

MANAGEMENT RAZVOJA IZDELKA IN OSKRBOVALNIH VERIG Z UPORABO FUNKCIONALNE ANALIZE

DUŠAN MEŽNAR, MARJAN SENEGAČNIK

Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede, Kranj, Slovenija
dusan.meznar@guest.um.si, marjan.senegacnik@um.si

Sinopsis Osnovni namen tega članka je predstaviti primer uporabe razširjene funkcionalne analize kot orodja za razvoj izdelkov ter vzporedno s tem tudi oblikovanje in upravljanje dobavne verige. Uporaba metode omogoča, da že v zelo zgodnjih fazah razvoja in koncipiranja izdelka dobimo informacijo o tem, kateri sklopi ali sistemi nekega izdelka bi bili lahko kritični bodisi z vidika dobavljivosti, cene ali vzdrževanja; torej z vidika vseh tistih faktorjev, ki imajo neposreden vpliv na eksploatacijo izdelka in pa tudi na njegov položaj na trgu oziroma na njegovo prodajljivost. S tem pristopom lahko z uporabo matrike stopnje pomebnosti sklopov in sistemov, ki sestavljajo vozilo, iz matrike razmerij med stroški in koristmi (cost/benefit matrike) ter matrike podpore oskrbe (razmerje med indeksom oskrbe in potrebnimi časi za popravila) že v zelo zgodnji fazi razvoja izdelka snovalci izdelka ugotovijo bistvene faktorje (struktura izdelka, cena posameznih delov, zanesljivost, logistika ...), torej vse tiste elemente, ki imajo bistveni vpliv na koncept izdelka, posredno pa je to tudi osnova za upravljanje z nabavnimi mrežami.

Ključne besede:

funkcionalna
analiza,
matrika,
upravljanje
oskrbovalne verige,
razvoj izdelka,
električna vozila

PRODUCT DEVELOPMENT AND SUPPLY CHAIN MANAGEMENT USING FUNCTIONAL ANALYSIS

DUŠAN MEŽNAR, MARJAN SENEGAČNIK

University of Maribor, Faculty of Organizational Sciences, Kranj, Slovenia
dusan.meznar@guest.um.si, marjan.senegačnik@um.si

Abstract The main purpose of this paper is to present an example of the use of extended functional analysis as a tool for product development and, in parallel, supply chain design and management. The method allows us to obtain information at very early stages of product development and design about which components or systems of a product might be critical, either in terms of deliverability, costs or maintainability; in terms of all those factors that have a direct impact on the performance of the product and also on its position on the market or on its marketability. Using this approach, the cost/benefit matrix and the logistics support matrix (the ratio of the support index to the repair times required), the product designers can identify the essential factors (product structure, price of individual parts, reliability, logistics) at a very early stage of product development, i. e. all those elements that have a significant impact on the product concept. Indirectly, this is also the basis for the management of the procurement networks.

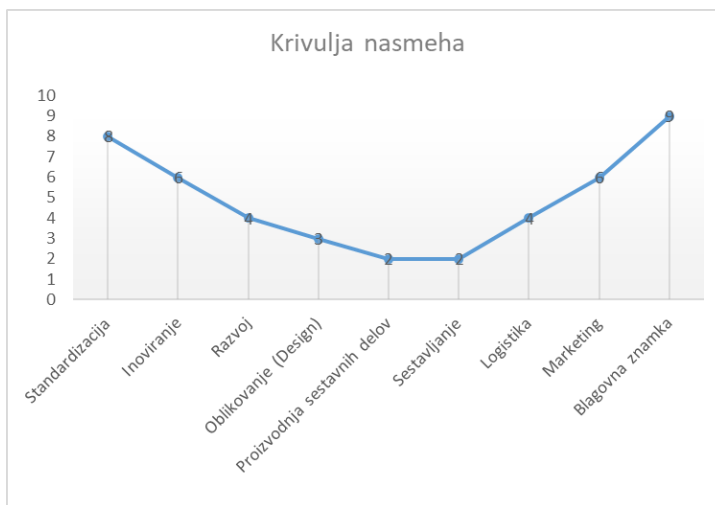
Keywords:

functional analysis,
matrix,
supply chain
management,
product
development,
electric vehicles



1 Uvod

Globalizacija in pa seveda sodobne proizvodne in razvojne metode so omogočile, da proizvodni proces razčlenimo na posamezne faze. To je omogočilo, da sestavne dele, komponente, sklope in sisteme proizvajajo in dobavljajo različni dobavitelji na različnih lokacijah po svetu. Oblikovale so se oskrbovalne verige in omrežja vrednosti. Oskrbovalne verige združujejo vse dejavnosti in celoten nabor aktivnosti, ki jih člani oskrbovalne verige izvedejo na izdelku ali storitvi od zasnove, razvoja, proizvodnje ter končne uporabe ter v fazah po njihovi uporabi. Za podjetja, ki so člani teh oskrbovalnih verig, predstavlja to veliko število priložnosti. Predvsem se to nanaša na njihovo pozicioniranje na krivulji vrednosti, ki je poznana tudi pod imenom »krivulja nasmeha« (Shin, 2012), ki je prikazana na sliki 1.



Slika 1: Krivulja dodane vrednosti (Brawn, 2014)

Vir: lasten.

Kot je razvidno s slike 1, se na krivulji dodane vrednosti največji delež dodane vrednosti ustvarja v zgodnjih fazah nastajanja nekega izdelka in pa fazah plasmaja na tržišče. To pomeni, da se ustvari največji delež dodane vrednosti v fazi razvoja in koncipiranja izdelka, torej pred proizvodnimi aktivnostmi ter po sami proizvodnji, in sicer v fazah prodaje, marketinga ter poprodajnih aktivnosti. Poslovne funkcije, ki so na locirane v osrednjem delu krivulje; torej proizvodnja, sestavljanje – imajo le majhen delež dodane vrednosti.

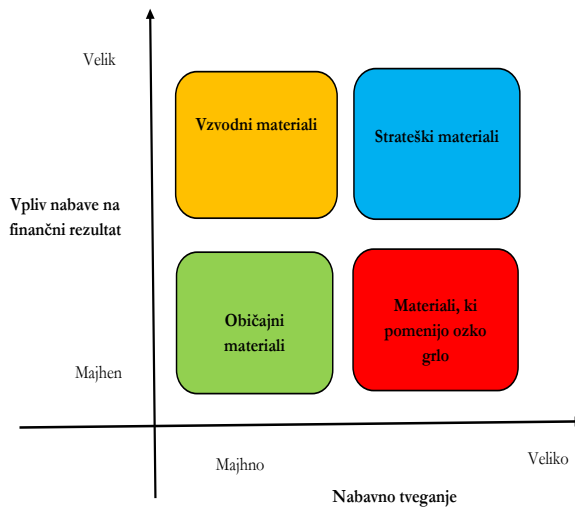
Iz tega je razvidno, da tisti, ki bodo v svoje delovanje hitreje in uspešneje integrirali razvoj, koncipiranje izdelka, marketing, prodajo in poprodajne aktivnosti, bodo dosegali višjo dodano vrednost. Pri tem so seveda zelo pomembne zgodnje faze razvoja in koncipiranja izdelka, definiranje najustreznejših sklopov in sistemov ter zelo selektivna izbira dobaviteljev in partnerjev v verigi vrednosti. Skrbno načrtovana oskrbovalna veriga z izbranimi dobavitelji ali partnerji namreč prinaša dostop do know-how, dostop do specializiranih znanj ter pomeni dvig inovativnosti, večji potencial rasti in hitrejši razvoj podjetja.

Specifičnost krivulje vrednosti glede na ustvarjanje dodane vrednosti močno vpliva na nabavo in pogojuje nove pristope pri upravljanju oskrbovalnih verig, predvsem pa na povečevanje dodane vrednosti znotraj oskrbovalnih verig. Zelo pomembno je dejstvo, da pri nekaterih proizvodnih podjetjih lahko nabava predstavlja med 50 do 80 % celotnih stroškov podjetja. Dejstvo je, da nabava kot taka predstavlja strateško funkcijo, ki pa je močno izven okvirov samo nabave surovin ali komponent za proizvodni proces. Oskrbovalna funkcija ima bistveno vlogo pri stroškovni optimizaciji in seveda s pravilnim razumevanjem in obvladovanjem celotne verige dodane vrednosti tudi vpliv na profitabilnost podjetja. Osnova naloga nabave je obvladovanje stroškov, virov, zahtev že v razvojnih fazah izdelkov. To pa je tudi osnova za kakovostne odločitve, ki so povezane s stroškovno učinkovitostjo. Nabavne kompetence so vzvodje in način za povečevanje donosnosti naložb (ROI) v poprodajne aktivnosti, samo prodajo in pa marketing.

Ne glede na to, da z novimi metodami in tehnologijami postaja nabava oziroma upravljanje z nabavnimi verigami kompleksnejši proces, ostaja njen cilj isti: služiti kot podpora pri razvoju novih izdelkov, povečevati konkurenčnost in prispevati k višji dodani vrednosti.

Zelo uporabno orodje upravljanja oskrbovalne verige je »matrika upravljanja nabave«, razvita z implementacijo portfeljskega pristopa na področju nabave (Kraljič, 1983). Glavna ideja je zmanjševanje nabavnega tveganja oskrbovalnih proizvodov (izdelkov in storitev) ob čim višji nabavni moči (Kraljič, 1983).

V tej matriki razvrstimo materiale – glede na njihovo oceno doprinosa pri dobičku in na njihovo nabavno tveganje – v štiri kategorije. Vsaka kategorija pa glede na odnos do dobaviteljev zahteva tudi drugačen pristop.



Slika 2: Matrika upravljanja nabave

Vir: lasten.

Te kategorije so:

- a. **Strateški proizvodi** – z velikim vplivom na profitabilnost so podvrženi visokemu nabavnemu tveganju in imajo najvišjo prioriteto. Ključnega pomena je razvijanje partnerstev z dobavitelji.
- b. **Vzvodni proizvodi** – imajo visok vpliv na dobiček in nizko nabavno tveganje. Tu poskušamo doseči visoko nabavno moč, nadomeščamo in zamenjujemo dobavitelje in naročamo v velikih količinah.
- c. **»Ozka grla«** – sledimo cilju po zmanjševanju tveganj in iščemo načine za odpravo le-teh.
- d. **Nekritični proizvodi** – nizek vpliv na dobiček, nizko nabavno tveganje. Standardizacija v nabavnem procesu ter uvedba sodobnih tehnologij in tehnoloških orodij s ciljem izboljševanja in optimizacije nabavnega procesa.

Za uspešno upravljanje oskrbovalne verige ne zadostuje ena sama strategija. Nabavne strategije se med seboj razlikujejo, odvisne pa so od skupin sestavnih delov in pa od posameznih dobaviteljev ter od razmer na oskrbovalnih trgih. Zaradi spremenljivega in turbulentnega tržnega okolja pa se morajo strategije spreminjati in stalno prilagajati trenutnim razmeram. Oblikovanje primernih strategij je stalna in

zelo kompleksna naloga. Z upoštevanjem vseh dejavnikov in sprememb, ki vplivajo na izbiro neke nabavne strategije, se namreč pojavi tudi nuja po prilagoditvi strategije same nabave.

