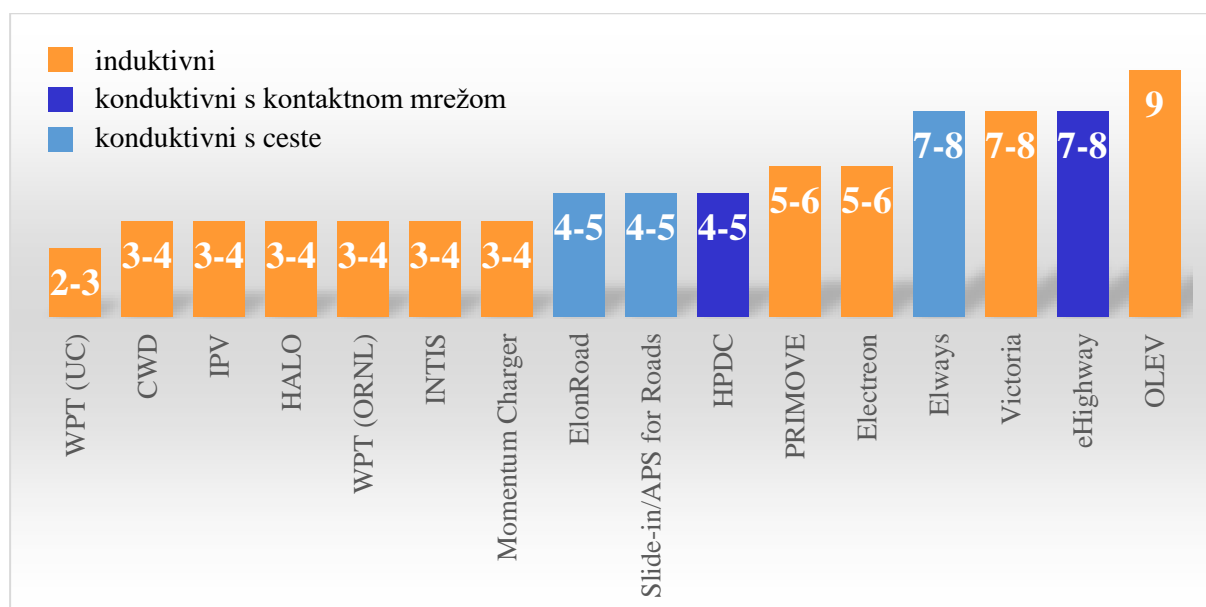
Nakon predstavljanja različitih ECS-a, oni se sada mogu međusobno usporediti na temelju raznovrsnih aspekata, od tehnološke izvedivosti do troškova pa sve do utjecaja na okoliš i sigurnosti sudionika u prometu. Kako su dva predstavljena konduktivna sustava po tehnologiji relativno slični, u analizi se najviše uspoređuju induktivni sustavi s konduktivnim sustavima općenito. Mjestimične razlike između konduktivnog sustava s kontaktnom mrežom i onoga s tračnicom u cesti također su analizirane u ovom poglavlju.

### 4.1. Tehnički aspekti

#### 4.1.1. Tehnička izvedivost

Iako trenutno na svijetu postoji samo pet organizacija koje razvijaju rješenja za konduktivne ECS-e, zbog usporedivosti tehnologije sa željeznicama, ovaj je sustav vrlo tehnološki razvijen. Zahvaljujući već iskusnim i kompetentnim interesnim sudionicima u projektima konduktivnih ECS-a, ovi su sustavi u teoriji tehnološki izvediviji od induktivnih. [6]

Gledajući pitanje tehničke izvedivosti sa strane stupnja tehničke spremnosti, zaključak je suprotan. Induktivni sustavi razvijani su od strane mnogo više organizacija, njih čak jedanaest, čime se očituje veća potražnja (iz pravnih, legalnih, organizacijskih i drugih aspekata koji nisu tema ovoga rada) za takvim sustavima u odnosu na konduktivne. Što je potražnja veća, veći su i proizvodnja i razvitak, što je dovelo do toga da neki induktivni sustavi imaju veći TRL od konduktivnih sustava. [6] Na slici 4.1 prikazana je hijerarhijska usporedba stupnjeva tehničke spremnosti svih današnjih sustava ECS-a. Od šest sustava s najvećim TRL-om, četiri su induktivna.



Slika 4.1: Hijerarhijski prikaz stupnjeva tehnološke spremnosti postojećih ECS-a (dijagram napravljen na temelju podataka iz [6]).

#### 4.1.2. Utjecaj na postojeću infrastrukturu

Utjecaj na postojeću infrastrukturu svodi se na to koliko su postojeće građevine i promet pogođeni za vrijeme i nakon izgradnje ECS-a ili nadogradnje postojeće ceste.

Promet, odnosno prometni pokazatelji nakon instalacije sustava moraju ostati isti ili biti bolji nego prije. Prometni su pokazatelji prometno opterećenje, propusna moć i razina uslužnosti, odnosno brzina vožnje, vrijeme putovanja, udobnost, prekidi itd. [11]

Promet će za vrijeme ugradnje sustava biti ograničen ili potpuno zaustavljen na određeno vrijeme ili na određene periode. Konduktivni sustav s kontaktnom mrežom ne ugrađuje se direktno u cestu, već pored nje, pa je zaustavljanje prometa kraćeg trajanja. Ugradnja konduktivnih sustava s tračnicom u cesti i induktivnih sustava podrazumijeva zadiranje u površinu kolnika. Kopaju se rovovi u kolniku u koje se ugrađuju elementi sustava, zbog čega prometnica mora biti zatvorena na duže vrijeme. [6]

Što se tiče tunela, oni predstavljaju specifičan problem za konduktivne sustave s kontaktnom mrežom. U profile nekih postojećih tunela kontaktna mreža možda neće moći stati, dok druga dva glavna sustava nemaju elemente znatnih gabarita i njihova ugradnja u tunel bi bila relativno brza i jednostavna. [6]

U kontekstu nadogradnje postojeće prometnice, trak s mogućnošću dinamičkog napajanja idealno bi se, u poprečnom smislu, nalazio uz desni rub ceste, gledano iz smjera kretanja. Konduktivni sustavi s kontaktnom mrežom trebali bi biti tamo smješteni iz ekonomičnih razloga - stupovi moraju biti uz prometnicu, a ne bi imalo smisla raditi kontaktnu mrežu koja seže preko više prometnih trakova. Što se tiče induktivnih sustava i konduktivnih direktno s ceste, opet nema smisla da kablovi koji spajaju glavni element u cesti s izvorom struje nepotrebno prolaze ispod više prometnih trakova. Ovo bi i zakompliciralo i poskupilo ugradnju.

