

# AGILNI RAZVOJ KOMPLEKSNIH MEHATRONSKIH SISTEMOV

Damijan Zorko, Borut Černe, Jože Tavčar, Ivan Demšar

## Izveček:

Današnji hitro se razvijajoči in spreminjajoči trg narekuje nenehne spremembe konstrukcijskih zahtev med razvojnim procesom nekega izdelka. Kako bo sprememba zahtev vplivala na razvojni proces, je odvisno od kompleksnosti izdelka in razvojne faze, v kateri se sprememba zahtev pojavi. Principi agilnosti in metode, ki te principe upoštevajo, pomagajo pri uspešnem uvajanju sprememb v procesu razvoja izdelka. V prispevku so podane smernice za razvoj kompleksnih mehatronskih izdelkov z upoštevanjem principov agilnosti. Smernice so bile postavljene na podlagi kritičnega pregleda razvojnega procesa pogona e-kolesa, ki je v letu 2020 prejel zlato priznanje za inovativnost Gospodarske zbornice Slovenije (GZS).

## Ključne besede:

agilne metode, agilni razvoj proizvodov, konstruiranje, e-mobilnost, e-kolo

## 1 Uvod

Konkurenca na svetovnem trgu zahteva funkcionalne izdelke vedno večje kompleksnosti, krajši čas dobave in nižje stroške. Glavni izziv pri procesu razvoja izdelka je, kako narediti inženirske ekipe bolj učinkovite, inovativne in hkrati skrajšati čas razvoja izdelka. V zadnjih dveh desetletjih sta se pri razvoju izdelkov uspešno uporabljali metodologija sočasnega inženirstva in vitka metodologija [1, 2], kljub temu še vedno ostaja več izzivov pri optimizaciji procesa razvoja izdelkov. Agilni razvoj se je izkazal kot zelo uporabno orodje pri razvoju programske opreme [3], pri razvoju fizičnih izdelkov pa je bilo do sedaj mogoče opaziti le omejeno uporabo te metodologije.

Agilne metode so se pojavile v sredini 80. let na področju programske opreme. Leta 2001 je skupina 17 razvijalcev programske opreme formulirala t. i. Agilni manifest [4] z opisom osnovnih pristopov, manifest pa dopolnjuje 12 principov agilnosti. Pri agilnosti gre za sposobnost hitrega odzivanja na spremembe, kar je še posebno pomembno v negotovem turbulentnem okolju globalnega trga. Poznanih je več tehnik, ki upoštevajo principe agilnosti, med katerimi velja omeniti metodo Scrum, »ekstremno programiranje« in funkcijsko voden razvoj (ang. *feature-driven development*).

**Dr. Damijan Zorko**, mag. inž., **dr. Borut Černe**, mag. inž., oba Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; **izr. prof. dr. Jože Tavčar**, univ. dipl. inž., Univerza v Lundu, Švedska; **dr. Ivan Demšar**, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

Najpogosteje uporabljena metoda je Scrum (Schwaber et al. [5]), ki je namenjena za reševanje zapletenih, spremenljivih razvojnih problemov. Agilne metode so bile razvite in najprej uporabljane na področju razvoja programske opreme, zato je izven tega področja potrebno posamezne prakse prilagoditi področju uporabe. Riesener et al. [6] je uvajal agilne metode v razvoj kompleksnih fizičnih sistemov in ugotovil, da obstoječe metode, temelječe na razvoju programske opreme, v izvorni obliki niso popolnoma ustrezne za tovrstne razvojne procese. Po drugi strani Sommer et al. [7] trdijo, da tipični linearni postopki razvoja izdelkov prav tako ne zagotavljajo iterativne prilagodljivosti, ki je značilna za sodobne razvojne projekte. Kot alternativo predlagajo hibridno metodo, ki združuje elemente agilnih in linearnih razvojnih pristopov. Za premagovanje težav pri prenosu agilnih metod s področja razvoja programske opreme na področje razvoja fizičnih izdelkov lahko pomaga sistematična uporaba tehnologij 3D tiska [8]. Poleg tega zgodnja uporaba CAD in numeričnih simulacijskih orodij v razvojnem procesu omogoča izdelavo virtualnih prototipov (VP), ki lahko postopek pospešijo tako, da tvorijo osnovo za hitro evalvacijo, razpravo in oblikovanje novih idej znotraj inženirske ekipe [9]. Varl et al. [10] so v skladu z agilnimi in vitkimi principi reorganizirali konstrukcijski in proizvodni proces v individualni proizvodnji.

Predstavljeni članek opisuje empirično študijo razvoja kompleksnega mehatronskega izdelka, pri katerem so avtorji sodelovali kot razvojni inženirji. Na podlagi izkušenj, pridobljenih med razvojnim procesom, je bila razvita splošna smernica, ki upošteva principe agilnosti in je primerna za razvoj kompleksnih mehatronskih sistemov.

