

# Smotrnost uporabe simulacijske programske opreme v aplikacijah paletiranja z industrijskimi roboti

Karl Jerman<sup>1</sup>, Boštjan Murovec<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ABB d.o.o., Koprška ulica 92, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: karl.jerman@si.abb.com

**Povzetek.** Industrijske robote danes programiramo ročno prek pripadajočih učnih naprav ali nesprotno (ang. off-line) z namensko simulacijsko programsko opremo. Čeprav dobavitelji robotske opreme ponujajo ustrezno in primerno zmogljivo simulacijsko programsko opremo, uporaba le-te v aplikacijah paletiranja z industrijskimi roboti ni razširjena. Eden od vzrokov so stroški, povezani z njeno nabavo, zato smo raziskali meje upravičenosti uporabe le-te pri projektih, ki vključujejo aplikacije paletiranja z industrijskimi roboti. Navedene so vse pomembne vplivne veličine ter njihov vpliv na ceno celotnega projekta. Fazi projekta, v katerih ima simulacijska oprema največji pomen, sta faza izvedbe in faza proizvodnje. Prvo opazujemo s stališča dobavitelja, drugo pa s stališča kupca robotske opreme. Primer izračuna meje upravičenosti je izveden v treh delih in zajema vplivne veličine v času izvedbe projekta in v času, ko že poteka dejanska proizvodnja. V sklepu je podano tudi priporočilo dobaviteljem opreme za povečanje uporabe simulacijske programske opreme v robotskih aplikacijah.

**Ključne besede:** paletiranje, industrijski robot, programiranje robotov, simulacijska oprema

## Justification of using simulation software in robotised palletising applications.

The industrial robots of today are programmed by using programing units or designated software programs on separate computers (off-line). Despite the fact that manufacturers of industrial robots offer a very capable simulation software, off-line programing is not commonly used for palletising with industrial robots. One of the reasons are also the costs associated with the purchase of the simulation software. The aim of our investigation tries to establish when using the simulation software in projects, involving palletising with industrial robots, is cost-efficient. Each of the variables significantly affecting projects are specified. Project phases in which using software has an important role are the phase of line building, to be validated from supplier's point of view and the phase of production running, to be validated from the customer's point of view. A threshold calculation is made in three parts. Recommendations for the robot solution providers are given with the goal of increasing the use of the simulation software in robotics applications.

## 1 UVOD

Zaradi zahtev trga so izdelovalci prisiljeni ponuditi nove izdelke na trg v čedalje krajših časovnih intervalih. To se odraža tudi na področju avtomatizacije proizvodnih procesov, kjer dobavitelji načrtujejo proizvodno opremo za nove izdelke, ki pogosto vključuje industrijske robote [1]. Izdelki, ki se bodo proizvajali z roboti, so v času povpraševanja kupca proizvodne opreme pogosto šele v fazi zasnove, zato jih ni mogoče prej fizično testirati in preizkušati. To posledično krajša čas, ki je dobaviteljem robotske opreme na voljo za zasnovo proizvodnje, njeno postavitev in zagon. Enako velja za prilagoditev

obstoječe proizvodnje na spremenjen ali nov izdelek.

Poleg uspešne izvedbe v predvidenem časovnem roku je pri projektih, ki vključujejo industrijske robote, velik poudarek na ceni same investicije.

Optimizacija se med drugim odraža v manjši porabi materiala in časa za izvedbo, izbiri cenejših gradnikov in poenostavitvah rešitev. Z uporabo simulacijske programske opreme za programiranje industrijskih robotov [2] so prihranki veliki, hitri in merljivi.

Vsi večji izdelovalci industrijskih robotov ponujajo simulacijsko programsko opremo, tako imenovane programe za nesprotno (ang. off-line) programiranje [3-6], ki jih uporabljajo dobavitelji robotizirane proizvodne opreme. Dobavitelji so dejanski izdelovalci robotske opreme ali pa njeni integratorji. Kljub temu lahko iz informacij, ki jih posredujejo izdelovalci robotske opreme, ugotovimo, da uporaba simulacijske programske opreme v aplikacijah paletiranja z industrijskimi roboti ni razširjena. Vzrokov je sicer več, vendar so ključni trije.