Za pravilno in učinkovito upravljanje posamezne nabavne kategorije je bistveno pravilno pozicioniranje. Vsaka kategorija ima svoje specifične lastnosti, te pa zahtevajo različen pristop do dobaviteljev in pa seveda temu primerno uporabo oskrbovalnih tehnik. Bolj kot je oskrbovalna veriga globalizirana, bolj je kompleksna, večji je pomen upoštevanja raznovrstnih tveganj.

Pri obravnavanem izdelku, tj. pri električnem avtu, se bomo osredotočili predvsem na strateške sklope in sisteme, ki so na eni strani bistveni za funkcionalnost izdelka in ga okarakterizirajo v tehničnem in tehnološkem smislu, po drugi strani pa tudi cenovno in kvalitativno pozicionirajo na trgu.

Pri sočasnem razvoju izdelkov in oskrbovalnih verig je treba upoštevati, da v podjetjih obstajata dve različni verigi, in sicer **oskrbovalna veriga**, ki se osredotoča na pretok fizičnih izdelkov od dobaviteljev skozi proizvodnjo in distribucijo vse do maloprodajnih trgov in strank, in **razvojna veriga**, ki se osredotoča na uvajanje novega izdelka in vključuje arhitekturo izdelkov, odločitve o izdelavi/nakup, zgodnejše vključevanje dobaviteljev, strateško partnerstvo, poreklo izdelka. Zelo pomembno pa je, da razumemo in upoštevamo osnovne značilnosti dobavne verige, kot so negotovost in spremenljivost, zlasti učinek »bikovega biča«, ekonomijo obsega v proizvodnji in prevozu ter čas izdelave in dobave ter osnovne značilnosti razvojne verige; hitrost prenosa tehnologije, hitrost, s katero se tehnologija v določeni panogi spreminja, odločitev »narediti sam« (proizvesti sam) ali nakup pri dobaviteljih, torej odločitev o tem, kaj narediti interno in kaj kupiti od zunanjih dobaviteljev, kakšna je struktura izdelka, raven modularnosti ali integritete v izdelku itd.

Ključna prednost razvojne vloge je prihranek časa pri razvoju novih izdelkov ter v manjših razvojnih in proizvodnih stroških le-teh. Ključno je vključevanje strateške nabave in dobaviteljev v razvoj novih proizvodov in procesov že v zelo zgodnjih fazah, v optimizacijo obstoječih proizvodov in procesov, v zmanjševanje stroškov kakovosti ter povečevanje robustnosti in fleksibilnosti proizvodnih sistemov.

Bistven sestavni element pri razvoju izdelkov, ki je neposredno povezan z upravljanjem oskrbovalnih verig, je razvoj dobaviteljev. Vsekakor je neobhodno dejstvo, da je za uspešno izvajanje svojih strateških oskrbovalnih strategij nujno potrebno stalno investirati v razvoj dobaviteljev, in sicer s ciljem, da lahko sledijo podjetju pri razvoju izdelkov. Koliko časa, energije in stroškov bo namenjeno posameznemu dobavitelju, je odvisno od pomembnosti dobavitelja, od preteklega sodelovanja, od medsebojnih odnosov in od vzajemnih ciljev, ki jih želimo doseči pri sodelovanju s posameznim dobaviteljem.

Pri tovrstnem pristopu je delo z dobavitelji omejeno le na ohranjanje obstoječega sodelovanja in dogovorov. Odločitev podjetij, da obvladujejo svoje nabavne verige, pomeni zelo proaktivno vlogo nabave ter razvojnega oddelka pri sodelovanju z dobavitelji in usmerjanju njihovega razvoja. Dobavitelji, ki predstavljajo strateško nabavno osnovo in na katerih bo podjetje razvijalo svojo nabavno verigo, morajo biti zelo skrbno izbrani.

Dejstvo je, da je cilj imeti čim boljše nabavno mrežo in v tej vključene najboljše dobavitelje. Problem pa nastane, da jih je včasih zelo težko najti ali pa ti nočejo sodelovati. Tedaj je pač potrebno najti tistega, za katerega menimo, da je najustreznejši, in se ga potem razvija in usmerja tako, da bo kar najbolj optimalno sledil zahtevam podjetja. Usposabljanje in razvoj dobaviteljev se nanašata predvsem na področje projektnega vodenja, ekipnega in vzajemnega sodelovanja, izboljševanja kakovosti, celovitega obvladovanja procesov in procesa nenehnega inoviranja. To pa pomeni zelo tesen – partnerski odnos in pa seveda direkten vpliv na ostale člene oskrbovalne verige, na njeno delovanje in uspešnost.

Razmerje med partnerjema vpliva na samo delovanje oskrbovalne verige, določa pa ga več dejavnikov (Duclos, 2003):

- **Prilagajanje:** Z drugimi besedami, prilagajanje vseh skupnih poslovnih aktivnosti. V smislu dolgoročnega sodelovanja je razvoj dobaviteljev usmerjen na izboljševanje in optimiranje celotnega poslovnega procesa ter prenosa znanja. To pa prinaša dolgoročne koristi obema: kupcu in dobavitelju na komplementarnih področjih njunega delovanja.

- **Zapletenost odnosa:** V medsebojnih odnosih se v proces sodelovanja in komuniciranja vključuje večje število oseb. Zapletenost odnosa je odvisna od zahtevnosti in širine problematike.
- **Vrednotenje medsebojnega odnosa kot dolgoročne investicije:** Odvisno od strategije so določeni dobavitelji okarakterizirani kot dolgoročni partnerji. V odnosu s takšnim dobaviteljem so stroški, znanje in vložen čas, ki je s tem povezan, ovrednoteni kot dolgoročna investicija, ki se bo povrnila. Takšen status ekonomsko in strateško upravičuje razvoj dobavitelja in tudi pripravo in prilagoditev dobavitelja za dolgoročno sodelovanje.
- **Medsebojno zaupanje namesto formalnih odnosov:** Dobavitelj z višjim nivojem medsebojnega zaupanja, ki s skupnim zaupanjem pripomore k zmanjšanju negotovosti sodelovanja in poslovanja na obeh straneh, ima s tem večjo možnost, da postane strateški dobavitelj.
- **Moč in odvisnost:** Med partnerji obstaja medsebojna odvisnost, razporeditev moči pa lahko zelo variira. Ne glede na razporeditev moči, je bistven korekten prenos znanja in informacij, saj je to osnova za konkurenčnost.
- **Konflikt in sodelovanje:** Pri sodelovanju se ni možno izogniti konfliktnim situacijam, ki so posledica različnih interesov partnerjev. Usklajevanje je tudi način prenosa mišljenja, usmeritev in strategij posameznih partnerjev in je orodje za uskladitev interesov.

2 Integracija dobaviteljev v razvoj novih izdelkov

Integracija dobaviteljev v razvoj novih izdelkov v začetnih razvojnih fazah je zelo pomembna predvsem, ker imajo podjetja izredne koristi od vključevanja dobaviteljev v proces načrtovanja, in sicer ima to zelo močan vpliv na zmanjšanje nabavnih materialnih stroškov, povečanje kakovosti kupljenega materiala, bistveno zmanjšanje razvojnega časa in stroškov ter povečanja ravni tehnologije končnega izdelka.

2.1 Načini integracije dobaviteljev

Eden izmed bistvenih faktorjev za uspeh je način integracije dobavitelja, ki pa je odvisen od sposobnosti dobavitelja, njegovih resursov in pa od kompleksnosti izdelka.

Možnih je več pristopov, in sicer:

1. **Brez integracije dobaviteljev** – dobavitelj ni vključen v načrtovanje. Enostavno uporabimo sklope in sisteme, ki jih je možno dobiti na trgu, oziroma materiali ali podsklopi so dobavljeni v skladu s specifikacijami oziroma so bili projektirani s strani kupca.
2. **»White box«** – kupec ima nekaj strokovnega znanja, vendar želi zagotoviti, da lahko dobavitelj ustrezno proizvaja komponento. Tu gre za neformalno sodelovanje, bistveno pa je, da se kupec pri oblikovanju izdelkov in specifikacij neformalno posvetuje z dobaviteljem.
3. **»Grey box«** – ločen razvoj komponent ni mogoč. Gre za formalno vključevanje dobaviteljev, kjer se oblikujejo skupne ekipe med kupčevimi in dobaviteljskimi inženirji in skupaj oblikujejo nek izdelek ali storitev.
4. **»Black box«** – prihodnji izdelki imajo komponente, ki zahtevajo strokovno znanje in izkušnje, ki jih podjetje nima, razvoj teh komponent pa je mogoče ločiti od drugih faz razvoja izdelka. Značilnost tega pristopa je, da kupec daje dobavitelju nabor vmesnih zahtev, medtem ko dobavitelj samostojno oblikuje in razvija zahtevano komponento.

2.2 Ključi za integracijo dobaviteljev

Integracija dobaviteljev ni enostaven postopek, predvsem pa gre za precej zahteven in kompleksen proces, kjer je bistveno ustrezno selekcioniranje dobaviteljev, pri čemer so odločilni naslednji elementi:

1. **Uspešnost odnosa** – najprej je treba izbrati potencialne dobavitelje in z njimi vzpostaviti odnose ter uskladiti cilje.
2. **Kateri dobavitelji se lahko vključijo?** – to je ključno vprašanje, ki se pojavi v procesu izbora potencialnih dobaviteljev.

Primerni so tisti dobavitelji, ki imajo zmožnost sodelovanja v procesu načrtovanja, ki izražajo pripravljenost za sodelovanje v procesu oblikovanja novega izdelka ali storitve, s katerimi je možno doseči sporazume o vprašanih intelektualne lastnine in zaupnosti, ki imajo dovolj časa in resursov za projekt (kadrovskih) in imajo zadostna sredstva za prevzemanje obveznosti v zvezi z integracijo.

2.3 Način prilagajanja izdelkov

Glede na naravo in značilnosti končnega izdelka sta v principu možna dva pristopa, in sicer za nekatere izdelke je lahko primerna nizkocenovna strategija manjše raznolikosti, za druge bi bila učinkovitejša strategija z višjo ceno, večjo raznolikostjo in prilagodljivostjo.

Ko razvijamo sistem prilagajanja izdelkov, pa ti kompromisi niso nujno potrebni, saj je potrebno le-tega prilagoditi bistvenim značilnostim izdelka oziroma ni vsak model primeren za vse izdelke. Bistveni cilj, ki ga pri tem zasledujemo je, da pridobimo konkurenčno prednost, ki nam pomaga pri vpeljavi in vodenju novih poslovnih modelov.

Predpogoj za uvedbo sistema prilagajanja so: visoko kvalificiran in avtonomen kader, ustrezní procesi in modularizacija proizvodov, pri čemer morajo biti izpolnjeni naslednji ključni atributi:

1. Trenutni učinki

Moduli in procesi morajo biti zelo hitro povezljivi.
Omogočanje hitrega odziva na različne zahteve strank.

2. Brez stroškov

Povezave ne smejo povzročati dodatnih stroškov.
Prilagajanje mora biti cenejša in poceni alternativa.

3. Nevidnost procesov

Povezav in posameznih modulov uporabnik oziroma kupec ne sme zaznati.

4. Procesí brez trenja

Mreže ali zbirke modulov morajo biti koncipirane z ustreznimi rezervami. Moduli morajo biti 100-% kompatibilni in takoj povezljivi in integrabilni.