Iz perspektive interoperabilnosti, odnosno mogućnosti da trak koriste i vozila koja nemaju mogućnost dinamičkog napajanja, sustavi s kontaktnom mrežom mogli bi predstavljati najmanje problema jer nemaju elemente u ili na površini kolnika. No, dosadašnji su izvedeni sustavi i pilot projekti većinom bili sustavi tipa zatvorene petlje, odnosno bez interakcija s drugim vrstama prometa. [6] Iz tog se razloga različite vrste ECS-a još ne mogu suvislo usporediti.

#### 4.1.3. Utrošak električne energije

Različiti sustavi zahtijevaju istosmjernu, izmjeničnu ili trofaznu struju. Također zahtijevaju različite voltaže i jakosti struje. Postojeće javne strujne mreže razlikuju se po karakteristikama struje koju provode ne samo među državama, već i unutar samih država. [10] Iz tog razloga različite tehnologije ECS-a u ovome radu neće biti uspoređivane na temelju karakteristika struje koju zahtijevaju.

Za analizu energetske isplativosti kao parametri vrednovanja koriste se generirana snaga električne struje te efikasnost sustava, odnosno koliki postotak energije uzete iz izvora struje sustav uspijeva

pretvoriti u korisnu energiju za napajanje vozila. Ovi su podaci za današnje aktualne projekte ECS-a pokazani u tablici 4.1.

**Tablica 4.1:** Prikaz generiranih snaga i efikasnosti različitih postojećih ECS-a. [6]

Vrsta ECS-a	Sustav	TRL	Generirana snaga	Efikasnost
Induktivni	OLEV	9	15-85 kW	71-91 %
	CWD	3-4	20 kW	75-85 %
	IPV	3-4	20 kW	70-80 %
	PRIMOVE	5-6	do 200 kW	68.8-77.4 % (90 % nerazjašnjeno)
	HALO	3-4	20 kW	80 %
	WPT (ORNL)	3-4	2.5-20 kW	88-95 %
	INTIS	3-4	11-60 kW	88-93 %
	Electreon	5-6	5-20 kW	88-90 %
	Victoria	7-8	do 50 kW	92 %
	WPT (UC)	2-3	do 200 kW	60 %
	Momentum Charger	3-4	50-75 kW (modularno do 300 kW)	95 %
Konduktivni s kontaktnom mrežom	eHighway	7-8	do 500 kW	80-97 %
	HPDC	4-5	do 450 kW	>95 %
Konduktivni s ceste	Elways	6-7	do 200 kW	82-95 %
	ElonRoad	4-5	do 240 kW	90-97 %
	Slide-in/APS for Roads	4-5	do 120 kW	97 %

Iz tablice je vidljivo da svi konduktivni sustavi mogu doseći razinu efikasnosti veću od ijednog induktivnog sustava. Najefikasniji induktivni sustav predstavlja Momentum Charger razvijen u zadnjih nekoliko godina s efikasnošću od 95%. Momentum Charger svojim je inovativnim idejama modularnog sustava uspio doseći i vrlo velike generirane snage. Kod ostalih induktivnih sustava može se zamijetiti trend – što je snaga veća, to je efikasnost manja.



Konduktivni sustavi smatraju se iznimno energetska efikasna. Tri od pet sustava dosežu čak 95% efikasnosti uz snagu do čak 500 kW, višestruko puta veću od one generirane induktivnim sustavom. Na temelju samo ove činjenice, logično je zaključiti da su konduktivni sustavi bolji s obzirom na utrošak energije, oni daju veću efikasnost uz veću snagu struje. No, u pitanje dolazi potreba za tolikom količinom energije. Ceste različitih značaja imaju različita očekivana prometna opterećenja i različita mjerodavna vozila. [11] Vrlo velika snaga struje ostvarena na određenim konduktivnim ECS-ima nužna je isključivo za teža teretna i ostala vrlo velika vozila. Na cestama namijenjenim za prometovanje autobusa javnog prijevoza, osobnih automobila i lakših teretnih vozila dosad je pokazano da su snage generirane induktivnim sustavima zadovoljavajuće te su na ovim prometnicama one i isplativije. [6]

#### **4.1.4. Širina primjene**

Pod širinom primjene smatra se koliko različitih vrsta vozila cesta može uspješno primiti i pogoniti.

Induktivni sustavi mogu prihvatiti barem jedno od sljedećih vozila: osobni automobili, mini autobusi, autobusi, osobna vozila, tramvaji, manji radni strojevi, veći radni strojevi, lakša teretna vozila i teretna vozila. Electreon, Victoria i Momentum Dynamics sustavi namijenjeni su samo za autobuse, mini buseve i slična vozila javnog prometa, dok su sustavi poput OLEV, IPV i WPT namijenjeni za sva ili skoro sva vozila s popisa. [6]

Konduktivni sustavi, s druge strane, mogu primiti i napajati sve vrste vozila. Iznimka je kod sustava s kontaktnom mrežom iznad ceste, koja je namijenjena za viša vozila (autobusi, teretna vozila, radni strojevi, tramvaji) zbog same visine kontaktne mreže. Konduktivni sustavi također su, ovisno o pojedinačnom sustavu, testirani na brzine od 80 do 150 km/h, za razliku od induktivnih koji su testirani na brzine od 50 do 100 km/h. Što se širine primjene tiče, konduktivni sustavi nadjačavaju induktivne. [6]

## **4.2. Eksploatacijski aspekti**

### **4.2.1. Održavanje**

Kolnici su projektirani i izvedeni da prevedu određenu količinu prometa za vrijeme projektnog perioda, koji u pravilu iznosi preko 40 godina za ceste visokog značaja. Očekivani su korektivni radovi habajućeg sloja asfalta otprilike svakih 15 godina. Odgovornost kontroliranja i održavanja prometnica u rukama je mjerodavne uprave za prometnice, koja na temelju skupljenih podataka određuje frekvenciju kontrola i sanacija. Kako su dosad postojeći sustavi još eksperimentalni te vrlo uske i kontrolirane primjene, za sada se još ne može generalizirati koliko se brzo koja vrsta ECS-a troši i oštećuje u realnoj primjeni. [6]

Pretpostavlja se da će kritična mjesta predstavljati područja kontakta asfalta i elementa ugrađenog u njega. Vrste ECS-a koje se sastoje od mnogo takvih elemenata su induktivni sustav i konduktivni sustav s tračnicom u cesti. Testiranja nisu pokazala konkretne rezultate o tome koliko su oštećenja u ovim

točkama česta i značajna. [6] Na slici 4.2 prikazana su dva primjera oštećenja asfalta na kritičnim točkama na lokacijama s ugrađenim induktivnim ECS-om.