## 2 Metodologija

Med raziskavo je bil kritično pregledan potek razvojno-konstrukcijskega procesa pogona za e-kolo. Trg e-koles je že več let izredno hitro se razvijajoč, zato so bile spremembe konstrukcijskih zahtev med razvojnim procesom neizbežne. Posebnost trga e-koles je, da je uvajanje novosti vezano na letno sezono, kar posledično narekuje razpon časovnega okna razvojnega cikla. Glede na zahtevano odzivnost v projektu so bile uporabljene metode agilnega razvoja, ki so bile za potrebe razvoja izdelka ustrezno prilagojene.

Na podlagi kritičnega pregleda in identifikacije ključnih problemov v razvojnem projektu so bile predlagane izboljšave procesa. Bistveni del agilnih metod je delujoč prototip, ki je testiran na koncu vsake iteracije/cikla. Pri razvoju fizičnih izdelkov to seveda ni izvedljivo zaradi finančnih in časovnih omejitev. Raziskana sta vpliv in uporabnost virtualnih prototipov in različnih fizičnih prototipov (oblikovni in funkcionalni) kot tudi uporaba delnih prototipov, ki imajo pri razvoju kompleksnejših fizičnih izdelkov velik potencial za zmanjševanje stroškov in krajšanje časa razvojnega cikla.

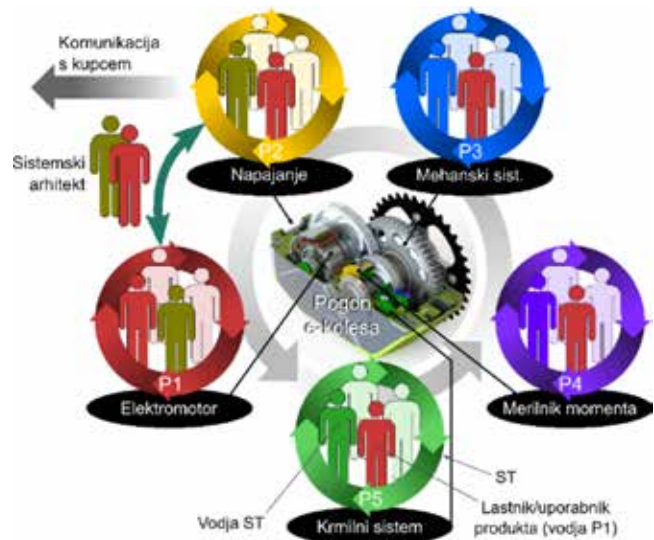
### 2.1 Ozadje projekta

Cilj projekta je bil razvoj novega pogona za e-kolo. Gre za kompleksen mehatronski izdelek, ki ga je bilo zaradi hitro razvijajočega se trga potrebno razviti v čim krajšem času. Kupec pogona je imel ob začetku projekta izoblikovane zahteve, ki so temeljile na obstoječih konkurenčnih izdelkih in informacijah končnih kupcev. Spremembe na trgu električnih koles in stalna interakcija z naročnikom so vodile do večkratnih sprememb zahtev. Uvajanje sprememb v razvojni proces je bilo izvedeno s kombinacijo metod agilnega in sočasnega razvoja. Poudariti je potrebno, da so bili v izhodišču postavljeni zelo kratek razvojni časovni rok in izjemno zahtevne specifikacije glede volumna in mehanske zmogljivosti pogona. V tem okviru se je oblikovala mednarodna razvojna skupina, ki je zajemala strokovnjake s specifičnimi znanji, potrebnimi za razvoj tako kompleksnega pogonskega sistema.

#### 2.1.1 Sestava razvojne ekipe

Pri projektu je sodeloval konzorcij partnerjev, katerih naloge so bile sledeče:

- ▶ partner P1: sistemski arhitekt, vodenje projekta, razvoj elektromotorja, testiranje fizičnih prototipov;
- ▶ partner P2: razvoj baterije in priprava za vgradnjo, naročnik projekta, vodenje projekta, komunikacija s kupci;
- ▶ partner P3: razvoj mehanskega dela pogona;
- ▶ partner P4: razvoj momentnega senzorja;
- ▶ partner P5: razvoj krmilnega sistema.