1. Programerji, ki programe že izdelujejo v programskem jeziku ponudnika robotske opreme, ne želijo sprememb, saj so tako zelo fleksibilni. Na voljo jim je namreč celoten nabor ukazov in operacij, ki jih omogoča programski jezik.
2. Če aplikaciji paletiranja dodamo dodatna opravila ali večje tolerance izdelkov, hitro pridemo do omejitev namenske programske simulacijske opreme, enaka problematika je v ročno napisanem programu laže obvladljiva.
3. Kupec gleda na programsko opremo in šolanje kot dodaten strošek, ki ga ne zna upravičiti in se zato zanj pogosto ne odloči.

V članku poskušamo ugotoviti, ali je uporaba simulacijske programske opreme ekonomsko upravičena. Ker je vplivnih veličin pri posameznem projektu veliko, najprej definiramo najbolj merljive ter na njihovi podlagi izvedemo analizo ekonomske upravičenosti. Uporabo simulacijske programske opreme proučimo s stališča dobavitelja proizvodne opreme, kot tudi s stališča končnega kupca pri uvajanju novih izdelkov v že obstoječo proizvodnjo. Z vrednotenjem izračuna upravičenosti skušamo utemeljiti nujno povečanje uporabe simulacijske programske opreme v aplikacijah paletiranja ter definirati način, kako to tudi izvesti.

## 2 SIMULACIJSKA PROGRAMSKA OPREMA

Vsak izdelovalec robotske opreme ima svoj pristop k simulacijski programski opremi. Posledično je večina programske opreme vezana na posameznega izdelovalca robotov, saj je v njej definirana točna kinematika posameznih robotskih mehanizmov [7]. Obstajajo tudi programi, ki omogočajo simulacijo robotov različnih izdelovalcev [8], vendar so zmožnosti simulacije praviloma manjše kot pri programih, ki jih ponujajo sami izdelovalci robotske opreme.

Pri izračunu ekonomske upravičenosti je temelj na možnostih in omejitvah trenutno dostopne programske opreme RobotStudio izdelovalca ABB [9]. V njem deluje dejanska kopija programske opreme, ki se nahaja v ABB krmilnikih njihovih industrijskih robotov, s čimer je robotski program neposredno prenosljiv in po strukturi identičen dejanskemu programu, ki ga operater naredi z ročnim vodenjem robota, shranjevanjem točk ter njihovo povezavo v trajektorijo.

### 2.1 Simulacijska oprema za paletiranje

Za namene paletiranja je ABB razvil poseben dodatek, imenovan RobotStudio Palletizing PowerPack [10]; v nadaljevanju RSPPP. To je tretja generacija programske opreme, namenjene paletiranju, njen začetek pa sega v leto 1998.

Z uporabo RSPPP programerju ni treba poznati ABB-jevega programskega jezika RAPID [11], saj namesto njega uporabnik programira nivo višje ter s simboli in preprostimi pravili grafično definira potek celotnega robotskega programa za paletiranje na ločenem računalniku. RSPPP sam na podlagi podanih parametrov ustvari RAPID programsko kodo ter definira trajektorije robota. Pri tem upošteva način zlaganja objektov na sami paleti, ki ga izbere operater, položaje vhodnih in izhodnih trakov itd. Program se kreira na računalniku ter nato prenese v robotski krmilnik. Operater nato na dejanski robotski celici definira položaje trakov in palet ter zažene robotski program. Mogoč je tudi poznejši popravek programa v robotskem krmilniku in uvoz le-tega nazaj v RSPPP.

RSPPP omogoča simulacijo robotskega gibanja, definicijo časa cikla ter preverjanje dosega robota, zato

ga lahko uporabimo v številnih fazah projektiranja paletiranja z industrijskimi roboti.

## 3 DEFINICIJA SEGMENTA, APLIKACIJE IN VPLIVNIH FAKTORJEV

Izdelovalci robotske opreme trg delijo na segmente, kot so livarstvo, plastika, industrija hrane in pijače, farmacija, elektronika in avtomobilska industrija [12]. V našem primeru se za izračun ekonomske upravičenosti omejimo na en segment in eno aplikacijo, v kateri je vplivnih dejavnikov razmeroma malo, medtem ko je ponudba programske opreme za njeno realizacijo velika.