3 Električni avtomobili in njihov razvoj

3.1 Razlogi za uvajanje električnih avtomobilov

Že nekoliko pred letom 2000, predvsem pa v začetku novega tisočletja se je močno povečal pomen električnih avtomobilov. Pri tem imajo bistveno vlogo predvsem okoljski vidiki – tako zahteve po zmanjšanju emisij toplogrednih plinov kot tudi skrb za izboljšanje kakovosti ozračja. Znano je, da izpušni plini avtomobilov z motorji z notranjim izgorevanjem predstavljajo pomemben vir emisij tako polutantov oziroma onesnažil ozračja kot tudi toplogrednih plinov.

Pod pojmom onesnažila oziroma polutanti smatramo snovi, ki so prisotne v zraku in so neposredno škodljive za človeško zdravje ali pa tudi za druge žive organizme. K poslabšanju ozračja v urbanem okolju pomembno prispevajo izpušni plini avtomobilov. Med onesnažila iz avtomobilskih emisij sodijo ogljikovodiki, ogljikov monoksid, dušikovi oksidi in trdni delci. Polutanti, katerih mejne koncentracije v zraku so najpogosteje presežene, so trdni delci in ozon (ARSO, 2021). Ozon je sekundarni polutant, ni prisoten v izpušnih plinih, ampak nastane v ozračju pod vplivom sončnih žarkov pri reakcijah med ogljikovodiki in dušikovimi oksidi. Tako so emisije iz avtomobilskih motorjev med pomembnimi povzročitelji prizemnega ozona, ki je škodljiv predvsem za dihala. Povišane koncentracije prizemnega ozona, ki so pogoste v vročih poletnih dneh, povzročajo težave predvsem ljudem z astmo (Zhang idr., 2019).

Druga vrsta polutantov, katerih mejne koncentracije so pogosto presežene v hladnem delu leta, so trdni delci. Trdni delci imajo škodljive učinke na dihala in živčevje, predvsem pa na srce in ožilje. Po ocenah svetovne zdravstvene organizacije so povišane koncentracije trdnih delcev v zraku v svetovnem merilu vzrok za okoli 3 milijone predčasnih smrti letno (Curry Brown, 2013). Raziskave so potrdile škodljive vplive tako dolgotrajne kot tudi kratkotrajne izpostavljenosti zvišanim koncentracijam trdnih delcev (Brook idr., 2010). Sodobni avtomobilski motorji so sicer opremljeni z zelo učinkovitimi katalitičnimi pretvorniki in filtri trdnih delcev, ki lahko omogočijo minimalne emisije polutantov v ozračje, a kljub temu še vedno poslabšana kakovost zraka v urbanem okolju in z njo povezano ogrožanje zdravja ostaja precejšen problem.

Toplogredni plini so snovi, ki povečajo sposobnost ozračja, da zadrži toploto. Pojav tople grede je do določene mere normalen pojav, brez katerega bi bila povprečna temperatura na Zemlji okrog 30 °C nižja, kot je, kar bi pomenilo praktično nemogoče pogoje za rast rastlin. Problem tako ne predstavlja pojav tople grede sam po sebi, ampak dejstvo, da človek s svojimi dejavnostmi vsako leto emitira v ozračje veliko količino toplogrednih plinov in tako dodatno prispeva k pojavu tople grede. Vsebnost toplogrednih plinov v ozračju tako stalno narašča, zato atmosfera absorbira čedalje več toplote, ki jo oddaja zemeljska površina, in se zato vedno bolj segreva. Največ k temu tako imenovanemu antropogenemu pojavu tople grede prispevajo emisije ogljikovega dioksida. Zaradi velike porabe fosilnih goriv se v ozračje emitira vsako leto precej več ogljikovega dioksida, kot pa ga lahko porabijo avtotrofni organizmi pri fotosintezi. Emisije ogljikovega dioksida so zato odgovorne za okoli 50 do 60 % prispevka k antropogenemu pojavu tople grede. Pomemben delež pri tem zavzemajo emisije avtomobilskih izpušnih plinov.

Avtomobili, ki jih poganja elektromotor, ne oddajajo v ozračje nikakršnih izpušnih plinov. Zato jih označujejo kot vozila z ničelno stopnjo emisije (ZEV - zero emission vehicles). Treba je upoštevati, da je potrebno pridobiti električno energijo za pogon teh avtomobilov. Če je energija pridobljena iz brezogljicnih virov, kot so jedrska energija, sončna energija, vodna ali vetrna energija, to vsaj teoretično pomeni, da ne povzroča niti emisij toplogrednih plinov niti onesažil. Če pa je v električno energijo vključena tudi elektrika iz termoelektrarn, pa to v bistvu pomeni, da se emisije izpušnih plinov v ozračje prenesejo neposredno iz avtomobila na dimnik termoelektrarne. Vsaj v primeru onesažil to vendarle pomeni določeno izboljšavo, saj običajno termoelektrarne niso postavljene v središčih mest in je tako možno doseči boljšo kakovost ozračja v urbanem okolju in s tem zmanjšati škodljive vplive na zdravje. Kar se tiče prispevka k pojavu tople grede, pa je odvisno, kolikšen del električne energije je pridobljen v termoelektrarnah. Če je večina ali pa celotna električna energija pridobljena v termoelektrarnah, je znižanje ogljičnega odtisa ob uporabi električnega avtomobila minimalno ali pa ga sploh ni. V primeru, če uporabnik polni baterije z električno energijo iz omrežja, je ogljični odtis uporabe avtomobila odvisen od nacionalne strukture proizvodnje električne energije posamezne države. Te vrednosti pa se med posameznimi evropskimi državami močno razlikujejo (EEA, 2021).

3.2 Zgodovinski pregled

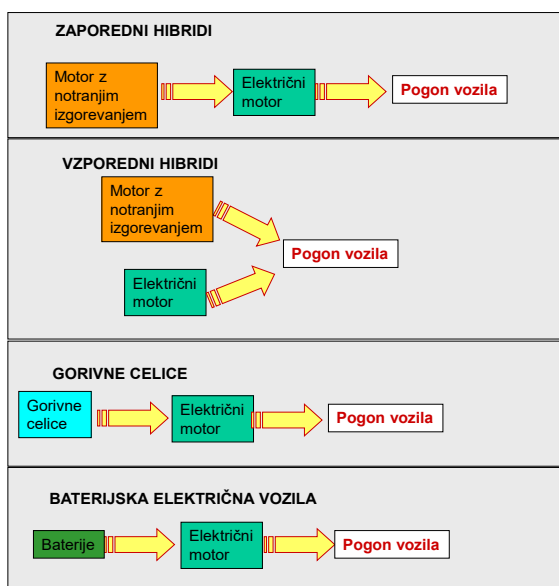
Zmotno je prepričanje, da gre v primeru električnih avtomobilov za novost, ki so jo omogočila šele zadnja znanstvena odkritja. Električni avtomobili imajo praktično povsem enako dolgo zgodovino kot avtomobili na bencinski motor. Prvi praktično uporaben električni avtomobil je izdelal Thomas Parker leta 1884, prvi bencinski avtomobil pa Carl Benz v letih 1885/86 (Guarnieri, 2012; *Owning an electric car*, 2010-11; Daimler, b. d.). V začetnem obdobju razvoja avtomobilizma so bili električni avtomobili popolnoma konkurenčni avtomobilom z bencinskim motorjem. V ZDA so tako npr. prodali največ električnih avtomobilov leta 1912. Po letu 1920, to je ravno v obdobju, ko se je začel razvoj množičnega avtomobilizma v Severni Ameriki, pa so začeli prevladovati avtomobili z bencinskimi motorji in približno v obdobju 10 let praktično popolnoma prevladali. Za prevlado bencinskih motorjev so bile odločilne razne tehnične izboljšave, kot sta električni vžig motorja in izpopolnjeni menjalniki (Guarnieri, 2012). Pomemben vpliv so imele tudi čedalje boljše cestne povezave, ki so povečale aktualnost daljših medmestnih voženj. S tem je prišla do izraza tudi glavna prednost bencinskih avtomobilov, to je daljši doseg vožnje. Nato so električni avtomobili vse do konca dvajsetega stoletja imeli praktično povsem obrobno vlogo in se uporabljali le v razne posebne namene (*Owning an electric car*, 2011–12). Šele po letu 1990 pa so predvsem iz okoljevarstvenih razlogov postali električni avtomobili spet aktualni. Vsekakor pa je na ponoven vzpon električnih avtomobilov imel pomemben vpliv razvoj novih, precej zmogljivejših litijevih baterij (Battery University, 2021).

3.3 Vrste električnih avtomobilov

Med električne avtomobile sodijo vsi avtomobili, ki jih poganja električni motor. Obstajajo različne izvedbe – hibridni avtomobili imajo dva motorja – poleg električnega motorja še motor z notranjim izgorevanjem (običajno bencinski motor). Ločimo vzporedne ali paralelne hibridne avtomobile, kjer praviloma poganja vozilo le eden izmed obeh motorjev, le kadar je potrebna velika moč, se lahko vklopita hkrati oba motorja. Obstajajo pa tudi zaporedni ali serijski hibridi, kjer kolesa vozila poganja izključno elektromotor, motor z notranjim izgorevanjem pa služi le kot agregat za pridobivanje elektrike.

Pri vzporednih hibridih obstajajo izvedbe, ki imajo le šibek električen motor in ta predstavlja samo malenkostno podporo motorju z notranjim izgorevanjem; po drugi strani pa tudi vozila, kjer sta zmogljivosti obeh motorjev zelo podobni. Mnogi hibridni avtomobili imajo danes možnost polnjenja baterij iz zunanjšega vira – tako imenovani priključni hibridi (plug-in hybrid electric vehicles – PHEV)(U.S. Department of Energy, b.d. a; EVgo, 2022).

Med električne avtomobile načeloma sodijo tudi avtomobili na gorivne celice (FCEV – fuel cell electric vehicles), saj tudi njih poganja elektromotor. Gorivne celice delujejo kot galvanski člen, saj omogočajo pretvorbo kemične energije v električno. Za razliko od baterij pa oba reaktanta vstopata od zunaj, vodik iz rezervoarja za gorivo, kisik pa iz zraka (U. S. Department of Energy, b. d. b; EVgo, 2022).



Slika 3: Različne izvedbe električnih avtomobilov

Vir: <https://www.evgo.com/ev-drivers/types-of-evs/>

V ožjem smislu pa kot električne avtomobile smatramo baterijske električne avtomobile (BEV – battery electric vehicles). Ta vozila poganja le elektromotor, kot edini vir električne energije pa služi baterija (U. S. Department of Energy, b. d. c; EVgo, 2022).

Različne variante električnih avtomobilov predstavlja slika 3.