Slika 1: Sestava razvojne ekipe

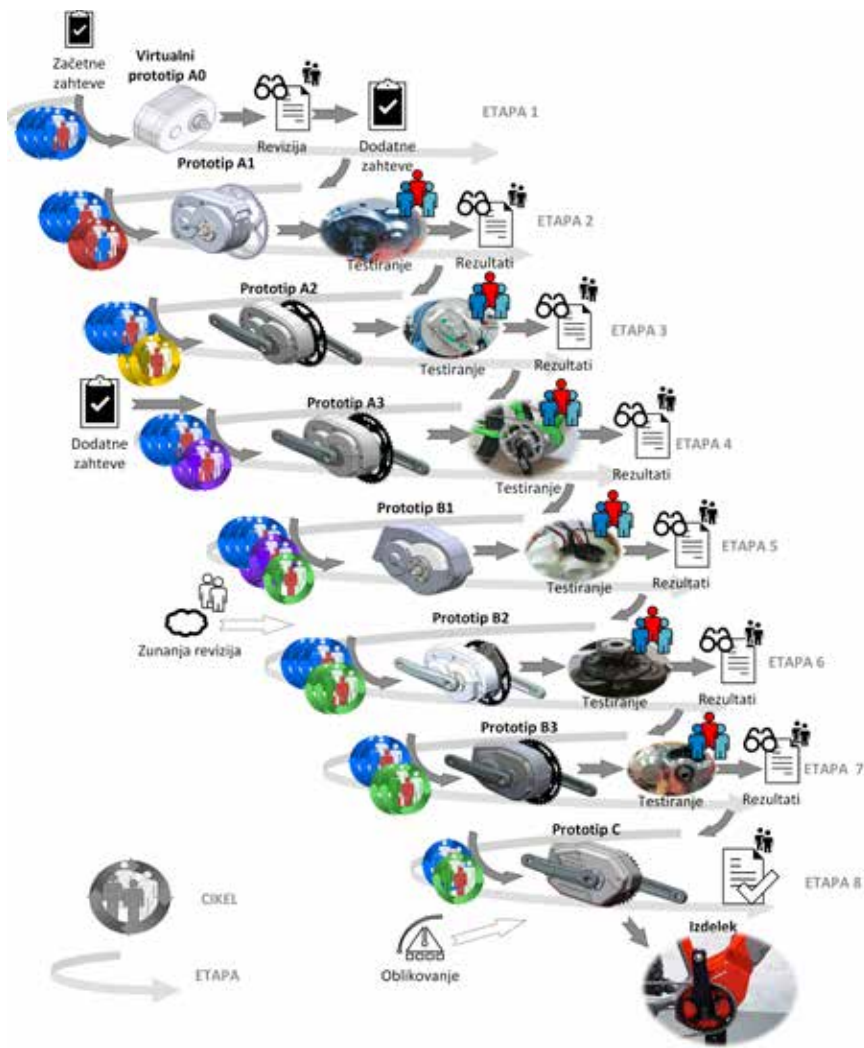
Pri tem je bil partner 2 sočasno tudi kupec pogona in tržnik celotnega sistema (pogon + napajanje + krmilni sistem) nadaljnjim kupcem, tj. kolesarskim podjetjem. Partner 1 je imel direktno pogodbeno razmerje s kupcem pogona (partnerjem 2), medtem ko so bili preostali partnerji v pogodbenem razmerju z njim.

Razvoj celotnega pogona je bil na začetku razdeljen na razvoj manjših podskelekov, ti so bili: elektromotor, mehanski prenosnik moči, močnostna in krmilna elektronika, merilnik momenta in vrtilne hitrosti ter sklop priključkov. Posamezne sklope so razvijali različni timi, pri čemer sta bila zaradi medsebojne odvisnosti med sklopi potrebna redna komunikacija in usklajevanje med njimi (slika 1).

#### 2.1.2 Potek razvojno-konstrukcijskega procesa

Potek razvoja pogona je shematsko predstavljen na sliki 2. Razvojne ekipe (ang. *Scrum teams*; nadalje ST) so v osmih t. i. *etapah* razvile izdelek, ki je bil primeren za postavitve na trg. Rezultat vsakokratne etape je bil fizični prototip, le po prvi etapi je bil to virtualni prototip AO. Znotraj posamezne etape je bilo izvedeno večje število ciklov (*sprintov*). Rezultati ciklov so bili virtualni prototipi, ki so bili ustrezno ovrednoteni in predstavljeni kupcu pogona.

Po potrditvi začetnih zahtev in želja naročnika je bila izdelana konceptna zasnova pogona, imenovana VP AO. Razvoj je potekal tako, da so bile najprej izbrane osnovne komponente (motor, prenosniki, gredi, ležaji, ...), ki so bile v nadaljevanju preračunane po pripadajočih standardih in ustrezno dimenzionirane. Sledilo je dodajanje ostalih komponent (sklopke, senzorji, ohišje itd.). Pri vsem tem so bile upoštewane dane omejitve predvsem glede prostora.