### 3.1 Definicija segmenta in aplikacije

Izberimo industrijo hrane in pijače, v kateri poznamo tri glavne robotske aplikacije: prijemanje, pakiranje in paletiranje [3]. Za aplikacijo prijemanja se vedno uporablja namensko razvita programska oprema, saj najpogosteje potrebujemo povezavo med kamero, tekočim trakom, izdelki na njem ter paralelnim robotom [7]. Ko gre za aplikacije s cikli od 0,5 s do 1,5 s, je programiranje brez posebne programske opreme v številnih primerih nemogoče. Pakiranje je med vsemi tremi s stališča programiranja najmanj zahtevna aplikacija, saj gre za vstavljanje izdelkov v končne škatle, ki se zložijo na palete, zato je za našo študijo najprimernejša aplikacija paletiranja. Tipičen primer zanjo je jemanje škatel s proizvodne linije in njihovo zlaganje po predpisanem vzorcu na eno ali več palet. Prav preprostost izbrane aplikacije nam bo v zaključku omogočila realno predstavo o prihrankih pri bistveno kompleksnejših aplikacijah, kjer na primer število točk v trajektoriji preseže nekaj tisoč.

Dodatnih operacij, kot so nanos lepila, polaganje vmesnih kartonov, nanašanje nalepk in tehtanje, ne bomo upoštevali pri izračunu. Prav tako ne bomo obravnavali paletiranja različnih izdelkov v različni embalaži na eno paleto, saj taka obravnava zahteva povsem drugačen pristop [13].

### 3.2 Definicija vplivnih dejavnikov in njihovo vrednotenje

Če se osredinimo na čas izvedbe aplikacije paletiranja, vidimo, da nanj vplivajo naslednji dejavniki:

1. *Število različnih paletnih mest v robotski celici.* Poznamo paletiranje na koncu posamezne proizvodne linije in centralizirano paletiranje. V prvem primeru gre za eno ali več palet enakih izdelkov, v drugem pa za eno ali več palet različnih izdelkov. Ker je primer več enakih palet programsko hitro rešljiv z definicijo novega koordinatnega sistema in prenosom celotne trajektorije [11], bomo v izračunu upoštevali le možnost uporabe več različnih paletnih mest, od katerih se na vsakem zлага svoj izdelek.

2. *Različne dimenzije palet.* EU standard [14] navaja šest tipov palet. Kot primer, povezan z različnimi dimenzijami palet, omenimo, da je v veliki večini uporabljena dimenzija 1200 x 800 mm, nekateri kupci pa želijo palete postaviti naravnost iz skladišča v trgovino brez prelaganja izdelkov na police, za kar so primernejše manjše dimenzije palet, kot na primer paleta tipa Düsseldorf (600 x 800 mm). Na podlagi navedenega vidimo, da različne palete definirajo različne načine zlaganja.
3. *Število različnih načinov zlaganja izdelka.* Praviloma posamezen kupec zahteva svoj način postavitve škatel na paleti, ki je odvisen od dimenzije škatel, njihove mase in možnosti oziroma želje uporabe vmesnih kartonov.
4. *Število različnih izdelkov na posameznem paletnem mestu.* Kot smo predhodno navedli, mešano paletiranje izvajamo iz izračuna.
5. *Število različnih višin paletiranja enakega izdelka.* Kupci velikokrat zahtevajo specifično višino palete. Ker se lahko višina oziroma število slojev na paleti preprosto regulira s spremembo ene same spremenljivke v robotskem programu, je zaradi časovne nezahtevnosti ne bomo posebej obravnavali.

Če povzamemo, so vplivni dejavniki, ki definirajo število različnih sestavov (torej različnih robotskih programov), število paletnih mest v celici  $K$ , število različnih izdelkov na posamezni paleti  $I_k$  in število različnih načinov zlaganja posameznih izdelkov na paleto  $Z_k$ . Ker bomo v nadaljevanju definirali čas, potreben za programiranje enega sestava, lahko število različnih sestavov  $N$  zapišemo kot seštevek sestavov na posameznem paletnem mestu, kar prikazuje enačba (1).

$$N = \sum_{k=1}^K I_k \cdot Z_k \quad (1)$$

## 4 PREGLED FAZ PROJEKTA Z VIDIKA DOBAVITELJA IN KUPCA

Za naš izračun stroška lahko faze projekta razdelimo na:

1. fazo ponudbe,
2. fazo izvedbe,
3. fazo šolanja in
4. fazo proizvodnje.