3.4 Vrste baterij

Glavna slabost električnih avtomobilov v primerjavi z bencinskimi in dizelskimi avtomobili je kratek doseg vožnje z enim polnjenjem baterije, dodatne komplikacije pa ob tem povzročajo še dolg čas polnjenja baterije. Medtem ko avtomobili z bencinskim motorjem brez težav prevozijo z enim rezervoarjem goriva okrog 500 km, pri najbolj varčnih dizelskih motorjih se lahko doseg podaljša preko 1000 km, pa je ta doseg pri električnih avtomobilih precej manjši. Poleg tega pa se tudi za razliko od posode za gorivo, ki se napolni v nekaj minutah, baterija polni več ur. Težavo predstavlja omejena energijska gostota baterij. Zaradi tega se pojavlja dokaj težko rešljiv problem, kako v baterijo sprejemljivo maso shraniti dovolj energije, ki bo vozilu omogočala sprejemljiv doseg vožnje. Vrsto desetletij so prevladovali svinčene baterije, ki pa imajo relativno nizko energijsko gostoto. Tovrstne baterije so se sicer izkazale kot zelo dobra rešitev za vir električne energije pri avtomobilih z bencinskim ali dizelskim motorjem. Tam baterije zagotavljajo električno energijo, potrebno npr. za vžig, razsvetljavo ali pa za delovanje posameznih električnih naprav, kot so ventilatorji, brisalci ipd. Niso pa se svinčeve baterije najbolje obnesle v električnih avtomobilih, kjer mora baterija zagotoviti tudi energijo za pogon motorja, saj je bil doseg vožnje zelo skromen. To pa je vrsto let predstavljalo tudi glavno oviro za večjo razširjenost uporabe električnih avtomobilov.

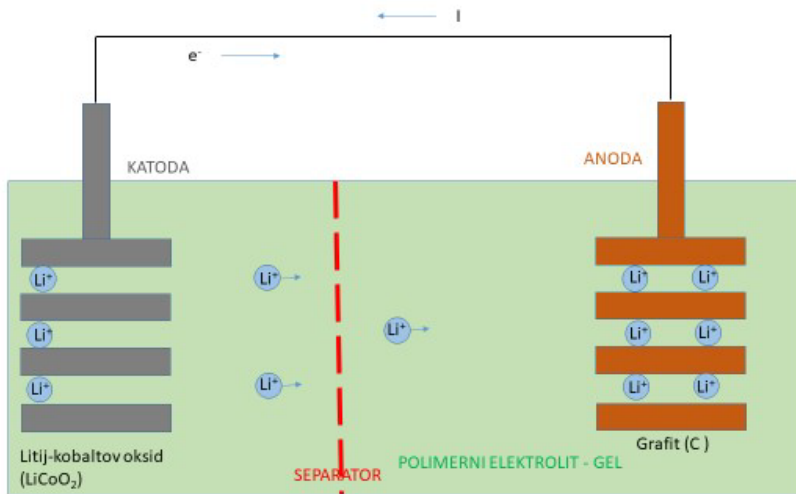
Da so se električni avtomobili spet uveljavili kot realna alternativa avtomobilom z bencinskim ali dizelskim motorjem, je predvsem zasluga razvoja novih, zmogljivih baterij. Precejšen napredek glede energijske gostote so v primerjavi s svinčeno baterijo pokazale že različne izvedbe nikljevih baterij (nikelj-kadmijeva in nikelj kovinsko-hidridna baterija), kot najbolj perspektivne pa so se izkazale litij-ionske baterije. Tehnične značilnosti posameznih vrst baterij so prikazane v tabeli 1 (EPEC, 2021).

Tabela 1: Tehnične značilnosti posameznih vrst baterij

	Svinčeva baterija	Nikelj-kadmijeva baterija	Nikljeva kovinsko-hidridna baterija	Litij-ionska baterija (kobaltat)	Litij-ionska baterija (manganat)
Energijska gostota / Wh kg ⁻¹	30–50	45–80	60–120	150–190	100–135
Število polnjenj (80 % razelektritev)	200–300	1000	300–500	500–1000	500–1000
Napetost člena / V	2,0	1,2	1,2	3,6	3,8
Čas hitrega polnjenja / h	8-16	1	2–4	2–4	1

Vir: <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>

V zadnjem obdobju so se najbolj uveljavile litij-ionske baterije, predvsem izvedba z litij-kobaltovim oksidom, kjer je katoda iz litij-kobaltovega oksida, anoda pa iz grafitu. Shematsko je ta oblika litij-ionske baterije prikazana na sliki 4 (Panasonic Industries, b. d.).



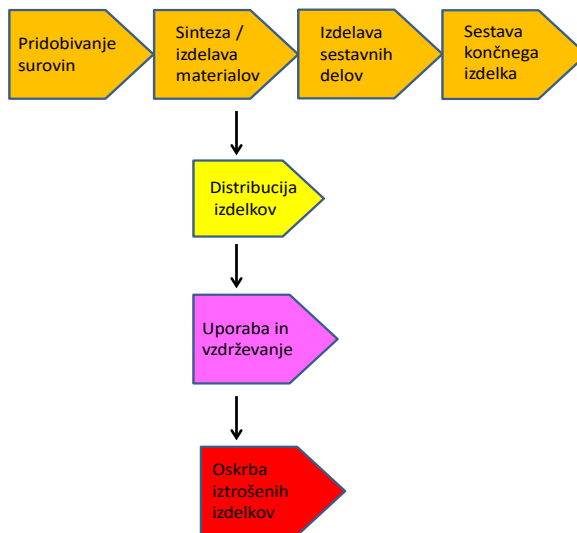
Slika 4: Shematski prikaz litij-ionske baterije

Vir: <https://industrial.panasonic.com/ww/products/pt/lithium-ion>

3.5 Ocena emisij iz življenjskega cikla izdelka (LCA)

Električni avtomobili predstavljajo zanimivo alternativo avtomobilom, ki jih poganja motor z notranjim izgorevanjem, ker omogočajo pomembno zmanjšanje obremenjevanja ozračja med uporabo, še posebej, če je za polnjenje baterij uporabljena električna energija iz brezogljicnih virov. Vendar pa je pri okoljskih vplivih vsakega izdelka treba upoštevati celoten življenjski cikel izdelka, ne le uporabo, ampak vse faze: od pridobivanja surovin do oskrbe iztrošenega izdelka. Treba je pripraviti oceno celotnega življenjskega kroga (life-cycle assessment – LCA). V vseh fazah prihaja tudi do manjših ali večjih vplivov na okolje, kot skuša shematsko prikazati slika 5 (Ricoh, b. d.).

Pogosto so prisotne dileme glede pozitivnih učinkov električnih avtomobilov na okolje. Velikokrat se pojavlja vprašanje, ali niso morda obremenitve okolja pri proizvodnji in pri oskrbi odpadkov tolikšne, da izničijo ugoden okolijski učinek med fazo uporabe vozila.



Slika 5: Shematski prikaz faz življenjskega cikla izdelka

Vir: https://www.ricoh.com/technology/tech/063_lca

Pri tem velja omeniti, da so električni avtomobili, če odštejemo baterije, v bistvu bolj enostavni in cenejši tako za izdelavo kot za vzdrževanje. Elektromotor ima manj sestavnih delov od bencinskega ali dizelskega motorja. Potrebuje manj vzdrževalnih posegov, kot so servisne storitve, dolivanje motornih olj ipd. To pomeni tudi manj vplivov na okolje. Največji problem – tako s cenovnega kot tudi z okoljskega vidika – predstavljajo predvsem baterije.

Ocenjeno je, da v procesu izdelave električnega avtomobila z vsemi njegovimi komponentami (vključno z baterijami) nastane več emisij toplogrednih plinov kot pri proizvodnji avtomobilov, ki jih poganja motor z notranjim izgorevanjem. Največ k višjim emisijam prispeva izdelava baterije. Po nekaterih ocenah lahko samo izdelava litijeve baterije z maso 500 kg prispeva 74 % več emisij ogljikovega dioksida kot celoten proces izdelave avtomobila, ki ima motor z notranjim izgorevanjem (Rolander idr., 2018). Vendar pa so nato emisije med uporabo vozila pri električnem avtomobilu toliko manjše, da je skupna količina emitiranih toplogrednih plinov v celotnem ciklu vseeno nižja kot pri bencinskem ali dizelskem avtomobilu. Hale in Lutsey (2018) tako ocenjujeta, da v povprečju električni avto v Evropi v celotnem življenjskem ciklu emitira okrog 50 % manj toplogrednih plinov kot pa avtomobil, ki ga poganja motor z notranjim izgorevanjem. Ob tem predpostavljata, da je življenjska doba (obdobje uporabe) vozila 150.000 km in da originalna baterija zdrži celotno življenjsko dobo vozila. Znižanje emisij je odvisno od načina proizvodnje električne energije in se giblje med 28 in 72 % (Hale in Lutsey, 2018). Predpostavljeno je, da se baterija polni z električno energijo iz javnega omrežja. Tako so emisije ogljikovega dioksida odvisne od nacionalne strukture proizvodnje električne energije, kjer pa obstajajo med evropskimi državami velike razlike. Emisijska intenzivnost toplogrednih plinov pri proizvodnji električne energije – izražena v gramih ekvivalenta ogljikovega dioksida na proizvedeno kilovatno uro električne energije (g CO₂/kWh) – se tako po podatkih za leto 2020 giblje med 9 g CO₂/kWh za Švedsko in 710 g CO₂/kWh za Poljsko. Emisijsko povprečje za Evropsko unijo (EU-27) je 231 g CO₂/kWh, se pa je od leta 1990, ko je znašalo 501 g CO₂/kWh, znižalo na manj kot polovico (EEA, 2021).

Kot poudarjata Hale in Lutsey (2018), je tudi pri proizvodnji baterij pomembno, iz katerih virov je pridobljena uporabljena električna energija. Večina litij-ionskih baterij, ki jih uporabljajo evropski proizvajalci električnih avtomobilov, je proizvedena v Južni Koreji in na Japonskem, kjer je med 25 in 40 % električne

energije proizvedene v termoelektrarnah na premog. Bilo je opravljeno večje število raziskav s ciljem ocene povzročenih emisij toplogrednih plinov pri proizvodnji baterij. Kot je razvidno iz tabele 2, se ocene emisij precej razlikujejo, saj se gibljejo med 30 in 500 kg CO₂ na kWh kapacitete baterije. Metodološki pristopi pri oceni emisij so zelo različni, očitno pa je v ocenah še precej nezanesljivosti. Večina študij kaže, da je tudi v procesu proizvodnje baterij največ emisij ogljikovega dioksida povezanih s pridobivanjem električne energije (Rolander idr., 2018).

Pričakovano je, da bo pri nadaljnjem razvoju proizvodnje baterij precej naporov vloženih v znižanje porabe energije ter tudi v večji delež električne energije iz brezogljivičnih virov, kar bo prispevalo k znižanju emisij ogljikovega dioksida (Hale in Lutsey, 2018).

Tabela 2: Ocena emisij toplogrednih plinov, povzročenih pri proizvodnji litij-ionskih baterij

Avtorji	Emisije (kg CO ₂ / kWh)
Mesagle (2017)	56
Hao in sod. (2017)	96–127
Romare in Dahlöf (2017)	150–200
Wolfram in Wiedmann (2017)	106
Ambrose in Kendall (2016)	194–494
Dunn in sod. (2016)	30–50
Elingsen in sod. (2016)	157
Kim in sod. (2016)	140
Peters in sod. (2016)	110
Nealer in sod. (2015)	73
Mejeau-Bettez in sod. (2011)	200–500

Vir: Hale in Lutsey, 2018

Treba je upoštevati, da problematični vplivi proizvodnje baterij na okolje nikakor niso povezani samo z emisijami toplogrednih plinov, ampak tudi z drugimi težavami. Tako se večina (70 %) litija v naravi nahaja v slanih jezerih, preostanek pa v kamninah. V glavnem so svetovne zaloge litija omejene na nekaj držav (Argentina, Avstralija, Bolivija, Čile in Kitajska). V Južni Ameriki za pridobivanje 1 t litija porabijo 750 t slaničice. Postopek je ne samo energijsko potraten, ampak povzroča tudi veliko porabo vode. To je še posebno problematično, ker so nahajališča litija pretežno v zelo suhih območjih. Pogoji dela pri pridobivanju litija so tudi škodljivi za zdravje delavcev (Green Car Congress, 2020).