*Slika 4.2: Oštećenja asfalta na kritičnim točkama kod induktivnih ECS-a. Gore su prikazana dva primjera longitudinalnih reflektirajućih pukotina koje su prodrle na površinu asfalta. Dolje je prikazano propadanje asfalta. [6]*

U usporedbi ECS-a s klasičnim cestama, pretpostavlja se da će frekvencija kontrola i radova održavanja dugoročno ostati ista. [6]

#### **4.2.2. Trajnost**

Što se tiče usporedbe induktivnih i konduktivnih sustava na temelju njihovog trajanja, odnosno uporabnog vijeka, nju još nije moguće napraviti. Tehnologija ECS-a toliko je nova da je najstariji ostvareni sustav tek na otprilike polovici projektnog perioda prosječne klasične ceste visokog značaja. Niti jedan postojeći ECS još nije dosegao rani prekid svog uporabnog vijeka. [6]

Iako nijedan od postojećih implementiranih ECS-a još nije dosegao svoju projektiranu trajnost, postoje očekivana trajanja za određene sustave. Za ElonRoad se očekuje uporabni vijek od 10 godina, a za Elways 20, oboje uz redovito održavanje. Nasuprot tome, Slide-in/APS for Roads sustav ne zahtijeva održavanje tijekom svog projektiranog uporabnog vijeka od 20 do 30 godina. [6]

### 4.3. Financijski aspekti

Financijski aspekti obuhvaćaju troškove implementacije sustava i troškove održavanja. Kako dinamika održavanja različitih vrsta ECS-a i dalje nije definirana (kako je naglašeno u poglavlju 4.2.), nije moguće analizirati ni troškove njihovih održavanja.

Dosadašnji troškovi implementacije postojećih sustava prikazani su u tablici 4.3. Iako je dosta sustava u fazi istraživanja i ne zna im se točan trošak implementacije, izračunata je približno prosječna cijena za svaku vrstu ECS-a zasebno. Na temelju ove analize induktivni sustavi i konduktivni s kontaktnom mrežom slične su cijene po kilometru jednog prometnog traka (oznaka mjerne jedinice valuta/km/trak). Ova analiza, naravno, nije dovoljno precizna da se donese utemeljeni zaključak. [6]

Drugi izvori tvrde da je ECS konduktivnog načina punjenja s ceste podosta jeftiniji od ostalih vrsta sustava. [9, 12] U tablici 4.2 prikazani su podaci o cijenama različitih vrsta ECS-a po kilometru ceste prikupljeni iz različitih literatura. Vidljivo je da su sustavi s tračnicom u cesti analizirani u dotičnim literaturama čak i višestruko jeftiniji po kilometru ceste od induktivnih ECS-a ili onih s kontaktnom mrežom. Induktivni su na temelju ovih izvora najskuplji, dok konduktivni s kontaktnom mrežom dosta variraju u cijeni.

**Tablica 4.2:** Troškovi implementacije različitih vrsta ECS-a na temelju podataka prikupljenih iz više literatura. [12]

Izvor	Vrsta ECS-a	Cijena [milijuna €/km]
Ranch (2010.)	kontaktna mreža iznad ceste	~ 1.01
Boer i dr. (2013.)	kontaktna mreža iznad ceste	~ 2.04-3.06
	induktivno	
Asplund (2017.)	direktno s ceste	~ 0.40
Olsson (2013.a)	direktno s ceste	~ 0.89-1.09
Olsson (2013.b)	induktivno	~ 2.56-4.92
Wilson (2015.)	induktivno	~ 2.19-3.24
Sundelin i dr. (2017.)	kontaktna mreža iznad ceste	~ 0.48-1.67
	direktno s ceste	

**Tablica 4.3:** Troškovi implementacija postojećih ECS-a i prosječni troškovi implementacija glavnih vrsta ECS-a. [6]

Vrsta ECS-a	Sustav	TRL	Trošak implementacije
Induktivni	OLEV	9	500 000 €/km/trak
	CWD	3-4	nepoznato
	IPV	3-4	nepoznato
	PRIMOVE	5-6	3.25-6.15 mil. €/km/trak (1.7 mil. €/km/trak očekivano)
	HALO	3-4	nepoznato
	WPT (ORNL)	3-4	1.32 mil. €/km/trak
	INTIS	3-4	nepoznato
	Electreon	5-6	>1 mil. €/km/trak
	Victoria	7-8	nepoznato
	WPT (UC)	2-3	1.05 mil. €/km/trak
Momentum Charger	3-4	nepoznato	
		<b>Prosjek</b>	približno 1-2 mil. €/km/trak
Konduktivni s kontaktnom mrežom	eHighway	7-8	1.07-2.06 mil. €/km/trak
	HPDC	4-5	nepoznato
		<b>Prosjek</b>	1.07-2.06 mil. €/km/trak
Konduktivni s ceste	Elways	6-7	390 000-1 mil. €/km/trak
	ElonRoad	4-5	600 000-1.5 mil. €/km/trak
	Slide-in/APS for Roads	4-5	1.06 mil. €/km/trak
		<b>Prosjek</b>	(1 ± 0.3) mil. €/km/trak

#### 4.4. Sigurnost

Sigurnost na cesti možemo sagledati na temelju nekoliko faktora. Oni su: otpornost na klizanje, ravnost površine i jednostavnost pristupa opremi. [6] Kako su ECS-i u relativno ranim fazama razvoja, još ne postoji mnogo konkretnih podataka o sigurnosti različitih vrsta ECS-a.