Če želimo definirati mejo ekonomske upravičenosti uporabe simulacijske programske opreme, moramo definirati faze projekta, kjer je njen vpliv upravičen in predvsem merljiv.

### 4.1 Faza ponudbe

V fazi ponudbe služi simulacija grafični predstavitvi projekta in podaja odgovore na vprašanja glede pravilne izbire tipa robota in njegove variante (doseg, nosilnost), preverjanju konstrukcije periferne opreme (prijemala, podstavka za manipulator, vhodnih in izhodnih

zalagovnikov, ...), preverjanja časa gibanja robota, torej cikla robotskega dela aplikacije itd.

Splošna definicija stroška v tej fazi ni mogoča, saj je le-ta odvisen od številnih dejavnikov, ki jih ne znamo vrednotiti (znanja prodajalca, poznavanja robotskih aplikacij s strani kupca, časovnega poteka projekta, predvidenega stroška zamene robota v primeru, ko izbrani robot brez simulacije nima dovolj velikega delovnega prostora ali nosilnosti, ...).

Lahko pa hitro ugotovimo, da je uporaba simulacijske programske opreme v tej fazi smiselna, saj v današnjem času tudi periferna oprema nastaja v 3D modelirnih programskih paketih in je vizualizacija celotne robotske celice s strani kupca zelo zaželeno.

Čeprav splošna definicija stroška ni mogoča, dolgoletna praksa načrtovanja in izvedbe robotskih aplikacij v podjetju ABB potrjuje, da simulacijska programska oprema pozitivno vpliva na razvoj projekta v fazi ponudbe, saj daje kupcu plastično predstavo o tem, kakšna oprema mu je ponujena in kako bo delovala.

### 4.2 Faza izvedbe

V tej fazi se po navadi poleg dobave in postavitve opreme izvede tudi programiranje robota za paletiranje vnaprej določenega števila izdelkov. Običajno kupec zahteva izvedbo programa za en izdelek ter šolanje, da lahko sam v prihodnosti izdelava programe za nove izdelke. V fazi projekta je za dobavitelja opreme programiranje strošek. Če ne izbere pravilnega načina programiranja, se to lahko odraža tudi v neuspešni ponudbi.

### 4.3 Faza šolanja

Šolanje kupcev se največkrat izvaja pred samim prevzemom robotske celice. Podjetje ABB izvaja šolanje za paletirne aplikacije pet dni. Dva dneva sta namenjena za usvojitev osnov za delo z robotsko celico, trije dnevi pa za šolanje programiranja. Pri nakupu simulacijske programske opreme se šolanje podaljša za tri dni za učenje osnov simulacijske opreme in dva dni za učenje dela z dodatkom za paletiranje. Cena šolanja  $C_{sol}$  po ceniku podjetja ABB [15] je 1800 evrov, kar bomo upoštevali pri naših izračunih.

### 4.4 Faza proizvodnje

Navedena faza nastopi, ko robotsko celico prevzame kupec in le-ta z njo samostojno proizvaja izdelke. Glede na odločitve podjetja se spreminjajo oziroma dodajajo novi izdelki in posledično programi za paletiranje. V tej fazi porabljen čas za dodajanje novega oziroma spreminjanje obstoječega robotskega programa neposredno vpliva na stroške podjetja, zato ga bomo upoštevali v izračunih.

## 5 DEFINICIJA ČASA PROGRAMIRANJA

Del projektnega časa odpade na mehansko postavitev opreme. Tukaj uporaba simulacijske opreme ne prinese bistvene razlike, zato je za nas najzanimivejši čas, ki je potreben za programiranje delovanja samega robota.

Programiranje delimo na dve fazi: izdelavo jedra programa in definicijo točk gibanja robota, ki sestavljajo trajektorijo za manipulacijo izdelkov. Jedro programa so krmilni del programa za prijemalo, programska povezava senzorjev, izdelava pravil, ki zagotavljajo ustrezen prijem, obrnjenost etiket itd. V drugi fazi z definicijo točk program povežemo v celoto in definiramo zelene trajektorije.