V letu 2019 je bilo 54 % svetovne proizvodnje litija uporabljeno za polnjenje baterij. Cena litija znaša le okrog 1 % cene baterij in zato s stroškovnega vidika ne predstavlja težav, čeprav lahko v prihodnjih letih zaradi naraščajočega povpraševanja pride do sprememb cen (Battery University, 2021).

Poleg litija je v litij-ionskih baterijah največkrat pomembna surovina tudi kobalt, katerega pridobivanje je prav tako problematično. Kobalt pogosto pridobivajo kot stranski izdelek pri proizvodnji bakra in niklja. Za industrijsko pridobivanje kobalta v Avstraliji so pri sistematični oceni učinkov iz celotnega življenjskega cikla (cradle-to-gate) ugotovili, da sta najbolj obremenjujoča za okolje poraba električne energije in posledično povzročene emisije toplogrednih plinov ter razstreljevanje in pri tem nastali kovinski trdni delci. V Avstraliji je proces ekstrakcije kobalta skrbno nadzorovan (Farjana idr., 2019; Nogrady, 2020).

Treba je poudariti, da okrog 60 % svetovne proizvodnje kobalta izvira iz Demokratične republike Kongo. Tudi tam večina (okrog 80 %) proizvodnje poteka v večjih rudnikih na industrijski način in predvidoma nastajajo podobne obremenitve okolja kot v Avstraliji, le da je na razpolago zelo malo podatkov. Okrog 20 % kobalta pa v DR Kongu izkopljejo v majhnih rudnikih, kjer opravljajo delavke, delavci in celo otroci veliko ročnega dela brez ustrezne zaščite in so zato izpostavljeni zelo velikemu zdravstvenemu tveganju (Nogrady, 2020).

Indikativni so rezultati raziskav, opravljenih na območju Katange v DR Kongu, najpomembnejšem svetovnem nahajališču kobalta. Čeprav so bili v biomonitoring vključeni ljudje, ki se poklicno ne ukvarjajo s pridobivanjem kobalta, so raziskave pokazale, da so koncentracije kobalta v urinu tamkajšnje populacije pri odraslih 4,5-krat in pri otrocih 6,6-krat višje kot pri kontrolni skupini ljudi iz neobremenjenega območja. V vzorcih iz okolja so bile koncentracije kobalta od 6- do 40-krat višje kot v vzorcih iz kontrolnega območja. Odrasle osebe so večino kobalta vnesle s hrano (zelenjava, žitarice in ribe), otroci pa z zaužitjem prahu. Podrobni učinki zaužitega kobalta na zdravje še niso znani (Cheyns idr., 2014).

Čeprav je tako iz okoljevarstvenega kot tudi cenovnega vidika pri električnih avtomobilih izpostavljena predvsem proizvodnja baterij, pa ta ne predstavlja edinega problema. Tako iz cenovnega, strateškega kot okolijskega vidika precej skrbi povzročča izdelava permanentnih magnetov (Battery University, 2021). Za tovrstne

magnete se uporabljata kovini iz skupine lantanidov: neodim in disprozij. Velika večina nahajališč teh dveh kovin je na Kitajskem. Ta država z nadziranjem izvoza tudi diktira cene – tako je bil zabeležen velik skok cen tako neodima kot disprozija v letih 2011 in 2012. Poleg tega je pridobivanje zelo problematično za okolje in zdravje delavcev. Pri separaciji lantanidov se izloči precej radioaktivnega torija, nastane pa tudi precej drugih nevarnih odpadkov. Ocenjeno je, da se pri pridobivanju 1 tone lantanidov proizvede kar 2000 ton strupenih odpadkov (Edmondson, 2020).

Nekateri proizvajalci skušajo zato nadomestiti permanentne magnete z rotorskimi navitji. Vendar pa je zaradi boljše učinkovitosti permanentnih magnetov kljub temu v obdobju od 2015 do 2019 delež motorjev s permanentnimi magneti celo nekoliko narasel (z 79 % na 82 %)(Edmondson, 2020). Predvsem so se kot zelo energijsko učinkoviti izkazali magneti iz sintranega neodima, železa in bora (Widmer idr., 2015).

Aktualno je tudi recikliranje litij-ionskih baterij. Načeloma je litij možno reciklirati v neomejenem obsegu, a do sedaj razvite tehnologije recikliranja ne omogočajo pridobivanja dovolj čistega litija za ponovno uporabo v baterijah. Po nekaterih ocenah je tudi z recikliranjem dobljeni litij lahko dražji od litija iz primarnih virov (Battery University, 2021). Z namenom izboljšanja učinkovitosti recikliranja litij-ionskih baterij potekajo sistematično zasnovani raziskovalni projekti tako v ZDA, Veliki Britaniji kot na Japonskem (Nogrady, 2020; Suzuki, 2019; Kunz , 2019; ReLiB, b. d.). Pri tem želijo z recikliranjem katod dobiti sestavine, ki bodo neposredno uporabne za izdelavo novih baterij, tj. brez cenovno zahtevne ponovne predelave. Pri raziskavah bodo pridobili spoznanja, ki bodo omogočila izboljšave konstrukcije baterij v prihodnosti, da jih bo lažje reciklirati (Kunz, 2019). Japonska družba Sumitomo metal mining je razvila proces recikliranja kobalta iz odpadnih baterij, saj gre za precej redko kovino. Pri tem tudi ocenjujejo, da vsaj do leta 2025 še ne bo na razpolago velikih količin odpadnih baterij za recikliranje (Suzuki, 2019).

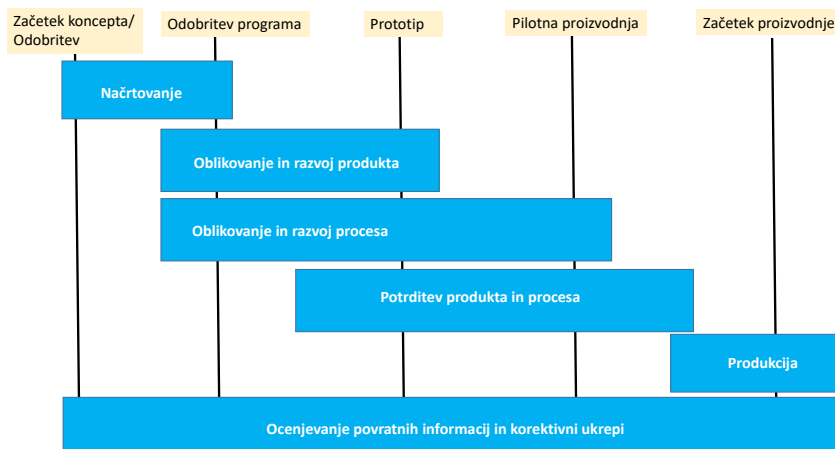
4 Načrtovanje razvoja izdelka

Kot pri drugih izdelkih je tudi pri avtomobilih bistvenega pomena, da izdelek v čim večji meri izpolni pričakovanja kupca. Ena od pomembnih izpostavljenih lastnosti električnih avtomobilov je manjši vpliv na okolje, kot ga povzročajo avtomobili z bencinskimi ali dizelskimi motorji. To je tudi eden izmed ključnih motivov, da se

uporabniki odločijo za električni avtomobil. Zato je seveda v procesu razvoja avtomobila in njegovih komponent pomembno upoštevati okoljske vidike.

Kot strukturiran pristop pri razvoju izdelkov in procesov se je ravno najbolj v avtomobilski industriji uveljavil APQP (Advanced Product Quality Planning). APQP, ki je shematsko prikazan na sliki 6, posveča veliko pozornosti odkrivanju napak ali pomanjkljivosti v zgodnjih fazah razvoja izdelka. Če so napake odkrite v začetnem obdobju, se bistveno zmanjša tveganje in znižajo stroški. Predvsem je problem, če se napake pojavijo šele v fazi, ko je izdelek že na tržišču (Quality-One, 2021). Tako je tudi v razvoju proizvodov poleg stroškovnih vidikov pomembno predvideti tudi vplive na okolje. Tako je smiselno izdelke že v zasnovi oblikovati tako, da jih bo lažje reciklirati, kar je npr. cilj raziskovalnih projektov na področju izboljšanja reciklabilnosti litij-ionskih baterij (Kunz, 2019).

Poleg tega je tudi procese v proizvodnji možno zasnovati s čim manjšimi vplivi na okolje, kot je izogibanje uporabe okoljsko problematičnih materialov – npr. uporaba indukcijskih motorjev namesto motorjev s permanentnimi magneti (Edmondson, 2020) in pa uporaba električne energije iz brezogljčnih virov (Hale in Lutsey, 2018).



Slika 6: Shematski prikaz APQP (Advanced Product Quality Planning)

Vir: Ahmed idr., 2021.

5 Uporaba funkcionalne analize

Funkcionalna analiza (Extended Functional Analyses - XFA) je odlično orodje za široko izvajanje raziskovanja, na osnovi katerega je možno priti do zaključkov glede določitve indikatorjev, ki so potrebni za verifikacijo hipotez in predpostavk (Butler, 1987; Weaver, 2001; Johnson, 2007; Karlson, 2007).

Glavno orodje razširjene funkcionalne analize (XFA) (Butler, 1987) zajemajo enostavne matrike, ki jih sestavlja nabor glavnih sestavnih delov in modulov izdelka ter neodvisne funkcije. Preseke med sestavnim delom strukture izdelka in določeno specifično funkcijo izdelka pa predstavljajo posamezne celice.

Pri uporabi XFA je potrebno razvrstiti sestavne sklope, elemente, module ter analizirane funkcije po hierarhiji (Breiing, 1989; Podinovski, 2000), in sicer na način, da je na levi strani podan seznam glavnih sestavnih modulov oziroma sestavnih delov, na vrhu matrike pa je nabor neodvisnih funkcij izdelka. Neodvisne funkcije se določajo glede na agregirano strukturo izdelka. Velika prednost in dodana vrednost takšnega pristopa je predvsem, da imamo lahko ves čas pregled nad izdelkom in tudi ves čas lahko analiziramo razvoj izdelka in ne šele v zaključni fazi, ko je izdelek v celoti koncipiran in končan, sicer bi morali razvoj izdelka predčasno končati, potem pa ponoviti razvojni proces in celotno analizo od začetka.

Dodana vrednost in prednost razširjene funkcionalne analize je v tem, da v začetnih razvojnih fazah ni potrebna zelo velika natančnost: kar pomeni, da niso potrebne natančne specifikacije sestavnih delov, ne potrebujemo podatkov o njihovih lastnostih, niti niso bistvene informacije o vrednostih posameznih sklopov. Tu izvedemo tako imenovano 'front to end' analizo (Butler, 1987; Blanchard, 1986). V začetni fazi, ko analiziramo koncept nekega izdelka, je zelo pomembno, kako določimo robne pogoje le-tega.

Prikaz uporabe te metode bo izveden na konkretnem primeru električnega osebnega vozila. Torej:

- 1) Osnovno vozilo je vozilo na električni pogon.
- 2) Izvedba je osebni avto.