Otpornost na klizanje je sposobnost površine da preuzme određenu horizontalnu silu iz kotača i time omogući njegovo kotrljanje, odnosno onemogući njegovo klizanje. Do problema, odnosno proklizavanja može doći ako kotač pređe preko nekog materijala na cesti koji nije asfalt. ECS-i s kontaktnom mrežom ne mogu izazvati ovakve probleme jer nemaju elemente u cesti – površina prometnice potpuno je ista kao i kod klasičnih cesta, kontinuirana je i od asfalta. Za razliku od njih, induktivni sustavi s napajanjem direktno s ceste imaju tračnicu. Ona je element u cesti koji zadire do površine prometnice i prekida kontinuitet asfalta. Tračnica je metalna i niske otpornosti na klizanje kako bi pantograf mogao nesmetano i mirno kliziti po njoj. Ovo može dovesti do proklizavanja kotača koji prijeđe preko Tračnice ili do ozljede pješaka, biciklista i radnika na održavanju ceste. [6]

Isti problem, ali u puno manjoj mjeri imaju i oni induktivni ECS-i kod kojih postoje dijelovi u cesti koji zadiru do površine asfalta. Ti su dijelovi najčešće okruženi betonom, koji je manje otporan na klizanje od asfalta, no otporniji je od metala. Neki induktivni sustavi nemaju dijelove u cesti koji dosežu površinu asfalta, nego su svi u potpunosti ukopani u prometnicu. Ovi sustavi, isto kao i oni s kontaktnom mrežom, ne predstavljaju problem što se tiče klizanja. [6]

Ravnost kolničke površine jedan je od ključnih parametara u gospodarenju cestama jer utječe na udobnost, sigurnost i trajnost ne samo kolničke konstrukcije, već i vozila koja prometuju po njoj. Time ravnost indirektno utječe i na okoliš te smanjuje buku uz prometnicu. [13] Slično kao i kod otpornosti na klizanje, probleme s ravnošću mogu izazvati samo induktivni ECS-i ili induktivni s napajanjem direktno s ceste jer mogu imati dijelove koji prekidaju kontinuitet površine ceste. Iako se pri ugradbi ECS-a ravnost površine kolnika osigurava, kroz vrijeme dolazi do visinskih nepravilnosti zbog postojanja prekida i segmenata od drugačijeg materijala radi njihovih različitih karakteristika (čvrstoća, modul elastičnosti, otpornost na udare,...). [6]

Sustavi s kontaktnom mrežom ne stvaraju dodatne probleme glede ravnosti površine.

Jednostavnost pristupa opremi može imati i pozitivne i negativne konotacije što se tiče sigurnosti, ovisno sagledavamo li problem iz perspektive radnika koji održava prometnicu ili pješaka pored ceste. Pri radovima održavanja dostupnost i pozicija opreme vrlo su bitni za sigurnost radnika. Pošto izvedeni ECS-i ne postoje dugo i nisu široke primjene, još ne postoje podatci o održavanju različitih vrsta sustava pomoću kojih bi se mogle konkretno usporediti iste. [6]

Iz perspektive pješaka, lak pristup opremi predstavlja sigurnosni problem, ne samo za pješaka, nego i putnike i vozače u vozilima na prometnici. Opet ne postoji dovoljno podataka zbog vrlo malog broja sustava koji su izvedeni i stavljani u komercijalnu upotrebu. No, može se pretpostaviti da će ECS-i s kontaktnom mrežom predstavljati više problema jer imaju mnogo dijelova uz cestu (stupovi, kablovi). Kod induktivnih sustava i konduktivnih direktno s ceste oni se nalaze pod zemljom ili su grupirani u zaključane stanice nalik malim trafostanicama.

#### **4.5. Utjecaj na okoliš**

Vrlo je jednostavno usporediti ECS i klasičnu prometnicu s aspekta utjecaja na okoliš – ECS je, naravno, povoljniji za okoliš. Razlozi su mnogobrojni i navedeni su u poglavlju 2.2, no glavni je veliko smanjenje emisija stakleničkih plinova. Ekološke prednosti ECS-a (i statičkih stanica za napajanje) još su izraženije ako je struja generirana iz obnovljivih izvora, no čak i kada je ona iz neobnovljivih izvora emisije stakleničkih plinova su smanjene. [6]

Prednost ECS-a u odnosu na statičko napajanje vozila jest manja masa baterije, čime se smanjuju i njena cijena, masa vozila te količina utrošenog materijala. No, ono što radi znatnu razliku između utjecaja dinamičkog i utjecaja statičkog napajanja električnih vozila na okoliš jest mogućnost napajanja teretnih vozila. [6]

Usporedbe utjecaja na okoliš različitih vrsta ECS-a teško je napraviti zbog novine tehnologije, no postoji nekoliko argumenata protiv konduktivnih sustava s kontaktnom mrežom. Takvi sustavi zahtijevaju mnogo veće količine materijala, specifično bakra i čelika, od induktivnih sustava i konduktivnih direktno s ceste. Problem potrebne količine može se riješiti cikličkom i kontroliranom reciklažom dotičnog materijala. Također, zbog trenja između pantografa i bakrenih kabela kontaktne mreže dolazi do gubitka materijala u kabelu reda veličine 10 kg/km godišnje. [6] Sitne čestice bakra tada padaju u tlo, gdje u velikim količinama mogu loše utjecati na klijanje sjemenki i razvoj korijenja biljaka. [14] No, za primjetno loše efekte potrebna je koncentracija bakra koja je teško ostvariva samo trošenjem kablova. [6]

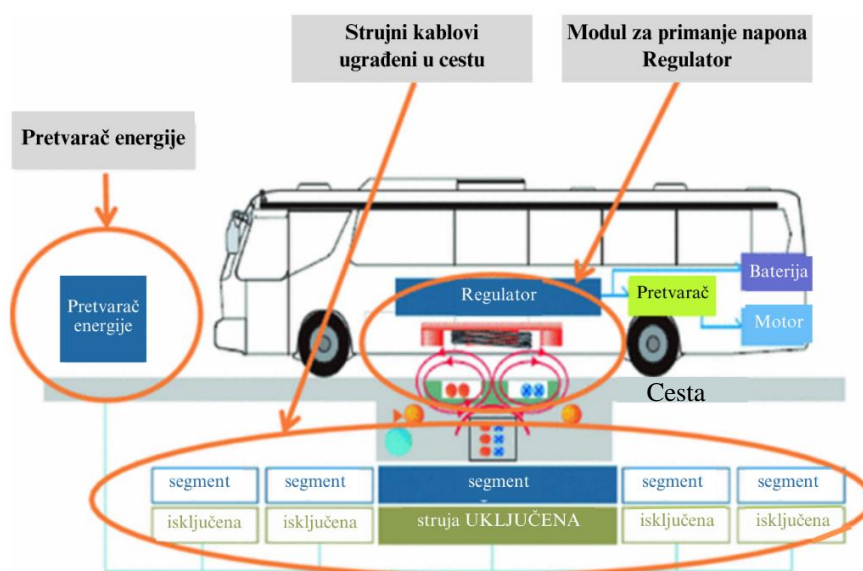
## 5. Aktualni pilot projekti

U ovome poglavlju prikazana su tri aktualna pilot projekta. Kako bi se uspješno prikazala i usporedila glavna tri različita ECS-a, prikazan je po jedan pilot projekt za svaku od tri vrste sustava, odnosno načina napajanja električnog vozila. OLEV predstavlja sustav induktivnog načina napajanja, eHighway sustav konduktivnog načina napajanja putem kontaktne mreže te Elways sustav konduktivnog načina napajanja direktno s ceste.