Definirajmo potreben čas ročnega načina programiranja paletiranja enega izdelka na eno paleto, torej enega sestava. Paletiranje brez vmesnih kartonov se izvaja z različno razporeditvijo škatel v posameznih slojih, s čimer zagotovimo stabilnost škatel na paleti. V preteklosti smo pri projektih [16] v podjetju ABB za osnovni program potrebovali osem ur programiranja. Nato sta sledila programiranje trajektorij in testiranje. Ker so lahko prijemala tudi kompleksnejša in omogočajo prijem več škatel hkrati, je bil po izkušnjah čas programiranja v povprečju 32 ur. Vanj sta všteta tudi čas testiranja izdelanega programa in fina nastavitev točk, ki sestavljajo trajektorije. Ker je jedro programa narejeno le enkrat, potrebujemo za vsak nadaljnji program 32 dodatnih ur programiranja.

Zdaj definirajmo potreben čas programiranja paletiranja enega izdelka na eno paleto s pomočjo simulacijske programske opreme. Za osnovni program smo pri preteklih projektih porabili le tri ure. Nato sta sledila programiranje trajektorij in testiranje, kar je vzelo dodatnih osem ur. V to sta všteta tudi čas testiranja izdelanega programa in fina nastavitev točk. Ker je jedro programa narejeno le enkrat, potrebujemo za vsak nadaljnji program osem dodatnih ur programiranja.

V fazi izvedbe je po navadi prisotnih še več zunanjih dejavnikov, ki vplivajo na sam potek projekta. Neustrezno delovanje periferne opreme, spremembe kupčevih zahtev ter zamenjava dobaviteljev vedno podaljšujejo čas programiranja. To je nemogoče točno ovrednotiti, vendar moramo upoštevati pri interpretaciji rezultatov.

## 6 STROŠKI PROGRAMIRANJA

### 6.1 Faza izvedbe

Na strošek vpliva število porabljenih ur za programiranje osnovnega programa  $U_{osn}$  ter trajektorij za dodatne sestave  $N \cdot U_{dod}$ , cena programerske ure dobavitelja opreme  $C_{prog}$ , čas programiranja na poti  $U_{poti}$  (ko se programiranje izvaja zunaj sedeža dobavitelja), cena ure na poti  $C_{poti}$ , cena osnovne programske opreme  $C_{osn}$ , cena dodatka za pakiranje  $C_{pak}$  ter cena šolanja  $C_{sol}$ . Glede na majhno vrednost cena dnevnice [17] tako

rekoč ne vpliva na izračun, ki ga da enačba (2), zato je ne bomo upoštevali.

$$\text{strošek\_faza\_izvedbe [EUR]} = C_{prog} \cdot U_{osn} + \sum_{k=1}^K I_k \cdot Z_k \cdot C_{prog} \cdot U_{dod} + 2 \cdot \left(1 + \sum_{k=1}^K I_k \cdot Z_k \cdot \frac{U_{dod}}{8}\right) \cdot C_{poti} + C_{osn} + C_{pak} + C_{sol} \quad (2)$$

Za čas na poti  $U_{poti}$  predvidimo dvakrat po eno uro na dan izvedbe, cena ure na poti je v ceniku podjetja ABB 50 evrov, strošek ure programiranja pa 80 evrov. Pri izvedbi robotske celice za paletiranje proizvodnja ne poteka, zato stroška izgubljene proizvodnje v tem primeru ne upoštevamo. Z navedenimi cenami za ročni način programiranja dobimo izračun po enačbi (3).

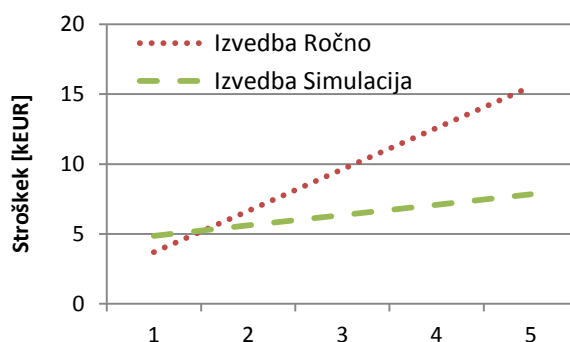
$$\text{strošek\_izvedba\_ročno [EUR]} = 640 + N \cdot 2560 + (1 + N \cdot 4) \cdot 100 \quad (3)$$

Strošek pri uporabi simulacijske programske opreme je naveden v enačbi (4) ter prikazan v tabeli (1) in sliki (1).

$$\text{strošek\_izvedba\_simulacija [EUR]} = 240 + N \cdot 640 + (1 + N) \cdot 100 + C_{osn} + C_{pak} + C_{sol} \quad (4)$$

Tabela 1: Izračun stroška glede na število sestavov v EUR

Sestavi	Izvedba, ročno	Izvedba, simulacija
1	3.700	4.875
2	6.660	5.615
3	9.620	6.355
4	12.580	7.095
5	15.540	7.835



Slika 1: Povezava med stroškom in številom sestavov v fazi izvedbe

Narejeni izračun pokaže, da je v fazi izvedbe programiranje s simulacijsko programsko opremo upravičeno že pri dveh sestavih.