Slika 2 : Potek razvojno-konstrukcijskega procesa pogonskega sistema

Po predstavitvi VP-ja A0, ki je izpolnjeval vse v začetku postavljene zahteve glede mehanskega dela, je sledila prva sprememba specifikacij. Na tem mestu se je za 10 % podaljšala zahtevana življenjska doba, hkrati pa so se zmanjšale dopustne zunanje dimenzije (dolžina 12 %, širina 7 %, višina 4 %) in masa (za 25 %) pogona. ST, ki je delal na sklopu mehanskega dela, je nadaljeval novo iteracijo z upoštevanjem spremenjenih specifikacij. Med več cikli in ovrednotenjem VP-jev smo pripeljali konstrukcijo pogona do faze, ki je bila primerna za izdelavo prvega funkcionalnega fizičnega prototipa, poimenovanega prototip A1. V tej fazi prototip še ni imel predvidenega prostora za priključke, vgrajenega merilnika momenta in elektronike. Prototip A1 je bil namenjen za testiranje

funkcionalnosti mehanskega dela in je bil testiran na preizkuševališču z zavoro, sicer namenjenemu testiranju elektromotorjev (slika 3). Poleg testiranja funkcionalnosti so bile na prototipu izvedene tudi meritve temperature in hrupa. Izdelovalne tehnologije so bile



Slika 3 : Testiranje prototipa A1 na preizkuševališču z zavoro in okvara, do katere je prišlo med testiranjem

prilagojene številu izdelanih kosov. Ohišje pogona – najbolj kompleksen kos v sestavi – je bilo izdelano na CNC rezkalnem stroju.

Na osnovi uspešno izdelanega prototipa A1 je sledilo nadaljevanje projekta, ko je bilo potrebno odpraviti pomanjkljivosti, opažene pri montaži in kasnejšem testiranju prototipa A1. Hkrati je bilo potrebno konstrukcijo prilagoditi za vgradnjo sklopa z električnimi priključki. Določiti je bilo potrebno tudi pritrdilna mesta merilnika momenta ter pritrditev močnostne in krmilne elektronike. Fizični prototip A2 omenjenih sklopov še ni imel vgrajenih, ohišje pa je bilo že prilagojeno njihovi vgradnji in vgradnji pogona v posebej izdelan prilagojen okvir kolesa, prikazan na sliki 4. Preverjanje ustreznosti sklopa priključkov je bilo kasneje narejeno na 3D tiskanem oblikovnem prototipu A2 (slika 4).

Po predstavitvi prototipa A2 se je pojavila druga sprememba specifikacij, ker se je za 100 % povečala največja zahtevana moč motorja. Hkrati z zahtevanim povečanjem moči se je poostriala zahteva glede dopustne temperature ohišja, ker se je ta zmanjšala za 25 %. Zaradi slabega izkoristka motorja pri danem prestavnem razmerju in obratovanju pri povečani moči je bilo potrebno konstruirati gonilo z večjim prestavnim razmerjem, ki ga je bilo potrebno vgraditi v enak volumen. Rešitev problema ni bila trivialna in je zahtevala več dodatnih komponent, potrebnih za zagotavljanje predpisane življenjske dobe pogona.



*Slika 4 : Slika funkcionalnega prototipa A2, testiranega na kolesu, in 3D tiskanega oblikovnega prototipa, namenjenega za testiranje ustreznosti sklopa priključkov*

Prototip A3 je imel predviden prostor za vgradnjo sklopa priključkov in vgradnjo merilnika momenta ter elektronike (močnostno in signalno vezje). Namenjen je bil za testiranje funkcionalnosti mehanskega dela ter močnostne in krmilne elektronike pri večji zahtevani moči. Na prototipu A3 so bile ponovno izvedene tudi temperaturne meritve in meritve hrupa.

Med izdelavo prototipa A3 je kupec zahteval spremenjeno vpetje pogona v okvir kolesa, ki je rezultiralo v prototip B1, ki je imel spremenjeno ohišje, preostali mehanski del pa je ostal bolj ali manj enak prototipu A3. Pri testiranju prototipov verzije A3 in B1 so se pojavljale določene napake, ki jih je bilo potrebno hitro rešiti zaradi približevanja dogovorjenih rokov. Zaradi vpetosti članov razvojnega tima v obstoječo konstrukcijo je bila opravljena zunanja revizija. Na podlagi ugotovitev zunanje revizije in po uskladitvi z razvojnim timom so bili oblikovani korektivni ukrepi, ki so rezultirali v prototip B2, ki je na testih pokazal izpolnjevanje zahtevanih funkcionalnosti. Ob prehodu na prototip B3 je bil dodan še zunanji dizajn ohišja, ki po predstavitvi fizičnega prototipa prodajalcem e-koles ni bil potrjen. Tako je naročnik zahteval implementacijo novega dizajna ohišja, ki ga je predlagal zunanji industrijski oblikovalec, kar je rezultiralo v prototip verzije C. S potrditvijo tega prototipa sta se pričeli serijska proizvodnja pogona in njegova vgradnja v e-kolesa.