- 3) Omejitev najvišje nabavne cene sestavnih sklopov in sistemov na cca. 10.000 EUR,
- 4) Struktura vozila se bo analizirala na osnovi kategorij ABC, ki so razdeljene na 8 ključnih funkcij:

A Vozne lastnosti

- A1** – Doseg vožnje
- A2** – Hitrostne lastnosti
- A3** – Pospeški
- A4** – Zavorne lastnosti

B Udobnost vožnje

- B1** – Upravlјivost
- B2** – Udobnost

C Energetske lastnosti

- C1** – Ekonomičnost
- C2** – Hitrost polnjenja

- 5) Pomembnost funkcij je ovrednotena od 1 do 10, pri čemer pomeni 1 najnižjo prioriteto, 10 pa najvišjo prioriteto.

5.1 Izhodišča

Za uspešno uporabo metode XFA ne potrebujemo velikega števila informacij, in sicer zadostujejo podatki o uporabi vozila (podatki o eksploataciji), razvojni podatki, podatki, pridobljeni med testiranjem vozila, in tudi podatki o poteku proizvodnje vozila. Pravzaprav je tak pristop pri procesu oblikovanja koncepta vozila običajen, saj je povsem neodvisen od vrste ali namena vozila. Bistven problem pri tem pa predstavlja dejstvo, da so tovrstni podatki nesistemizirani, nestrukturirani in kot taki tudi v veliki meri tudi nezanesljivi. Vsa ta dejstva pa bistveno vplivajo na njihovo uporabnost in tudi na kvaliteto analiz.

Praktična uporabnost metode XFA v fazi razvoja glede na zanesljivost posameznih komponent in posredno tudi vzdrževanja vozila oziroma stroškov, ki pri tem nastanejo, je bila implementirana na primeru električnega avtomobila.

Osnovni podatki so pridobljeni na vzorcu enakih avtomobilov ($N=10000$) v časovnem obdobju $T=3$ let, ki so v uporabi na območju EU. Skupno število okvar n znaša 810. Pri tej analizi se predpostavlja eksponentna razporeditev slučajnosti okvar za vozilo kot celoto, identično pa velja tudi za vse ključne sisteme in komponente, ki sestavljajo vozilo.

Iz tabele 3 so razvidni: nabor podatkov za ključne sisteme in komponente vozila, pogostost okvar (λ), zanesljivost sestavnih delov in sistemov (R) in pa čas (MTTR-Mean Time to Repair), ki je povprečno potreben za popravilo posameznega sestavnega dela ali sistema.

Tabela 3: Osnovni podatki

Glavni sklopi vozila	Okvare v (%)	Število okvar (n)	Pogostost okvar $\lambda \times (10E-6)/h$	Zanesljivost (R)	MTTR (h)
Šasija	8.0	81	1.771	0.859	1.91
Kolesa	2.0	32	0.410	0.968	1.52
Elektromotor	17.0	173	2.592	0.797	2.62
Pogonski sklop	13.2	110	2.289	0.816	3.13
Krmilni sistem	4.0	57	0.837	0.933	2.24
Elektronika	6.0	43	0.618	0.945	2.85
Zavorni sistem	16.8	13	2.269	0.812	1.40
Baterija	7.0	76	1.059	0.915	2.08
Krmilna elektronika	16.0	161	2.890	0.796	1.17
Asistenčni sistemi	10.0	64	1.051	0.915	2.49
Σ	100.0	810			

5.2 Definicija začetne matrike in matrike vrednosti

5.2.1 Osnovne predpostavke ter vrednostna analiza

Začetna matrika se oblikuje s tem, da definiramo korelacije med posameznimi sklopi in sistemi z najpomembnejšimi karakterističnimi funkcijami vozila. Pri tem gre za precej grobo definiranje korelacij, kajti večja natančnost bi povzročila samo večjo nepreglednost in težave, rezultat pa bi bil, da ne bi dosegli namena analize.

Črka "x" v matriki 1 predstavlja korelacije med posameznimi sklopi in sistemi z najpomembnejšimi funkcijami vozila.

Začetna matrika daje razvojniku – konstruktorju in pa nabavnikom in logistom zelo jasno sliko o strukturi vozila. To omogoča nabavni službi, ki skrbi za upravljanje oskrbovalnih verig, da s tem dobi okvirno predstavo o relativni pomembnosti vsakega posameznega sklopa in sistema glede na določeno funkcijo. Z drugimi besedami, s tem dobimo zelo pomembno informacijo glede stopnje kritičnosti vsakega elementa v strukturi vozila in tudi takojšna informacijo glede izbora sestavnih delov, ki so bistveni za določeno funkcijo, in tudi to, katera funkcija je v dani strukturi vozila najbolj kompleksna.

Elektromotor, krmilno elektroniko, baterijo ter programsko opremo smo v matriki strukture ovrednotili kot najpomembnejše elemente ter jim dali pomembnost (1), najnižjo pomembnost (5) pa smo dodelili krmilnemu sistemu (volanu itd.). Poudariti pa je potrebno, da četudi smo mu podelili najnižjo pomembnost, to nikakor ne pomeni, da je nepomemben.

Prednost začetne matrike (tabela 4) je, da nam omogoča paralelno analizo do 100 korelacij med funkcijami vozila (10) ter sklopi in sistemi strukture vozila (10). Oceno izvedemo na način, da variramo s strukturo vozila. Pri izbiri raznih opcij pa zasledujemo cilj v smislu, da pridemo do tiste strukture najpomembnejših sklopov in sistemov (elektromotor, baterija, zavorni sistem, krmilna elektronika ...), ki zadostijo kriterijem glede želenih karakteristik vozila. Začetna matrika, ki smo jo definirali na omenjeni način, nam sicer podaja relativno omejeno informacijsko vsebino, odpre pa nam možnost, da vsaki funkciji iz skupin A,B,C dodelimo indeks relativne pomembnosti in s tem razširimo funkcionalno analizo v obliko matrike vrednosti.

5.3 Matrika strukture: začetna matrika

Matrika relativnih vrednosti nam podaja bistveno boljšo informacijsko vsebino, kot jo ima začetna matrika. Kot taka nam daje tudi bolj informativno sliko. Vsota indeksa pomembnosti po vrsticah predstavlja indeks relativne pomembnosti sklopov in sistemov. Indeks relativne pomembnosti sklopov in sistemov omogoča razvojnemu

inženirju – konstruktorju, tj. tistemu, ki odloča o nabavi, da določi strukturo dobave, dobavitelje in način dobave.

Tabela 4: Začetna matrika – matrika strukture

STRUKTURNE KOMPONENTE VOZILA	FUNK.	A1	A2	A3	A4	B1	B2	C1	C2	ΣF	Stopnja pomn.
		Deseg	Hitrost	Pospeski	Zavorne lastnosti	Upravljalnost	Udob	Ekono.	Hitr. Polnj.		
Šasija		X	X	X	X	X	X	-		6	4
Kolesa		X	X	X	X	X	X	-	-	6	2
Elektromotor		X	X	X	X	X	X	-	-	6	1
Pogonski sklop		X	X	X	-	X	-	X	X	6	3
Krmilni sistem			-	-	-	X	X	-	-	2	5
Programska oprema		X	X	X	-	-	-	X	X	5	1
Zavorni sistem			-	-	X	X	-	-	X	3	2
Baterija		X	-	X	-	-	-	X	X	4	1
Krmilna elektronika		X	X	X	X			X	X	6	1
Asistenčni sistemi			-	-	-	X	X	X	-	3	3
Σ KOMPONENT		7	6	7	6	6	4	5	4		

Ne glede na to, da se je stopnja pomembnosti spremenila, ostaja vrstni red najpomembnejših sklopov in sistemov še vedno nespremenjen.

Definicija faktorjev težavnosti oziroma indeksa pomembnosti funkcij je precej subjektivna, saj bazira na hevrističnih metodah in izkušnjah. Prednost le-te je, da v analizi, kjer je osnovni namen pridobiti grobo oceno, vpliv teh indeksov ni prevladujoč. Zanimivo je, da tudi v primeru, da bi vse funkcije A, B, C imele enake vrednosti indeksa pomembnosti, to ne bi imelo nobenega vpliva na njihovo razporeditev v matriki vrednosti (tabela 5).

Tabela 5: Matrika vrednosti

STRUKTURNE KOMPONENTE VOZILA	FUNK.	A1	A2	A3	A4	B1	B2	C1	C2		Stopnja
		Doseg	Hitrost	Pospeški	Zavorne lastnosti	Upravljalnost	Udob	Ekono.	Hitr. Polnj.	ΣF	pombn.
Šasija		4	8	3	2	2	7	-	-	26	5
Kolesa		7	7	9	8	5	7	-	-	43	2
Elektromotor		7	7	9	7	5	4	-	-	39	3
Pogonski sklop		8	7	9	-	7	-	5	7	43	2
Krmilni sistem		-	-	-	-	7	7	-	-	14	7
Programska oprema		7	7	9	-	-	-	5	7	35	4
Zavorni sistem		-	-	-	9	8	-	-	-	17	6
Baterija		9	-	8	-	-	-	9	9	35	4
Krmilna elektronika		7	8	9	8	-	-	8	9	49	1
Asistenčni sistemi		-	-	-	-	8	9	9	-	26	5
Σ KOMPONENT		7	6	7	6	6	4	5	4		

5.4 Stroškovna (Cost/Benefit) analiza

Z uporabo XFA metode pridemo do matrike, prikazane v tabeli 6, ki nam omogoča primerjavo med indeksom pomembnosti posameznih funkcij in relativnimi stroški. Bistveno je, da za izvedbo primerjave potrebujemo bistveno več podatkov. Poleg indeksa pomembnosti posamezne funkcije je treba vsem ključnim sklopom in sistemom določiti tudi ceno.

Iz cost/benefit matrike (tabela 6) razberemo, da so razvidne cene ključnih sklopov in sistemov vozila in tako lahko grobo ocenimo vsako funkcijo (**Σ KOMPONENT**). S tem dobimo tudi orientacijo o cenovnih okvirih posamezne funkcije. Ta je potem tudi odlično orodje za oddelek nabave, ki s tem dobi smernice za nadaljnjo optimizacijo funkcij vozila. Razmerje med sredstvi, ki smo jih investirali (stroški), in dobičkom (koristi) oziroma tako imenovano 'cost/benefit – razmerje' dobimo tako, da izračunamo kvocient vrednosti vsakega sklopa z indeksom pomembnosti le-tega.

Stolpec (ΣIP) predstavlja ponovljene vrednosti indeksov pomembnosti sklopov in sistemov vozila A, B, C, naslednji stolpec pa predstavlja kumulativno 'cost/benefit razmerje' posameznih sklopov in sistemov. Manjša kot je vrednost, večja je korist posameznih sklopov in sistemov za posamezno funkcijo vozila.