### 5.1. OLEV

Korejski napredni institut za znanost i tehnologiju u zadnjem je desetljeću razvio šest generacija statičkih i dinamičkih sustava za napajanje električnih vozila, a Dongwon Inc. provodi komercijalnu implementaciju dotičnih. U Južnoj Koreji autobusi javnog prijevoza uspješno prometuju po nekolicini ovih sustava. Već su prije 2016. godine ovi sustavi imali TRL 7-8, no on je 2018. godine porastao na 9. [6] Drugim riječima, OLEV sustavi u potpunosti su testirani i uspješni kroz operacije nad njima te su tehnološki najspremniji pilot projekt koji trenutno postoji.

Sustavi variraju po veličini, no imaju zajedničko ime OLEV (engl. *Online Electric Vehicle*, hrv. električno vozilo na mreži) i koriste istu vrstu tehnologije - tehnologiju oblikovanog magnetsko polja u rezonanciji (engl. *Shaped Magnetic Field in Resonance*, SMFIR). Iz imena sustava i tehnologije da se zaključiti da se radi o sustavima induktivnog načina napajanja. OLEV sustavi obuhvaćaju i stanice za statičko napajanje vozila. Njihovo dodavanje 2014. godine dovelo je do povećanja prosječne brzine vozila. [6] Princip rada i dijelovi sustava prikazani su na slici 5.1.



Slika 5.1: OLEV koncept (preuzeto i prevedeno iz [6]).

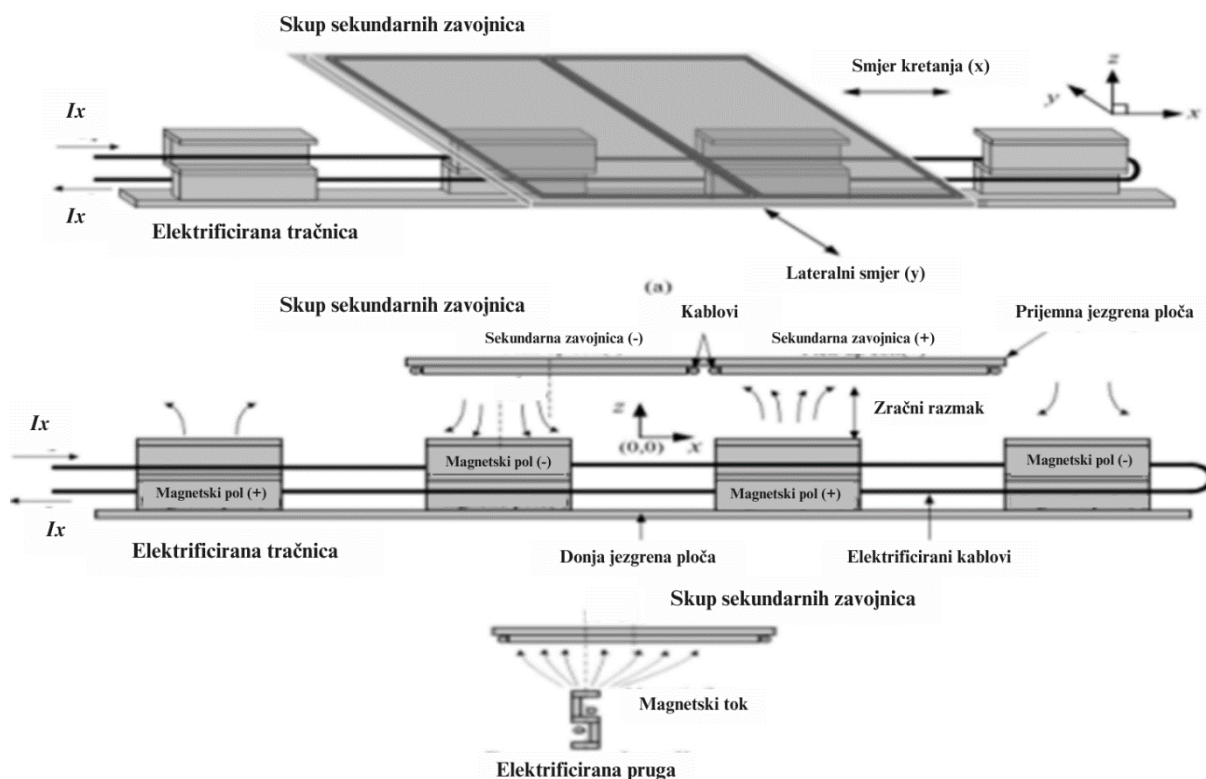
Operativni troškovi OLEV sustava iznose oko 14 tisuća € godišnje za jedan autobus, ili 48 € za osiguravanje energije u segmentu od 1 km ceste godišnje. Ukupni implementacijski i operativni troškovi

tijekom 10 godina za šest OLEV autobusa iznose 2 659 000 €. Troškovi za klasičnu prometnicu identične rute i šest autobusa na prirodni plin iznose 5 510 000 € – ovo je ušteda od nevjerojatnih 50%. [6]

Neke karakteristike OLEV sustava su:

- prvih pet generacija zahtijeva trofaznu ili izmjeničnu struju visoke voltaže, dok šesta generacija prihvaća i istosmjernu vrlo visokog napona,
- postiže energetska efikasnost od 91% pri niskim generiranim snagama, a s povećanjem generirane snage efikasnost pada do 71%,
- ne zahtijevaju održavanje tijekom očekivanog uporabnog vijeka od 10 godina,
- zračni razmak između primarnih i sekundarnih zavojnica iznosi 20 cm i
- uporabivost pri visokoj vlazi i temperaturama od  $-30^{\circ}$  do  $70^{\circ}\text{C}$ . [6]

Pošto je već četvrta generacija (OLEV 4G) imala TRL 7-8, peta i šesta generacija (OLEV 5G/6G) pokušaji su dodatnog poboljšanja u smislu realne implementacije interoperabilnog sustava. OLEV 5G znatno je smanjio trošak izgradnje zahvaljujući novorazvijenoj vrlo tankoj elektrificiranoj tračnici tipa S. Debljina je smanjena sa 100 mm u 4G na 40 mm. Ova tračnica omogućila je veliku uštedu u materijalu, pogotovo feritu. S tračnice imaju ulogu primarne zavojnice, odnosno one pomoću struje iz strujnih kablova stvaraju magnetno polje. [6] Princip rada prikazan je na slici 5.2.