## 6.2 Faza proizvodnje

Ker uspešna proizvodnja vedno odraža zahteve na trgu, je velika verjetnost, da bo treba po uspešnem zagonu v prihodnosti izdelek spremeniti, v celoti zamenjati ali pa v robotsko celico dodati nove izdelke. Takrat je treba pri ročnem načinu programiranja proizvodno linijo ustaviti in sprogramirati nov program.

V fazi proizvodnje se strošek ure programerja spremeni, saj zdaj programiranje izvaja kupec sam. Tako definiramo ceno programerja  $C_{kprog}$ , ki je običajno nižja od  $C_{prog}$  s strani dobavitelja opreme in znaša po podatkih projektne dokumentacije ABB v povprečju 50 evrov. Navedenim stroškom dodamo še strošek ustavljene proizvodnje  $C_{up}$  ter zapišemo enačbo (5).

$$\text{strošek\_faza\_proizvodnje [EUR]} = C_{kprog} \cdot U_{osn} + \sum_{k=1}^K I_k \cdot Z_k \cdot C_{kprog} \cdot U_{dod} + 2 \cdot \left(1 + \sum_{k=1}^K I_k \cdot Z_k \cdot \frac{U_{dod}}{8}\right) \cdot C_{poti} + C_{osn} + C_{pak} + C_{up} + C_{sol} \quad (5)$$

V enačbi (6) je strošek ustavljene proizvodnje definiran kot produkt dobička posameznega izdelka  $C_i$ , števila letih v paketu  $N_p$ , števila paketov na uro  $P_u$  ter časa zaustavitve  $U_{zau}$ .

$$\text{strošek\_faza\_proizvodnje [EUR]} = C_{kprog} \cdot U_{osn} + \sum_{k=1}^K I_k \cdot Z_k \cdot C_{kprog} \cdot U_{dod} + 2 \cdot \left(1 + \sum_{k=1}^K I_k \cdot Z_k \cdot \frac{U_{dod}}{8}\right) \cdot C_{poti} + C_{osn} + C_{pak} + C_i \cdot N_p \cdot P_u \cdot U_{zau} + C_{sol} \quad (6)$$

Dejanski izračun je v podjetjih lahko precej obširnejši in kompleksnejši, saj vključuje dejanski dobiček na izdelek, zmogljivost proizvodnje, število izmen, v katerih obratuje proizvodnja, in druge stroške (elektrika, zrak, vzdrževanje ...). Kljub temu je rezultat povsem primerljiv z našo analizo, ki je navedena v nadaljevanju. Če paletiramo na primer pivo, pakirano v platoje s hitrostjo 5 s na plato, paletiramo 240 pločevink na minuto, kar znaša 14.400 pločevink na uro. Ob predpostavki, da je pri prodajni ceni piva 1,5 EUR/pločevinko strošek proizvodnje 0,50 evra, dobiček proizvajalca 0,50 evra, preostalo pa je marža trgovine, je strošek izgubljene proizvodnje 7200 evrov na uro.

V našem izračunu bomo upoštevali dve možnosti. V prvem primeru kupec dela v treh izmenah, torej nima možnosti za programiranje brez zaustavitve proizvodnje, v drugem pa le v eni izmeni, preostali dve pa sta na voljo za programiranje.

Če vstavimo predvidene cene in poenostavimo izračun, dobimo pri ročnem programiranju z zaustavitvijo proizvodnje enačbo (7).