Tabela 6 : Matrika analize med stroški in koristmi (cost/ benefit matrika)

	FUN.	A1	A2	A3	A4	B1	B2	C1	C2		Stroški / Koristi	Stopnja Pomemb.
STRUKTURNE KOMPONENTE VOZILA	Index Cena EUR	DOSEG	HITROST	POSPESEK	ZAV. L.	UPORA V.	UDOB.	EKONO.	HITROST	ΣF		
Šasija	1200	122	81	154	213	509	319	-	-	26	46,2	7
Kolesa	600	20	110	120	150	120	90	-	-	43	13,9	1
Elektromotor	750	160	70	80	60	30	70	-	-	39	19,2	3
Pogonski sklop	630	80	70	190	-	70	-	105	70	43	14,6	2
Krmilni sistem	320	-	-	-	-	100	120	-	-	14	22,8	5
Programska oprema	1000	157	70	120	-	-	-	150	170	35	28,5	1
Zavorni sistem	700	-	-	-	290	80	-	-	-	17	41,2	6
Baterija	2200	1100	-	120	-	-	-	230	350	35	62,8	9
Krmilna elektronika	1100	270	140	140	110	-	-	210	340	49	22,4	4
Asistenčni sistemi	1500	-	-	-	-	270	178	320	-	26	57,7	8
Σ KOMPONENT	10000	7400	6300	7400	4350	5700	4370	6430	4930			
Stroški funkcije		1909	541	924	823	1179	777	1015	930			
Stopnja pomemb.		7	2	4	1	8	3	6	5			

XFA metoda nam omogoča sledenje spremembam strukture in funkcij vozila. Iz matrike 3 (tabela 6) in matrike 2 (tabela 5) lahko razberemo stopnjo pomembnosti posameznih sklopov in sistemov vozila (baterije, elektromotorja, krmilne elektronike, programske opreme – 1, zavornega sistema in pogonskega sklopa – 2). Tu so bistvene le izbrane funkcije ter spremljajoči sklopi in sistemi vozila. Matrika 3 (tabela 5) podaja informacijo o cenah sklopov in sistemov vozila. Na tej osnovi se izračuna indeks med stroški in koristmi (cost/benefit index) posameznih sklopov glede na funkcijo, ki pa osvetli zadevo s povsem drugega vidika. Iz tega prikaza je razvidno, da imajo kolesa najboljši 'cost benefit indeks' 13,7 in stopnjo pomembnosti 1, baterija pa 'cost benefit index' 62,8 in stopnjo pomembnosti 9 itd.

Če pa analiziramo še vse funkcije v matriki 3 (tabela 5), pridemo do zaključka, da sta funkciji **A1 – doseg** in **B1 – upravljalnost vozila** najdražji. To pa je tudi izhodišče za koncipiranje oskrbovalne verige, saj je osnova za optimizacijo stroškov v smislu optimiranja – oskrbovalnih, proizvodnih stroškov uporabe za funkcijo **B1 – upravljalnost vozila**, in tako dokaj enostavno pridemo do ugotovitve, da ima najmanjše cost/benefit razmerje in je istočasno tudi najdražja funkcija. Ta informacija nam je vodilo, da je tu potrebna optimizacija oskrbovalne verige, torej so nujno potrebne spremembe v smislu zmanjšanja stroškov – z drugimi besedami: iskanje alternativnih dobaviteljev in logističnih poti za sklope in sisteme, ki bistveno vplivajo na to funkcijo, oziroma nujno je treba izboljšati cost/benefit indeks.

5.5 Uporaba metode XFA pri vzdrževanju

Dejstvo je, da je vzdrževanje vozila zelo pomemben faktor pri eksploataciji vozil in je tudi eden najbolj odločilnih faktorjev pri odločitvi o nakupu določenega tipa vozila. Metoda XFA oziroma metoda razširjene funkcionalne analize nam predstavlja odlično orodje za analizo vzdrževanja, posredno pa tudi daje sliko o kritičnih sklopih in sistemih vozila, saj nam omogoča analizo porazdelitve povprečnega časa korektivnega vzdrževanja komponent in sistemov vozila MCMH (Mean Corrective Maintenance Hours). Ta analiza nam posredno daje informacijo o ustreznosti obstoječih oskrbovalnih verig. Osnovni element te analize je izdelek med pogostostjo okvar (λ) in povprečnim časom za odpravo napak (MCMH) ter indeksa pomembnosti posamezne funkcije vozila. Dobljen rezultat predstavlja informacijo o stopnji težavnosti vzdrževanja vozila. Če imajo določeni sklopi ali sistemi visoke vrednosti tega indeksa, je to jasen signal konstrukterju – projektantu in nabavni službi, da morajo zadevo optimirati, iskati ustrežnejše rešitve pri vzdrževanju oziroma iskati možnosti pri alternativnih dobaviteljih, ki bodo zmožni zagotavljati dovolj zanesljive sestavne sklope in sisteme vozila. Informacija o težavnosti vzdrževanja (ΣR) nam pove, kakšno je stanje sklopov in sistemov glede na vzdrževanje, in predstavlja pogostost okvar oziroma število okvar na milijon ur obratovanja, kar je razvidno iz tabele 3.

Tabela 7: MCMH – Matrika analize časa popravila

	FUNKC.	A1	A2	A3	A4	B1	B2	C1	C2	Mera	Renta
STRUKTURNE	Index	8	5	4	9	8	7	5	8	težav.	bilnost
KOMPONENTE VOZILA	(MCMH)x (10E-6)/h	λ Doseg	Hitr ost	Pospeš ki	Zavorn e lastnos ti	Upravl jivost	Udob	Ekono	Hitr. Polnj.	vzdrž. ΣR	$\Sigma R/C$
Šasija	1.91 x 1.77	30	25	14	60	20	27	-	-	176	0.01283
Kolesa	1.52 x 0.41	6	5	7	6	3	5	-	-	32	0.02000
Elektromotor	2.62 x 2.59	54	54	67	67	40	54	-	-	336	0.01535
Pogonski sklop	3.13 x 2.28	57	57	42	-	52	-	43	57	308	0.01783
Krmilni sistem	2.24 x 0.82	-	-	-	-	14	14	-	-	28	0.02400
Elektronika	2.85 x 0.62	14	14	17	-	-	-	10	14	59	0.01037
Zavorni sistem	1.40 x 2.26	-	-	-	34	36	-	-	-	70	0.01050
Baterija	2.08 x 1.06	23	-	30	-	-	-	23	23	99	0.01260
Krmilna elektronika	1.17 x 2.89	38	32	33	25	-	-	21	45	194	0.00233
Asistenčni sistemi	2.49 x 1.05	-	-	-	-	18	26	34	-	78	0.02800
MTTR		15.7	11.5	10.5	11.3	10.7	14.5	12.6	10		
Zmanjšanje vrednosti funkcij po okvarah		31,4	100	105	92,7	68,2	116	75,6	60		
Stopnja pomembnosti		1	5	6	4	1	8	2	3		

Iz tabele 7 lahko razberemo, da imata baterija (2,08) in šasija (1,91) skoraj enak MCMH, pri čemer pa je težavnost vzdrževanja za baterijo 99, za šasijo pa znaša 167, torej je skoraj 2-x višja.

Informacija o vrednosti težavnosti vzdrževanja je osnova za potrebne spremembe v oskrbovalni verigi, ki direktno vplivajo na izboljšanje koncepta vzdrževanja vozila. Pri tem pa stroški sklopov in sistemov predstavljajo indeks stroškov, ki so rezultat modifikacij in izboljšav koncepta vozila. Glede na zanesljivost in vzdrževanje so vsekakor bistveno bolj primerni tisti sklopi in sistemi, katerih koeficient $\Sigma R/C$ je čim manjši. Podani podatki nam omogočajo tudi podrobno analizo, kakšna je težavnost vzdrževanja posameznih funkcij. Časi, ki so potrebni za vzdrževanje, so prikazani v tabeli 3. Najbolj primerne so tiste opcije, kjer se vrednost funkcije minimalno zniža, kot je razvidno iz tabele 7. V našem primeru je to funkcija **A1 – dosegi**, ki ima razred 1.

5.6 Logistika, dostopnost sklopov in sistemov – indeks oskrbe

Matriko vrednosti lahko uporabimo pri analizi indeksa podpore oskrbe v relaciji s posameznimi funkcijami vozila. Ta indeks izračunamo tako, da pomnožimo časovno pogostost okvar sklopov in sistemov ter njihovo nabavno ceno. Čim večja je vrednost indeksa, tem dražja je oskrba.

Tabela 8: Matrika indeksa oskrbe

	FUNKCIJ E	A1	A2	A3	A4	B1	B2	C1	C2	
STRUKTURNE	Ind. Pomebn.	8	5	4	9	8	7	5	8	Index.
KOMPONENTE VOZILA	Ind. oskrbe ($\lambda \times C$)	Doseg	Hitr.	Posp.	Zavor. Lastn.	Uprav.	Udob.	Ekon.	Hitr. Polnj.	kum. podpore
Šasija	0.01061	0.006	0.006	0.008	0.007	0.005	0.006	-	-	0.038
Kolesa	0.000797	0.007	0.006	0.009	0.007	0.005	0.006	-	-	0.040
Elektromotor	0.07251	0.531	0.580	0.720	0.652	0.438	0.579	-	-	3.500
Pogonski sklop	0.02760	0.220	0.220	0.341	-	0.261	-	0.165	0.220	1.427
Krmilni sistem	0.00164	-	-	-	-	0.234	0.130	-	-	0.364
Elektronika	0.00489	0.039	0.039	0.049	-	-	-	0.029	0.039	0.195
Zavorni sistem	0.0183	-	-	-	0.028	0.147	-	-	-	0.175
Baterija	0.00316	-	-	-	-	-	-	0.623	0.745	1.368
Krmilna elektronika	0.0868	0.694	0.761	0.112	0.213	-	-	0.520	0.543	2.843
Asistenčni sistemi	0.0015	-	-	-	-	0.006	0.245	0.031	-	0.282
OSKRBA		1.497	1.612	1.239	0.907	1.069	0.966	1.368	1.547	

Indeks podpore v relaciji s funkcijami vozila podaja informacijo o vplivu logistike in nabave na sklope in sisteme. To pa nam daje možnost, da že v zelo zgodnji fazi, ko projektiramo, konstruiramo ter koncipiramo posamezne funkcije vozila in z njimi povezane sklope in sisteme, definiramo tudi strukturo oskrbovalne verige. V primeru, da pri tem upoštevamo še indeks pomembnosti posamezne funkcije, dobimo odlično orodje za oceno kritičnosti posamezne funkcije vozila glede na željene karakteristike le-tega. Iz tabele 8 je razviden indeks oskrbe, ki predstavlja vsoto vrednosti vsake vrstice. S pomočjo tega pridemo do ugotovitve, da so glede zanesljivosti in vzdrževanja najbolj problematični elektromotor, krmilna elektronika in baterija. To je bilo tudi pričakovano. Pri funkcijah pa se največji problemi pojavljajo pri hitrosti polnjenja baterije, dosegu in hitrosti.

Vrednost indeksa podpore podaja informacijo o zalogah sklopov in sistemov delov in korelacijo med njihovimi cenami ter stroški odkrivanja odpovedi in napak funkcij vozila s pomočjo definiranih diagnostičnih postopkov.

6 Zaključek

Osnovni namen je bil prikazati uporabo metode razširjene funkcionalne analize kot orodje, ki nam daje možnost pozitivnega vplivanja na odločitve in zaključke glede definiranja načina konstruiranja, vzdrževanja ter koncipiranja oskrbovalne verige in s tem obvladovanja stroškov v že zelo zgodnjih fazah projektiranja in oblikovanja koncepta novega ali spremenjenega izdelka. Medsebojna korelacija faktorjev analiziranih funkcij nam daje sliko o potencialnih težavah in problemih ter možnost, da le-te minimiziramo z ustrežno selekcijo strukture sklopov in sistemov, njihovih dobaviteljev in pa koncepta upravljanja oskrbovalnih verig. Uporabljena metoda razširjene funkcionalne analize je torej odlična osnova za strateške odločitve, za odločitve glede optimiranja koncepta oskrbovalnih verig, stroškovne analize in tudi za odločitev glede marketinškega pristopa.