## 2.2 Identifikacija ključnih težav v razvojnem procesu

Po uspešno končanem projektu je bil opravljen kritičen pregled celotnega procesa s ciljem identifikacije ključnih težav v razvojnem procesu. Na podlagi tega pregleda so bile oblikovane smernice za razvoj fizičnih izdelkov z upoštevanjem principov agilnosti. Izmed opaženih pomanjkljivosti lahko kot ključne izpostavimo sledeče:

1. Fizični prototipi so nepogrešljivi pri povsem novih izdelkih, kjer je veliko število novosti in negotovosti. Za izdelavo fizičnega prototipa so potrebni določen čas in stroški, kar predstavlja dodatno oviro. Virtualni prototipi v obliki CAD-modelov ali numeričnih modelov so lahko zelo

- učinkoviti in so dober nadomestek za fizične.
2. Razvoj izdelka na podlagi predvidevanj želja kupcev. Kupec ponavadi ugotovi, kaj si želi, šele, ko določeno zahtevo vidi realizirano oziroma je to predstavljeno na virtualnem ali na fizičnem prototipu.
3. Potreba po izdelavi in testiranju delnih prototipov za hitro testiranje posameznih delnih funkcij – npr. ločeno testiranje življenjske dobe planetnega gonila oz. dvostopenjskega gonila brez vključitve grednega sistema na osi gonilke ali pa testiranje delovanja sistema gonilke brez električnega pogona ipd.
4. Problem sočasnega razvoja celotnega mehatronskega sistema. Dokler mehanski del ni bil pretežno razvit, ni bilo mogoče testirati krmilnega sistema. Napake na mehanskem delu so onemogočale testiranje krmilnega dela.
5. Prekomerno število sestankov s celotno razvojno ekipo. Ti sestanki bi se morali izvajati mesečno ali glede na trenutne potrebe (zmerno) in zajemati samo teme, relevantne za vse ST.
6. Pomanjkljivo vodenje seznama aktivnosti (ang. *product backlog*) in izvedba revizij rezultatov po vsakem razvojnem ciklu. Kadar je razvojna ekipa sestavljena iz več podjetij, se pojavi problem, ker nimajo vsi člani dostopa do vseh informacij ali do zadnje verzije dokumentov. Dodatna težava projekta je tudi vključitev več različnih partnerjev iz različnih lokacij, kar otežuje hitro komunikacijo in ustrezen pretok informacij.

## 3 Smernica za agilni pristop k razvoju kompleksnih mehatronskih sistemov

Na podlagi analize procesa razvoja pogona za e-kolo in identifikacije kritičnih točk je bila razvita prilagojena smernica za razvoj kompleksnih fizičnih izdelkov z upoštevanjem principov agilnosti. Ključne točke, ki jih predvideva smernica, so opisane v nadaljevanju:

1. Izdelek razdelimo na posamezne sklope, ki so med seboj sicer odvisni in v končni fazi sestavljajo celoten izdelek, jih je pa mogoče do neke mere razvijati posamično in sočasno.
2. Na razvoju posameznih sklopov delajo timi, ki so sestavljeni iz članov s specifičnimi znanji, potrebnimi za razvoj tega sklopa. Delo na posame-

znih sklopih naj poteka v okviru primerne agilne metode. V analiziranem primeru se Scrum izkaže kot primerna osnova.

3. Ključno je sprotno testiranje izdelka. Slednje razvrščamo v dve kategoriji:

- a) Tehnično testiranje funkcionalnosti  
Tehnično testiranje poteka na štirih nivojih:
  - ▶ testiranje VP (izvedeno med vsakim ciklom, uporabimo lahko orodja, kot je Analiza možnih napak in njihovih posledic (FMEA) - *slika 5*, in numerične simulacije - *slika 6*),
  - ▶ testiranje delnih prototipov (izvedeno po ciklih, ki so bili identificirani kot kritični),
  - ▶ testiranje celovitih prototipov posameznega ST (izvedeno po vsaki etapi),
  - ▶ testiranje celovitega fizičnega prototipa, v katerem so združeni rezultati dela vseh ST - prototip celotnega izdelka.

Za testiranje funkcionalnosti celotnega izdelka je celovit fizični prototip nujno potreben. Ta je rezultat združitve uspešno izvedenih etap vseh vključenih ST. Izdelava celovitega fizičnega prototipa traja določen čas in navadno zahteva visoke stroške. Posamezni sklopi izdelka so med seboj povezani, vendar ni nujno, da so potrebni

za testiranje v vseh fazah. Navadno je možno teste izvajati tudi na fizičnih prototipih, ki zajemajo le razvojno delo posameznega ST ali omejenega števila ST.