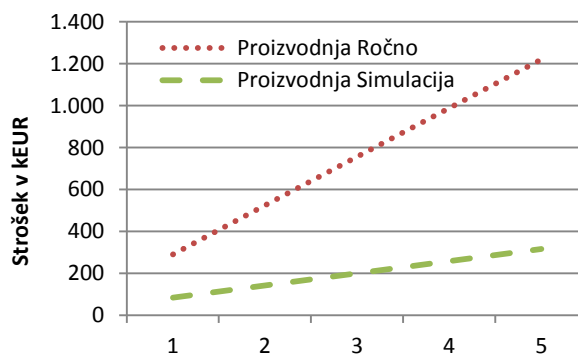
$$\text{strošek\_ustavljena\_proizvodnja\_ročno [EUR]} = 400 + N \cdot 1600 + (1 + N \cdot 4) \cdot 100 + 7200 \cdot (8 + N \cdot 32) \quad (7)$$

Strošek pri uporabi simulacijske programske opreme je naveden v enačbi (8). Rezultata obeh enačb sta predstavljena v tabeli (2) in sliki (2).

$$\text{strošek\_ustavljena\_proizvodnja\_simulacija [EUR]} = 150 + N \cdot 400 + (1 + N) \cdot 100 + C_{osn} + C_{pak} + 7200 \cdot (3 + N \cdot 8) + C_{sol} \quad (8)$$

Tabela 2: Izračun stroška glede na število sestavov v EUR

Sestavi	Proizvodnja, ročno	Proizvodnja, simulacija
1	290.500	83.745
2	522.900	141.845
3	755.300	199.945
4	987.700	258.045
5	1.220.100	316.145



Slika 2: Povezava med stroškom in številom sestavov v fazi ustavljene proizvodnje

Rezultati nazorno prikazujejo, da je programiranje v fazi izvedbe projekta bistveno cenejše od programiranja v fazi proizvodnje. Temu pričakovano je rezultat izračuna tedaj, ko moramo proizvodnjo ustaviti, saj stroški ustavljene proizvodnje daleč presegajo preostale, zato je uporaba simulacijske programske opreme v tem primeru nujna.

Ko proizvodnje ni treba zaustaviti, izračunamo strošek pri ročnem programiranju z enačbo (9),

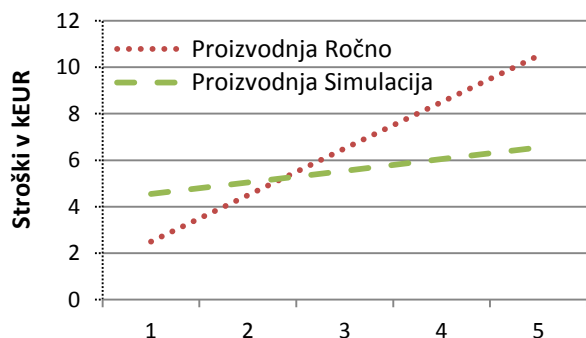
$$\text{strošek\_delujoča\_proizvodnja\_ročno [EUR]} = 400 + N \cdot 1600 + (1 + N \cdot 4) \cdot 100 \quad (9)$$

strošek pri uporabi simulacijske programske opreme pa z enačbo (10), kar je tudi predstavljeno v tabeli (3) in na sliki (3).

$$\text{strošek\_delujoča\_proizvodnja\_simulacija [EUR]} = 150 + N \cdot 400 + (1 + N) \cdot 100 + C_{osn} + C_{pak} + C_{sol} \quad (10)$$

Tabela 3: Izračun stroška glede na število sestavov v EUR

Sestavi	Proizvodnja, ročno	Proizvodnja, simulacija
1	2.500	4.545
2	4.500	5.045
3	6.500	5.545
4	8.500	6.045
5	10.500	6.545



Slika 3: Povezava med stroškom in številom sestavov v fazi delujoče proizvodnje

Uporaba simulacijske programske opreme je v primeru zaustavitve proizvodnje nujna, v fazi izvedbe projekta in proizvodnje, kjer lahko programiranje izvedemo v prosti izmeni, pa se njena uporaba ekonomsko upraviči že pri programiranju drugega oziroma tretjega sestava. Upoštevati moramo še, da nismo vrednotili vplivov simulacijske opreme v fazi ponudbe, kjer le-ta pozitivno vpliva na razvoj in pozneje na uspešen zaključek projekta.

## 7 SKLEP

Smotrnost uporabe simulacijske opreme za programiranje industrijskih robotov je odvisna od tipa in podrobnih zahtev posamezne aplikacije. Prav tako je odvisna od samega ponudnika simulacijske programske opreme in dobaviteljevega in kupčevega obvladovanja le-te. Splošen izračun, ki bi zajel vse vplivne veličine, ni mogoč, saj so številne od njih odvisne od specifične aplikacije, v kateri posameznih vplivnih veličin ne znamo vrednotiti ali je njihovo vrednotenje nenatančno.