Literatura

- Ahmed, M. B., Majeed, F., Sanin, C. in Szczerbicki, E. (2021). Experience –Based Product Inspection Planning for Industry 4.0. *Cybernetics and Systems*, Vol. 52, str. 296–312. doi/full/10.1080/01969722.2020.1871222
- Ambrose, H. in Kendall, A. (2016). Effects of battery chemistry and performance on the life cycle greenhouse gas intensity of electric mobility. *Transportation Research Part D* 47, str. 182–194.
- ARSO (2020). Naše okolje, Bilten Agencije RS za okolje – januar - november 2021.
- Battery University (2021). BU-308: Availability of lithium. Pridobljeno 5. 1. 2022 na <https://batteryuniversity.com/article/bu-308-availability-of-lithium>
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A.; Diez-Roux, A. V., Holguin, F. Hong, Y., Luepker, R. V. Mittleman, M. A., Peters, A., PhD; Siscovick, D., Smith, S. C. Jr, Whitsel, L., Kaufman, J. D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease – An update to the scientific statement of the American Heart Association. *Circulation*, Vol. 121, pp. 2331–2378.
- Butler, R. (1987). *Extended Functional Analysis, Logistics Engineering*, Institute of Industrial Systems Engineering, Novi Sad and Institute of Nuclear Sciences "Boris Kidrič" - Beograd-Vinča, Dubrovnik
- Blanchard, B. (1986). *Logistics Engineering and Management*, Third Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs
- Breiting, A. Flemming, M. (1989). *Theorie und Methoden des Konstruierens*, Springer-Verlag, Berlin, New York, Tokio.
- Brawn, A. C. (2014). "Article: The Smiling Curve". Digital Signage Experts Group.
- Cheyns, K., Lubaba Nkulu, C. B., Kabamba Ngombe, L., Ngoy Asosa, J., Haufroid, V., De Putter, T., Nawrot, T., Muleka Kimpanga, C., Luboya Numbi, O., Kabyla Ilunga, B., Nemery, B. in

- Smolders, E. (2014). Pathways of human exposure to cobalt in Katanga, a mining area of D.R. Congo. *Science of the Total Environment*, Vol. 490, str. 313–321.
- Curry Brown, A. (2013). Health Effects of particulates and black carbon. Transport and clean air seminar, U.S. EPA, December 2013. Pridobljeno 17. 1. 2022 na <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-05/documents/health-effects.pdf>
- Daimler (2022). 1885–1886: The first automobile: Daimler Company, Company History. Pridobljeno 17. 1. 2022 na <https://www.daimler.com/company/tradition/company-history/1885-1886.html>
- Duclos, L. K., Vokurka, R. J., Lummus, R. R. A conceptual model of supply chain flexibility, *Industrial Management & Data Systems*, 2003, 103 (6), 446–456.
- Dunn, J. B., Gaines, L., Kelly, J. C., Gallagher, K. G. (2016) Life Cycle Analysis Summary for Automotive Lithium-Ion Battery Production and Recycling. In: Kirchain R.E. et al. (eds). REWAS 2016. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48768-7_11
- Edmondson, J. (2020). Will Rare Earths be Eliminated in Electric Vehicle Motors? IDTechEx, Nov 02, 2020. Pridobljeno 10. 1. 2022 na <https://www.idtechex.com/en/research-article/will-rare-earth-be-eliminated-in-electric-vehicle-motors/21972>
- EEA (2021). Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe. Pridobljeno 5.1. 2022 na: <https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>
- Elingsen, L. A.-W., Singh, B. in Stromman, A. H. (2016). The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. *Environ.Res.Lett*, 11, 054010.
- EPEC (2021). Battery cell comparison. Epec Engineered Technologies. Pridobljeno 30. 12. 2021 na <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>
- EVgo (2022). Types of Electric Vehicles. EVgo Fast Charging. Pridobljeno 17. 1. 2022 na <https://www.evgo.com/ev-drivers/types-of-evs/>
- Farjana, S. H., Huda, N. in Mahmud, M. A. P. (2019). Life cycle assessment of cobalt extraction process. *Journal of Sustainable Mining*, Vol. 18(3), str. 150–161.
- Guarnieri, M. (2012) "Looking back to electric cars". Proc. HISTELCON 2012 – 3rd Region-8 IEEE HISTORY of Electro – Technology Conference: The Origins of Electrotechnologies: #6487583. doi:10.1109/HISTELCON.2012.6487583. ISBN 978-1-4673-3078-7.
- Green Car Congress (2020). Roskill sees recovery in lithium industry buoyed by demand from rechargeable battery applications. 25 November 2020. Green Car Congress. Pridobljeno 9.1. 2022 na <https://www.greencarcongress.com/2020/11/20201125-roskill.html>
- Hale, D. in Lutsey, N. (2018). Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions. ICCT (The International Council on Clean Transportation), February 2018. Pridobljeno 5. 1. 2021 na https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG_ICCT-Briefing_09022018_vF.pdf
- Hao, H., Mu, Z., Jiang, S., Liu, Z., Zhao, F. (2017). GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China. *Sustainability*, 9(4), 504.
- Kim, H. C., Wallington, T. J., Arsenaault, R., Bae, C., Ahn, S. in Lee, J. (2016). Cradle-to-Gate Emissions from Commercial Electric Vehicle Li-ion Battery: A Comparative Analysis. *Environ.Sci.Technol.* 50(14), str. 7715–7722.
- Johnson, P., Lagerstrom, R., Narman, P., Simonsson, M. :System Quality Analysis with Extended Influence Diagram, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2007
- Karlson, U.: Service Based Manufacturing Strategies Implication for Product Development, Production and Service Operations in Global Companies, West Hartford, 2007
- Kunz, T. (2019). DOE launches its first lithium-ion battery recycling R&D center: ReCell. Argonne National Laboratory. Pridobljeno 12.1. 2022 na <https://www.anl.gov/article/doe-launches-its-first-lithium-ion-battery-recycling-rd-center-recell>
- Kraljič, P. (1983). Processing must become supply management. *Operations Strategy*. Harvard Business review.

- Majeau-Bettez, G., Hawkins, T. R. in Stromman, A. H. (2011). Life CyCLE Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles. Supporting Information. *Environ.Sci.Technol.* 45(10), str. 4548–4554.
- Message, M. (2017). Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles, Transport & Environment. Pridobljeno 5. 1. 2022 na <https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/TE%20-%20draft%20report%20v04.pdf>
- Nealer, R., Reichmuth, D. in Anair, D. (2015). Cleaner cars from cradle to grave – How electric cars beat gasoline cars on lifetime global warming emissions. Union of Concerned Scientists, November 2015. Pridobljeno 27. 1. 2020 na <https://www.ucsusa.org/sites/default/files/attach/2015/11/Cleaner-Cars-from-Cradle-to-Grave-full-report.pdf>
- Nogrady, B. (2020). Cobalt is critical to the renewable energy transition. How can we minimize its social and environmental cost. May, 14, 2020. *Ensie.* Pridobljeno 10. 1. 2022 na <https://ensia.com/features/cobalt-sustainability-batteries/>
- Owning an electric car (2010–11). *Electric Car History.* Pridobljeno 17. 1. 2022 na <https://web.archive.org/web/20140105043545/http://www.owningelectriccar.com/electric-car-history.html>
- Panasonic Industry (b. d.) Lithium Ion Batteries. Panasonic Industry: Industrial Devices & Solutions. Pridobljeno 30. 12. 2021 na <https://industrial.panasonic.com/ww/products/pt/lithium-ion>
- Peters, J.F., Baumann, M., Zimmermann, B., Braun, J. in Weil, M. (2017). The environmental impact of Li-ion batteries and the role of key parameters – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, str. 491–506.
- Podinovski, V. V. (2000). An Extended maximin Approach for Decision Analysis with Uncontrollable Factors, University of Warwick, UK, *Journal of the Operational Research Society*, pages: 720–728.
- Quality-One (2021), Advanced Product Quality Planning (APQP), Q-1, Quality-One, International Discover the Value, Pridobljeno 13. 1. 2022 na: <https://quality-one.com/apqp/>
- ReLiB (n. d.). Reuse & Recycling of Lithium-ion Batteries. The ReLiB Project – Our Vision. The Faraday Institution. Pridobljeno 12. 1. 2022 na <https://relib.org.uk/>
- Ricoh (b. d.) Product Life-cycle Environmental Impact Assessment Technology. Ricoh –imagine-change. Pridobljeno 30. 12. 2021 na https://www.ricoh.com/technology/tech/063_1ca
- Rolander, N., Starn, J., Behrmann, E. (2018). Lithium Batteries' Dirty Secret: Manufacturing Them Leaves Massive Carbon Footprint. *Industry Week*, Blomberg, Oct. 16, 2018. Pridobljeno 7. 1. 2020 na <https://www.industryweek.com/technology-and-iiot/article/22026518/lithium-batteries-dirty-secret-manufacturing-them-leaves-massive-carbon-footprint>
- Romare, M. in Dahlöf, L. (2017). The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. © IVL Swedish Environmental Research 2017. Pridobljeno 22. 1. 2020 na <http://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning--innovation/transporter/c243-the-life-cycle-energy-consumption-and-co2-emissions-from-lithium-ion-batteries-.pdf>
- Shin, N., Kraemer, K. L., Dedrick, J. (2012). Value Capture in the Global Electronics Industry: Empirical Evidence for the “Smiling Curve” Concept. *Industry and Innovation*, 19(2), 89–107.
- Suzuki, T. (2019). Milestone reached in the recycle of cobalt from spent EV batteries. *Nikkei Asia.* Pridobljeno 12. 1. 2022 na <https://asia.nikkei.com/Business/Markets/Commodities/Milestone-reached-in-the-recycle-of-cobalt-from-spent-EV-batteries>
- U. S. Department of Energy (b. d. a). Plug-in hybrids. www.fueleconomy.gov – the official U.S. government source for fuel economy information. Pridobljeno 17. 1. 2022 na <https://www.fueleconomy.gov/feg/phevtech.shtml>
- U.S. Department of Energy. How Do All-Electric Cars Work? Alternative Fuels Data Center. U.S. Department of Energy. Pridobljeno 17. 1. 2022 na <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>

- U.S. Department of Energy (b.d. b). How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen? Alternative Fuels Data Center. U.S. Department of Energy. Pridobljeno 17. 1. 2022 na <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>
- Widmer, J. D., Marin, R. in Kimiabeigi, M. (2015). Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. *Sustainable Materials and Technologies*, Vol. 3, str. 7–13.
- Wolfram, P. in Wiedmann, T. (2017). Electrifying Australian transport: Hybrid life cycle analysis of a transition to electric light-duty vehicles and renewable electricity. *Applied Energy*, 206, str. 531–540.
- Weaver, B. A., Westphal, A. J.(2001). Extended Analysis of the Trek Ultraheavy Collector, Space Science Laboratory, University of California, Berkley.
- Zhang, J., Wei, Y. in Fang, Z. (2019). Ozone Pollution: A Major Health Hazard Worldwide. *Front.Immunol.* <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.02518>