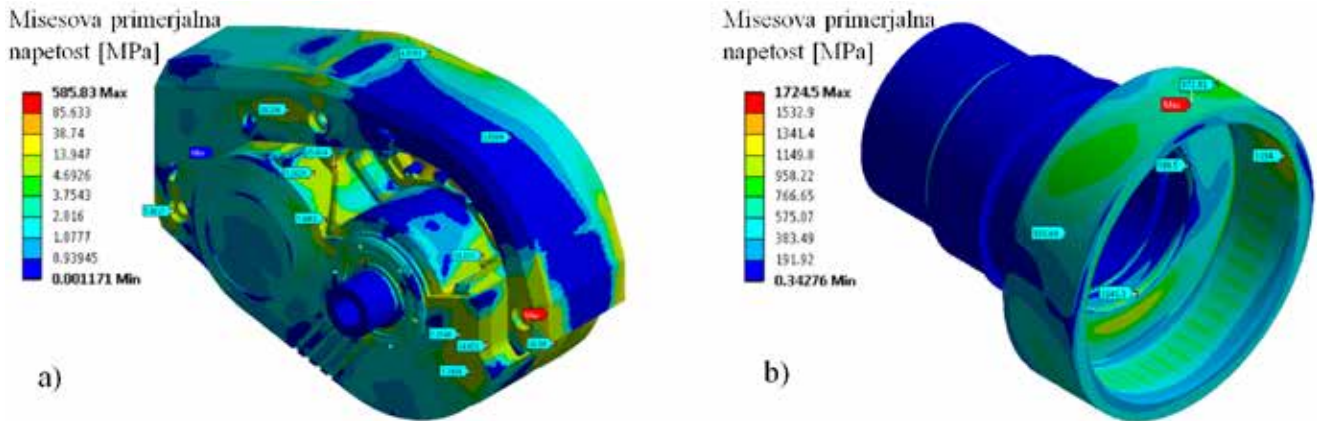
b) Testiranje sprejemanja izdelka pri potencialnih kupcih

Rezultat vsakokratnega cikla je VP. Skupek funkcionalnih VP-jev (takih, ki po analizah izpolnjujejo vse zastavljene tehnične pogoje) je mogoče združiti v celovit VP, ki ga lahko predstavimo potencialnim kupcem (to lahko olajša uporaba strojne opreme AR ali VR). S preverjanjem odziva kupcev se identificirajo potrebne spremembe, ki bodo doprinesle k večji vrednosti izdelka. Povratne informacije kupcev je potrebno v čim večji meri upoštevati v naslednji iteraciji. Spremembe si želimo predvsem v zgodnejših fazah razvoja, zato sta komunikacija s kupci in predstavitev sprotnih rezultatov v zgodnejših fazah (in s tem identifikacija želja kupcev) še posebej pomembni.

- 4. Identificirati je potrebno segmente, ki se lahko razvijajo naprej, med tem, ko se čaka na izdelavo in testiranje fizičnega prototipa. Stremimo k optimalnemu vzporednemu izvajanju razvojnih procesov.
- 5. Pri razvoju popolnoma novega kompleksnega

ANALIZA MOŽNIH NAPAK IN UČINKOV										1		1=Slovenščina, 2=English, 3=Deutsch								
FMEA konstrukcije										FMEA št. FMEA 005										
Izdelek, proces		e-DRIVE		Model/Leto/Vozilo		vvr. 03														
Revizija št.	Datum	Moderator	Podpis			Ključni		Delovna skupina/Opombe, Vzrok												
Nbr.	Element / Funkcija / Zahteva	Možna napaka	Možni učinek (posledica) napake	S	C	Potencialni vzroki / Mehanizem napake	O	Sistem podrtive konstrukcije	D	R	P	N	Priporočeni ukrepi				Rezultat ukrepov			
													Prilagojena konstrukcija	namensko ohišje motorja, ki je integrirano z ohišjem pogona – zagotavljanje večje toplotne prevodnosti	Odgovornost in predviden rok	Izvedeni ukrepi	S	O	D	R
1		pregrevanje motorja ob preobremenitvah	odpoved motorja pri trajnejši obremenitvi	8		majhna toplotna vztrajnost motorja zaradi majhne mase motorja; univerzalno ohišje motorja, ki ni prilagojeno konstrukciji celega sestava	4	MKE analiza, testi s preobremenitvami	4	128										
		zdrs med gredjo in sončnikom	ni prenosa momenta	8		krčni nased ni ustrezno dimenzioniran	4	preračun obremenitve, testi	3	96										
		poškodba ležaja pri montaži	povečan hrup, predčasna odpoved pogona	7		prevelika obremenitev pri natisnavanju sončnika	3	preračun obremenitve	4	84										
2		poškodba sončnika pri natisnavanju	ni prenosa momenta	8		krčni nased ni ustrezno dimenzioniran	5	preračun obremenitve, testi	5	200										
		obraba zob	povečan hrup, predčasna odpoved pogona	7		ni ustreznega mazanja, izguba oja														
		lom zoba	ni prenosa momenta	8		preobremenitev zobnika														
3		obraba zob	povečan hrup, odpoved pogona v nadzavejanju	8		slabo vodenje zobnikov; neenakomerna obremenitev; sončni zobnik z ostrimi robovi														
		obraba zob	povečan hrup	7		tribološka nekompatibilnost materialov														
		lom zobnika ali pospešena obraba	preobremenitev zobnika	7		neenakomerna porazdelitev obremenitve med planetarni zobniki														