Pri našem izračunu smo izvedli določene poenostavitve. Upoštevali smo le enega izdelovalca robotske opreme, izbrali en segment v industriji in v okviru njega eno aplikacijo, izbrali smo dve fazi projekta, kjer je vpliv največji, vse dejavnike, ki definirajo število različnih sestavov, smo sešteli in jih nismo obravnavali ločeno itd.

Izračuni jasno kažejo, da nam je simulacijska programska oprema lahko v aplikacijah paletiranja z industrijskimi roboti v pomoč pri izpolnjevanju v uvodu

podanih zahtev sodobnega trga (hitreje in ceneje). Kot primer kompleksnejših aplikacij naj navedemo aplikacijo nanašanja gelcoata na kalupe jadrnic v podjetju ELAN [16], kjer smo z uporabo simulacijske opreme za programiranje okoli 2500 točk za eno samo trajektorijo za petnajstkrat skrajšali čas programiranja. Če želijo dobavitelji robotskih rešitev in končni kupci le-teh povečati njihovo konkurenčnost na trgu, se mora delež uporabe simulacijske programske opreme v projektih paletiranja z industrijskimi roboti povečati.

Eden od načinov, da ta cilj dosežejo, je predstavitev prednosti kupcu s pravilnimi podatki že v fazi ponudbe proizvodne opreme. Pripadajoči izračuni pa morajo biti narejeni dolgoročno, ne le za fazo izvedbe.

## 8 REFERENCE

- [1] T. Bajd, M. Mihelj, J. Lenarčič, A. Stanovnik, M. Munič, »Robotics«, Springer 2009.
- [2] Ž. Majdič »Robotska celica za brušenje izdelkov iz ogljikovih vlaken«, Univerzitetno diplomsko delo, Ljubljana 2008.
- [3] Domača stran proizvajalca ABB, <http://www.abb.com> (01.06.2012).
- [4] Domača stran proizvajalca Yaskawa Europe GmbH, <http://www.yaskawa.com> (01.06.2012).
- [5] Domača stran proizvajalca Kuka roboter GmbH, <http://www.kuka-robotics.com> (01.06.2012).
- [6] Domača stran proizvajalca Fanuc corporation, <http://www.fanuc.co.jp/> (01.06.2012).
- [7] J. Lenarčič, T. Bajd, »Robotski mehanizmi«, Univerza v Ljubljani, Založba FE in FRI, Ljubljana 2003,
- [8] Domača stran proizvajalca CNC software, inc., <http://www.mastercam.com/> (01.06.2012)
- [9] »Product specification RobotStudio 3HAC026932-001 Revision E«, ABB AB Robotics Products, Västerås, June 2012.
- [10] »Product specification RobotStudio Paletizing PowerPack«, ABB AB Robotics Products, Västerås, June 2012.
- [11] »Technical reference manual RAPID 3HAC16581 Revision M«, ABB AB Robotics Products, Västerås, June 2012.
- [12] IFR statistical department c/o VDMA Robotics + Automation, »World Robotics Industrial robots 2011«, Frankfurt, 2011.
- [13] Domača stran proizvajalca AXIUM, <http://www.axiumsolutions.com> (01.06.2012).
- [14] ISO Standard 6780.
- [15] Cenik podjetja ABB d.o.o.
- [16] Arhiv projektov podjetja ABB d.o.o.
- [17] Uredba o davčni obravnavi povračil stroškov in drugih dohodkov iz delovnega razmerja (Uradni list RS, št. 140/2006, 76/2008).

**Karl Jerman** je diplomiral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zaposlen je kot vodja prodaje v podjetju ABB, d.o.o., kjer se večino časa ukvarja s podporo integratorjem robotske opreme ter in robotizacijo na področju živilske industrije.

**Boštjan Murovec** je diplomiral leta 1996, magistriral leta 1999 in doktoriral leta 2002, vse na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je zdaj docent. Področje njegovih raziskav so digitalna obdelava slik, razpoznavanje vzorcev, vgrajeni sistemi, kombinatorične optimizacije in analiza DNA sekvenc.