Slika 5.2: Shematski prikaz principa rada sustava OLEV 5G (preuzeto i prevedeno iz [6]).



OLEV 6G je trenutno u ranim fazama, a cilja na povećanje interoperabilnosti, odnosno mogućnost da se električna vozila namijenjena za statičko napajanje također mogu napajati i putem ECS-a. Sustav se oslanja na tanku pravokutnu jedinicu za prijem struje koja je kompatibilna s klasičnim električnim vozilima i može se na njih nadodati. Ovaj sustav također nema primarne zavojnice od feritne jezgre. [6]

## 5.2. eHighway

eHighway zajednički je projekt dvije velike svjetske firme - Siemens, koji proizvodi električne kućanske uređaje, lokomotive i vlakove te Scania, koja proizvodi teške kamione i autobuse. Ova suradnja ima dosta smisla, uzimajući u obzir da je eHighway ECS konduktivnog načina napajanja putem kontaktne mreže iznad vozila. Sustav je u razvoju od 2010. godine te danas ima više aktivnih demonstracija u Njemačkoj, Švedskoj i SAD-u. [6] Smatra se najrazvijenijim i najuhodanijim ECS-om svoje vrste, što je vidljivo iz TRL-a koji iznosi 7-8.

Pošto se kontaktna mreža nalazi na visini 5-6 m iznad površine prometnice, eHighway podržava samo teretna vozila. No, ta vozila mogu biti različitih tipova i načina pogona. Teretni kamioni s pogonom na dizel, benzin, biogorivo, prirodne plinove ili vodikove gorive čelije svi se mogu nadograditi određenom opremom i napajati na eHighway sustavu. Vozila također mogu biti različitih pogonskih sustava, bio to paralelni ili serijski hibrid ili potpuno električni pogon. eHighway prihvaća vozila svih veličina baterije, gorivih čelija ili motora na unutarnje izgaranje. Nabavka novog vozila koje je namijenjeno za ovaj ECS specifično bilo bi dugoročno ekonomičnije, no mogućnost prenamjene postojećih vozila vrlo je bitna iz perspektive interoperabilnosti. [6]

Nadalje o interoperabilnosti, ovaj sustav pokazao se funkcionalnim u obliku i zatvorene (sustav sam za sebe, bez kontakta s drugim vrstama prometa) i otvorene petlje (otvoreni sustav u međudodnosu s drugim vrstama prometa). [6]

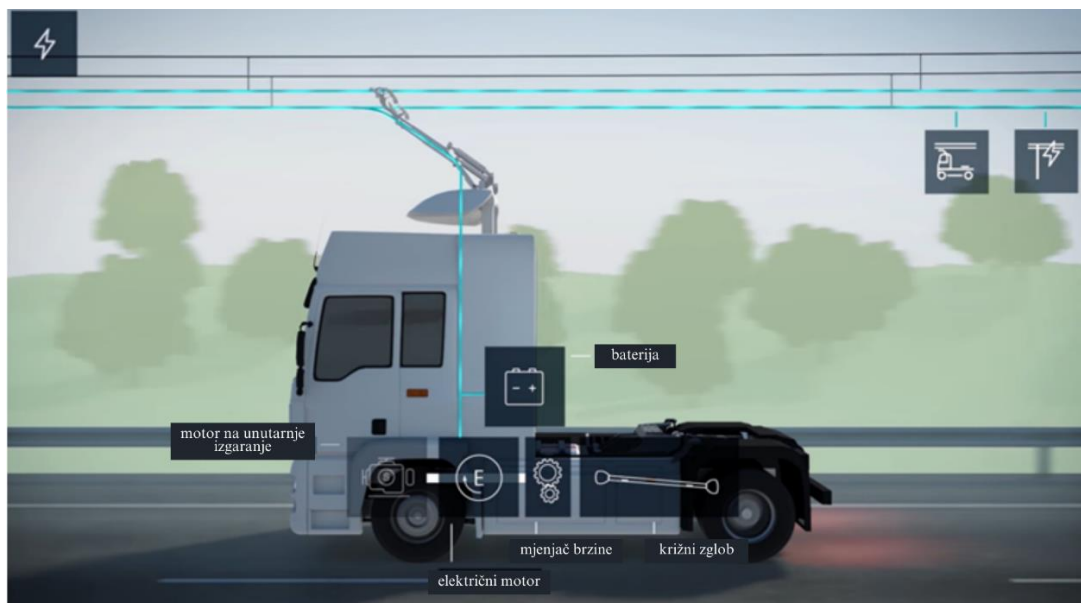
Cijena sustava iznosi okvirno 2.2 milijuna € po kilometru traka. Ova se cijena sastoji od 1.8 milijuna € utrošenih na konstrukciju kontaktne mreže i 400 tisuća € na spajanje sa strujnom mrežom i transformatore. Godišnji operativni troškovi iznose oko 2.5% od iznosa investicije. eHighway dosad je pokazao uštedu na gorivu od 20 000 € na 40 tona kamiona na 100 000 km. [6]

Tehničke karakteristike eHighway-a su sljedeće:

- zahtijeva istosmjernu struju srednjeg napona od 750V,
- efikasnost sustava smanjila se s preko 90% na 80-85% zbog povećanja generirane snage s 200 kW na 500 kW (ovako je sustav isplativiji),
- testiran na brzinu vožnje od 80 km/h,
- uporabivost osigurana u vrlo kišnim i vjetrovitim uvjetima,
- trafostanice su na razmacima 1-4 km,
- pantograf korisne dužine 2 m s dvije ruke na razmaku 1.35 m,

- kablovi kontaktne mreže na razmaku 1.35 m te
- očekivani uporabni vijek iznosi 10 godina. [6]

Trafostanice uz cestu u sebi smještaju sklopni sastav istosmjerne struje srednjeg napona, transformator, ispravljač i inverter za regenerativno kočenje. One elektrificiraju kontaktnu mrežu. Pri ulasku vozila u trak, pantograf se automatski produžuje i stvara kontakt s kablovima kontaktne mreže. Automatizirane su mu bočne kretnje kako bi se osigurao konstantan kontakt s kablovima, bez obzira na odstupanja vozila od osi prometnog traka uslijed manevriranja. [15] Za razliku od željeznica, pantograf je kod ovog sustava dvodijelan, odnosno ima dvije dodirne točke s kablovima kontaktne mreže kako bi se osigurala uzemljenost. Vozilo se može slobodno kretati u i iz trake za napajanje te ima mogućnost brzog povlačenja pantografa i odvajanja iz sustava. [6] Princip rada pojednostavljeno je ilustriran na slici 5.3.