Slika 5 : Primer FMEA-analiza konstrukcije centralnega e-pogona za kolo



**Slika 6 :** Testiranje virtualnega prototipa – preverjanje trdnostne ustreznosti pogona (a) in posameznih komponent (b) ob danih obremenitvenih pogojih

fizičnega izdelka bomo naleteli na več kritičnih točk. Neuspešno spopadanje s temi lahko vodi v nedoseganje zahtevanih specifikacij in zaostajanje za predvidenimi roki. Zunanja revizija izdelka, ki jo opravijo strokovnjaki, ki niso bili vpeti v razvoj izdelka, lahko ponudi kopico svežih idej, s katerimi si pomagamo premostiti kritične točke.

- Potrebne so kratke verige pri prenosu informacij, te je potrebno prenašati čim bolj celovito in čim hitreje, brez nepotrebnih posrednikov.

## 4 Diskusija

Predstavljeni razvoj pogona za e-kolo je kompleksen mehatronski izdelek. Pri njegovem razvoju je sodelovalo pet partnerjev. Izdelek je bil razdeljen na več med seboj odvisnih sklopov, ki jih je bilo do neke mere možno razvijati posamično. Razvojne ekipe so bile med razvojem v stalni interakciji s kupcem pogona, ki je sicer tvoril razvojno ekipo en nivo višje, ta pa je celotni sistem (pogon/napajanje/krmilni sistem) tržil razvijalcem končnega izdelka, tj. celotnega e-kolesa. Končni kupec je uporabnik tega kolesa, celotna razvojna veriga pa mora razvijati izdelek v skladu z njegovimi željami. Želje končnega kupca je naročnik sistema prepoznaval in prenašal do ST.

V stalni sestavi ST je bilo določeno fiksno število članov, preostali so se vključevali glede na faze in potrebe projekta. Specifična znanja in večje število ljudi so lahko potrebni zgolj v posameznih fazah razvoja. Ni potrebe, da razvojno ekipo tvori fiksno število ljudi, posamezniki se lahko vključujejo v fazah, ko je potrebno njihovo specifično znanje. Rezultati vsakega cikla so pregledali vsi člani ST, bili so predstavljeni tudi kupcu pogona, ki je najbolje poznal želje končnega kupca, tj. uporabnika e-kolesa. Dolžina posameznih ciklov se je prilagajala glede na aktivnosti, ki so bile predvidene znotraj cikla.

Pred vsakim ciklom je posamezen ST imel sestanek in se uskladi, kaj je potrebno narediti znotraj prihajajočega cikla. Po končanem ciklu so bili rezultati predstavljeni kupcu. Skupaj s kupcem se je opravil pregled konstrukcije in določene so bile zahteve, ki jih je bilo potrebno rešiti znotraj naslednjega cikla. Dolžina posameznih ciklov je bila odvisna od faze projekta in rezultatov, ki smo jih dosegali v tisti fazi. Večji del projekta smo izvajali tedenske cikle. Proti koncu projekta se je dolžina ciklov podaljšala. Zaporedje več ciklov je rezultiralo v etapo, ko se je rezultat preveril še s fizičnimi prototipi, nekateri zgolj z oblikovnimi (3D tiskana ohišja in sklop priključkov), nekateri pa s funkcionalnimi prototipi. Posamezni sklopi izdelka so med seboj povezani, vendar ni nujno, da so potrebni za testiranje v vseh fazah. Na primer: prototipi verzije A so bili namenjeni testiranju mehanskega dela in so imeli zunanjo močnostno in krmilno elektroniko, merilnik momenta in sklop priključkov, v tej fazi fizični prototipi še niso bili vključeni.

## 5 Zaključek

Študija je bila izvedena na realnem projektu, kjer so bile z upoštevanjem kombinacije APD in sočasnega razvoja vse spremembe konstrukcijskih zahtev ustrezno implementirane. To je vodilo do odličnega končnega izdelka in zadovoljnega naročnika ter končnega kupca. Redna komunikacija s kupcem in predstavitev rezultatov v kratkih časovnih iteracijah/ciklih sta se izkazali kot ključni za čim zgodnejše uvajanje sprememb. Končni izdelek bi bil precej drugačen, če vmesnih rezultatov ne bi sproti predstavljali naročniku.

Fizični prototip je neizogiben za testiranje in potrditev funkcionalnosti mehatronskih izdelkov. V primerjavi z razvojem programske opreme zahteva fizični izdelek poleg razvoja virtualnega prototipa še alokacijo časa in finančnih sredstev za izdelavo fizičnega prototipa. ST mora prepoznati, kateri

deli izdelka se lahko razvijajo naprej že med izdelavo fizičnega prototipa, sicer se med čakanjem na prototip izgublja čas. Posebnost z razvojem fizičnih izdelkov je tudi ta, da je potrebno celotno proizvodnjo ustrezno pripraviti in planirati že veliko prej, preden imamo končni prototip.

Čeprav je bila študija izvedena na uspešno izvedenem projektu, so bile pri kritičnem pregledu identificirane nekatere pomanjkljivosti in težave med razvojem. Na podlagi podrobne analize in z upoštevanjem uspešno izvedenih korakov so bile zasnovane smernice, po katerih je možno razvijati kompleksne fizične izdelke z upoštevanjem principov agilnosti.

### Viri

- [1] J. Duhovnik, J. Tavčar, Concurrent Engineering in Machinery, in: J. Stjepandić, N. Wognum, W. J.C. Verhagen (Eds.), *Concurrent Engineering in the 21st Century: Foundations, Developments and Challenges*, Springer International Publishing, Cham, 2015: pp. 639–670. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13776-6\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13776-6_22).
- [2] J. Tavčar, I. Demšar, J. Duhovnik, Engineering change management maturity assessment model with lean criteria for automotive supply chain, *Journal of Engineering Design*. 29 (2018) 235–257. <https://doi.org/10.1080/09544828.2018.1463513>.
- [3] K. Biesialska, X. Franch, V. Muntés-Mulero, Big Data analytics in Agile software development: A systematic mapping study, *Information and Software Technology*. (2020) 106448. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2020.106448>.
- [4] K. M. Beck, M. Beedle, A. van Bennekum, A. Cockburn, W. Cunningham, M. Fowler, J. Grenning, J. Highsmith, A. Hunt, R. Jeffries, J. Kern, B. Marick, R. C. Martin, S. Mellor, K. Schwaber, J. Sutherland, D. Thomas, *Manifesto for Agile Software Development*, (2013).
- [5] K. Schwaber, J. Sutherland, *The Scrum Guide: The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game*, (2017). <https://www.scrumguides.org/docs/scrumguide/v2017/2017-Scrum-Guide-US.pdf> (accessed November 19, 2020).
- [6] M. Riesener, E. Rebertsch, C. Dölle, S. Schloesser, M. Kuhn, J. Radermacher, G. Schuh, A model for dependency-oriented prototyping in the agile development of complex technical systems, *Procedia CIRP*. 84 (2019) 1023–1028. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.196>.
- [7] A. F. Sommer, C. Hedegaard, I. Dukovska-Popovska, K. Steger-Jensen, Improved Product Development Performance through Agile/Stage-Gate Hybrids: The Next-Generation Stage-Gate Process?, *Research-Technology Management*. 58 (2015) 34–45. <https://doi.org/10.5437/08956308X5801236>.
- [8] J. Reichwein, S. Vogel, S. Schork, E. Kirchner, On the Applicability of Agile Development Methods to Design for Additive Manufacturing, *Procedia CIRP*. 91 (2020) 653–658. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.112>.
- [9] S. Vinodh, S. R. Devadasan, S. Maheshkumar, M. Aravindakshan, M. Arumugam, K. Balakrishnan, Agile product development through CAD and rapid prototyping technologies: an examination in a traditional pump-manufacturing company, *Int J Adv Manuf Technol*. 46 (2010) 663–679. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2142-4>.
- [10] M. Varl, J. Duhovnik, J. Tavčar, Agile product development process transformation to support advanced one-of-a-kind manufacturing, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33:6 (2020) 590–608. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1775301>.

### Agile development of complex mechatronic systems

#### Abstract:

Today's fast paced and ever changing market dictates perpetual variations in product requirements already during the product's development process. If the involved design teams aren't capable of taking these variations into consideration and adapting the process accordingly, the product will face poor market acceptance. Exactly how a given requirement change will influence the development process depends on the product's complexity and the design phase at which the change has to be implemented. The Agility principles and the methods that encompass these principles enable a successful integration of various design changes during the development process. In the presented contribution, several key guidelines are put forth that facilitate the development process of complex systems based on the Agility principles. These were set based on a critical evaluation of the development process of an e-bike central drive, which is now in full serial production and which also received a gold prize by the Chamber of commerce of Slovenia as one of the most innovative products of 2020.

#### Keywords:

agile methodology, agile product development, engineering design, e-mobility, e-bike

#### Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo podjetju Domel, d. d., za povabilo k sodelovanju pri projektu in uspešno ter konstruktivno sodelovanje med celotnim projektom. Zahvala gre tudi podjetjema Podkrižnik, d. o. o., in Emsiso, d. o. o., za uspešno sodelovanje pri projektu.