Slika 5.3: Ilustracija principa rada Elways sustava. [15]



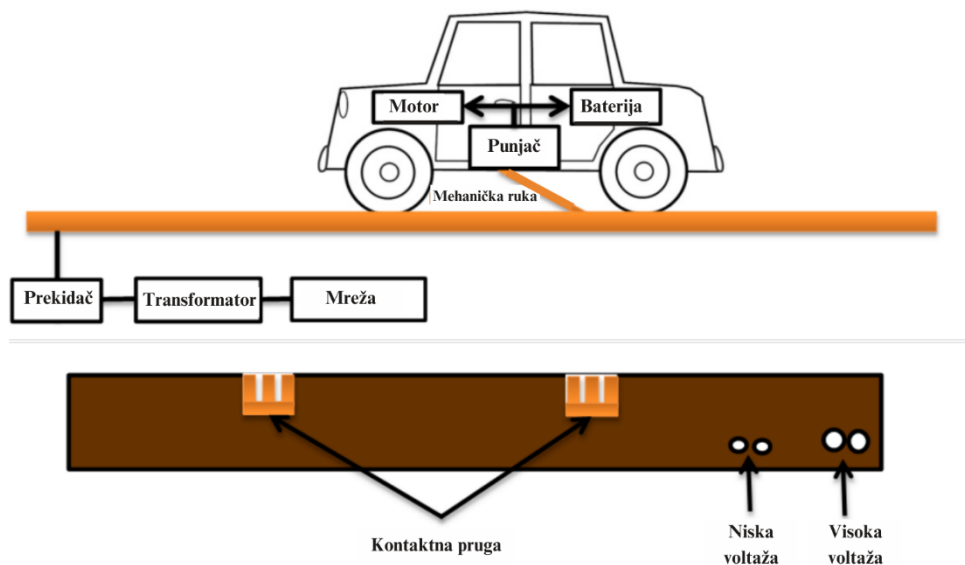
Slika 5.4: Ilustracija sustava eHighway. U lijevom rubu vidljiva je trafostanica. [6]

Ugradnja ovog sustava zahtijeva dodatni prostor pored prometnice za smještaj elemenata uz cestu. Tijekom ugradnje minimalna je potreba za privremenim zatvaranjem prometnice jer na samom kolniku ne dolazi do nikakvih promjena. Nakon ugradnje očekuje se minimalna potreba za održavanjem i sanacijama. Jedino se habajuća komponenta na pantografu treba zamijeniti jednom do dva puta godišnje, što se podudara s frekvencijom obaveznih pregleda kamiona. [6]

### 5.3. Elways

Nekoliko švedskih i svjetskih firmi, organizacija i tijela vlasti udružilo se projektom Elways ECS sustava. Sustav je razvijen u Švedskoj od 2009. godine, a spada u konduktivne ECS-e načina napajanja direktno s ceste. Zasad postoje četiri generacije vrlo visoke razine spremnosti s TRL-om od 7-8. [6]

U ravnini površine kolnika nalaze se elektrificirane tračnice koje putem mehaničke ruke i punjača dovode struju do motora ili baterije. Ako vozilo ima bateriju, onda može pohraniti energiju za vožnju van Elways sustava. Tračnice su segmentirane, odnosno elektrificiran je samo segment po kojemu se vozi vozilo, i to samo ako se vozi određenom minimalnom brzinom. Pad brzine ispod ove granice rezultira prekidom protoka struje u dotični segment tračnice. Konduktivne kontaktne točke u tračnicama nalaze se na dubini od 6 cm, što znači da gornji dio tračnice nije elektrificiran i siguran je za, na primjer, motocikliste koji prelaze preko tračnice. [6] Princip funkcioniranja sustava prikazan je na slici 5.5.



Slika 5.5: Shematski prikaz rada sustava Elways (preuzeto i prevedeno iz [6]).

Mehanička ruka automatizirana je i nalazi se na dnu vozila, na stražnjem dijelu. Ruka automatski detektira prisustvo tračnice i spušta se kako bi ostvarila kontakt s njom. U slučaju izvođenja manevara izbjegavanja ili pretjecanja ruka se automatski povlači. [6]

Procijenjena cijena projekta iznosi između 450 tisuća i milijun €/km/trak. Pretpostavlja se da bi implementacija velikih razmjera smanjila ovaj iznos na 400 tisuća €/km/trak. Cijena jedne jedinice za

prihvat energije (komponenta na vozilu) kojom se vozilo transformira u ono kompatibilno s Elways sustavom iznosi samo 500 do 1000 €. Godišnji troškovi održavanja iznose 1-2% ukupne investicije, točnije 2 100 €. Elways sustav osigurava godišnju uštedu u gorivima (u odnosu na vozila na nutarnje izgaranje) od 3.13 milijuna € ili 157 000 €/km/trak. [6]

Tehničke karakteristike Elways sustava su sljedeće:

- zahtijeva izmjeničnu struju niske voltaže 400-800 V,
  - efikasnost sustava iznosi 85-95% uz generiranu snagu od 200 kW,
  - testirano na brzinama 60-100 km/h,
  - dosad izgrađeno otprilike 20 000 km tračnice,
  - očekivani uporabni vijek iznosi 20 godina uz plan održavanja,
  - uporabivost je osigurana za sve vremenske uvjete u Švedskoj te
  - moguće su kolizije s malim stranim objektima zaglavljenima u pruzi bez značajnih oštećenja.
- [6]

Ugradnja Elways sustava počinje kopanjem rova u kolniku dužine planirane dionice ECS-a. Segmenti tračnice tada se postavljaju i centriraju u jarak te se spajaju s kablovima koji će kasnije služiti za elektrificiranje tračnice. Predgotovljeni betonski blokovi učvršćuju tračnicu s obje strane, a preko njih se lijeva završni sloj asfalta. Moguće je postaviti oko 1 km tračnice u sat vremena. Transformatorska stanica gradi se svakih 1-2 km ceste i služi za pretvaranje srednje voltaže u nisku koju sustav zahtijeva. Svakih 50 km nalazi se transformatorska stanica koja pretvara struju visoke voltaže javne mreže u srednju voltažu. Održavanje sustava svodi se na čišćenje tračnice i mijenjanje mehaničke ruke. Čišćenje se provodi patentiranim uređajem koji prelazi preko tračnice i miče moguće nečistoće i zapele objekte. Mehanička ruka zbog svoje funkcije, pomičnosti, vitkosti i izloženosti dinamičkim opterećenjima ima kraći životni vijek nego ostatak Elways-a. Potrebno ju je promijeniti svakih 10 000 prijeđenih km. [6]



Slika 5.6: Elways sustav u korištenju. [6]

## 6. Zaključak

U prometnom sektoru prvi su veliki korak ka zelenoj budućnosti napravili električni automobili, a sljedeći predstavljaju električni cestovni sustavi. Oni su zasad najbolje rješenje problema teretnih vozila i njihovih emisija stakleničkih plinova. Kada bi došlo do potpune implementacije ECS-a na sve prometnice diljem svijeta, emisije bi se virtualno smanjile na nulu. Takav scenarij nije realan, no i sama nadogradnja postojećih cesta na određenim dionicama i ustaljenim rutama već je pokazala vrlo velike prednosti. Osim velikog smanjenja emisija, OLEV, eHighway i Elways projekti ukazuju i na moguće uštede na godišnjim operativnim troškovima do čak 50%. Tri navedena sustava su najrazvijeniji postojeći pilot projekti, od kojih svaki vrlo zorno predstavlja vrstu ECS-a kojoj pripada.

ECS-i induktivnog načina napajanja čine se kao najpopularnija vrsta. Mogućnost beskontaktnog napajanja i nedostatak dodatnih dijelova koji strše iz profila vozila donose dosta prednosti glede održavanja, preglednosti i sigurnosti. No, ovo je trenutno najskuplje rješenje, čija je glavna mana premala generirana snaga koja ne može pogoniti teška vozila. Dovoljnu generiranu snagu za teška teretna vozila imaju svi dosad izvedeni konduktivni sustavi. Oni s kontaktnom mrežom kompatibilni su samo s visokim teretnim vozilima, što im limitira interoperabilnost i isplativost u odnosu na ostale sustave. Konduktivni sustavi s napajanjem direktno s ceste mogu prihvatiti sve vrste vozila, a zasad se čine i kao najjeftinije rješenje. Glavna mana ovih ECS-a je tračnica na površini kolnika koja može izazvati sigurnosne probleme za druge sudionike u prometu koji prelaze preko nje. Sličan je problem prisutan i u nekim induktivnim sustavima, dok konduktivni s kontaktnom mrežom omogućuju neometanu vožnju drugih sudionika u prometu za vrijeme i nakon ugradnje.

Čini se da niti jedna vrsta ECS-a nije univerzalno rješenje. Induktivni sustavi dobro bi funkcionirali unutar gradova, gdje nema teretnih vozila i brzine kretanja su manje, što je dokazao sustav OLEV. Konduktivni su sustavi prikladni za međugradske relacije, autoceste i brze ceste, gdje teretna vozila poglavito prometuju. Sustav s napajanjem direktno s ceste zbog potreba održavanja tračnice bio bi prikladan na ustaljenim i kontroliranim rutama, dok je sustav s kontaktnom mrežom idealan za stvaranje interoperabilne mreže diljem autocesta i brzih cesta nekog većeg područja. Ovo je, opet, zorno dokazano sustavima Elways i eHighway redom. Čini se da se svi sustavi razvijaju prirodnim tokom i zauzimaju dijelove tržišta koji im najbolje odgovaraju.

Što slijedi? Potrebni su dogovori na regionalnoj, čak i državnoj razini kako bi se omogućilo širenje postojećih dionica ECS-a. Treba obratiti pažnju na to gdje će se koristiti koja vrsta ECS-a i kako da se osigura njihova međusobna interoperabilnost. Sve u svemu, budućnost električnih cestovnih sustava obećavajuća je.

## Literatura

- [1] Udovičić, B.: *Neodrživost održivog razvoja – Energetski sustavi u globalizaciji i slobodnom tržištu*, Kigen d.o.o., Zagreb, 2004.
- [2] Olovsson, J., Taljegard, M. i drugi: Impacts of Electric Road Systems on the German and Swedish Electricity Systems – An Energy System Model Comparison, *frontiers*, 9 (2021.), članak 631200, doi: [10.3389/fenrg.2021.631200](https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.631200)
- [3] Schaap, S.: *Review of Electric Road Systems – Both a conventional and innovative technology*, KTH Royal Institute of Technology, Štokholm, 2021.
- [4] Your Heavy Duty, [www.transportenvironment.org](http://www.transportenvironment.org), 2023.
- [5] Stefan, T.: The role of business models in the transition to Electric Road Systems, 2019./2020., Nordic Energy Research, Oslo
- [6] Bateman, D., Leal, D. i dr.: *Electric Road Systems: A Solution for the Future?*, World Road Association, 2018.
- [7] Olechowski, A. L., Eppinger, S. D. i dr.: Technology readiness levels: Shortcomings and improvement opportunities. *Systems Engineering*, 23.4 (2020.), 395-408
- [8] Vukomanović, M., Kolarić, S. i drugi: *Priručnik organizacije građenja*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2018.
- [9] Electric Road Systems – A solution for electric vehicle range and critical metal shortages, [www.engineering.com](http://www.engineering.com), 14.4.2020.
- [10] Lakušić, S.: *Željeznice – Predavanja za studente III godine Građevinskog fakulteta*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2005.
- [11] Koarlet, Ž., Dragčević, V.: *Projektiranje i građenje cesta*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2018.
- [12] Taljegard, M., Thorson, L. i drugi: Large-scale implementation of electric road systems: Associated costs and the impact on CO<sub>2</sub> emissions, *International Journal of Sustainable Transportation*. 14 (2019.), 1-14, doi: [10.1080/15568318.2019.1595227](https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1595227)
- [13] Šimun, M., Sršen, M.: Ravnost kolničkih zastora na građevinama cestovne infrastrukture, *GRAĐEVINAR* 59 (2007) 5, 395-405
- [14] Copper for crop production, [www.extension.umn.edu](http://www.extension.umn.edu), 2018.
- [15] Siemens eHighway - solution for electrified road freight transport, Siemens, 12.12.2016., [www.youtube.com](http://www.youtube.com)