

Optimiranje zalog polizdelkov za hladilnike preko računalniškega modela in simulacije diskretnih dogodkov

Mihael DEBEVEC, Gregor ČREP

Izvleček: Podjetje Gorenje, d. d., je eden od večjih proizvajalcev hladilnikov. Proizvodne linije med drugim obsegajo lakirno linijo za lakiranje surovih izdelkov in vmesna skladišča gotovih lakiranih izdelkov, ki morajo zagotavljati dovolj velike kapacitete za obstoječi obseg proizvodnje in predmontažo. Gotovi lakirani izdelki se vgrajujejo na linijah predmontaže, za katere velja, da morajo delovati brez zaustavitev.

Podjetje načrtuje selitev proizvodnje hladilnikov na novo lokacijo, kjer se bo kapaciteta vmesnih skladišč gotovih lakiranih izdelkov zmanjšala za približno 6,5-krat. Manjša kapaciteta načrtovanih vmesnih skladišč za načrtovalce proizvodnega procesa pomeni izredno natančno planiranje procesa lakiranja, da so zagotovljeni vsi potrebni gotovi lakirani izdelki na linijah predmontaže ohišij in vrat v ustreznih količinah in ob upoštevanju minimalnih kritičnih zalog v primeru zastojev lakirnice. Iz tega razloga se je podjetje povezalo z laboratorijem LASIM na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani. V okviru raziskovalnega dela je bil izdelan računalniški model proizvodnega procesa lakiranja in predmontaže, ki preko izvajanja simulacije omogoča zasledovanje in sprotno spremljanje aktualnega stanja gotovih lakiranih izdelkov v vmesnih skladiščih glede na postavljeni proizvodni plan lakiranja.

Ključne besede: simulacija diskretnih dogodkov, modeliranje, optimizacija, proizvodni proces, velikoserijska proizvodnja

■ 1 Uvod

Proizvodni proces za proizvodnjo hladilnikov v podjetju Gorenje, d. d., obsega proizvodnjo surovih izdelkov, lakiranje surovih izdelkov, predmontažo, končno montažo in končno testiranje. Obstoječe proizvodne kapacitete vmesnih skladišč pred linijami predmontaže zagotavljajo gotove lakirane izdelke za en dan oziroma za 16 ur obratovanja linij predmontaže. Po načrtovani selitvi proizvodnje hladilnikov na novo lokacijo pa se bodo kapacitete vmesnih skladišč pred linijami predmontaže zmanj-

šale tako, da bodo zaloge gotovih lakiranih izdelkov zadostovale za 3,5-urno obratovanje linij predmontaže. Še pred dejanskim zagonom tovarne na novi lokaciji se zaradi načrtovanega zmanjšanja kapacitet vmesnih skladišč gotovih lakiranih izdelkov pojavlja vprašanje, ali bodo načrtovane kapacitete vmesnih skladišč zadostovale za nemoteno delovanje linij predmontaže.

Iz tega razloga so bile izvedene raziskave in izdelan simulacijski model dela proizvodnega sistema za izdelavo hladilnikov, ki preko podmodelov popisuje lakirnico in linije predmontaže. Cilj izdelave modela je bil, da preko izvajanja simulacije na podlagi postavljenih proizvodnih planov dobimo proizvodne časa za posamezne lote v lakirnici, obenem pa v vsakem trenutku dobimo tudi

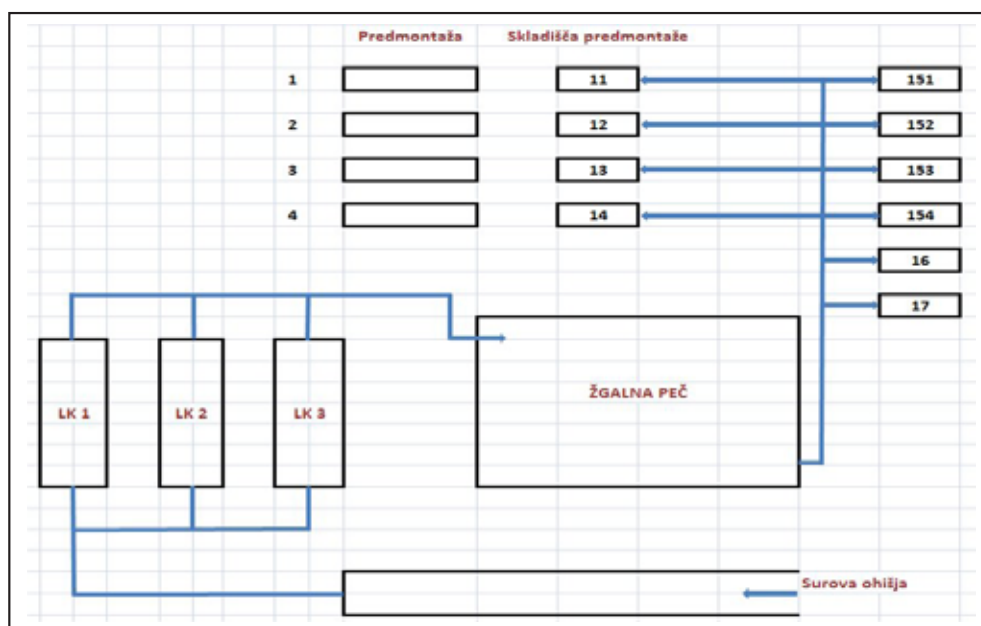
aktualno stanje zalog v posameznem vmesnem skladišču gotovih lakiranih izdelkov. Lot je v podjetju opredeljen kot skupina enakih surovih izdelkov v seriji, ki se kot skupina barva v enak barvni odtenek.

■ 2 Izhodišča za raziskave in cilji

V začetnem koraku raziskav so bile postavljene smernice za izdelavo simulacijskega modela in podrobno popisane karakteristike lakirnice v proizvodnem sistemu [1]. Obenem je bil podrobno popisani tudi proces predmontaže, s čimer smo zagotovili spremljanje aktualnih zalog v vmesnih skladiščih gotovih lakiranih izdelkov pred linijami predmontaže.

Bistveni deli opazovanega dela proizvodnje so sledeči (slika 1):

Dr. Mihael Debevec, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; Gregor Črep, dipl. inž., Gorenje, d. d., Velenje



Slika 1. Logična shema pretoka izdelkov v proizvodnji od zalogovnika surovih ohišij do linij predmontaže

- stropni verižni transporter, ki zagotavlja gibanje izdelkov od zalogovnika surovih ohišij preko lakirnice do vmesnih skladišč predmontaže,
- lakirnica s tremi lakirnimi kabina-mi,
- žgalna peč zagotavlja zaključek barvanja in sušenje izdelkov,
- deset vmesnih skladišč pred linijami predmontaže, v katera se skladiščijo gotovi lakirani izdelki glede na šifro, in
- štiri linije predmontaže, ki porabljajo gotove lakirane izdelke iz vmesnih skladišč.

Specialne karakteristike lakirnice smo zajeli preko parametrov delovanja v logičnem modelu in so sledeče [1]:

- lakirnica obratuje 2 izmeni dnevno (od 6.–14. ure in od 14.–22. ure) brez zaustavitev, 6 dni na teden, od ponedeljka do sobote,
- vsak posamezen izdelek se lakira v predhodno določeni lakirni kabini,
- v istem trenutku se lahko izvaja lakiranje le v eni lakirni kabini,
- lakirna kabina LK 1 je namenjena za barvanje v belo barvo, lakirni kabini LK 2 in LK 3 pa za barvanje v vse ostale barvne odtenke (slika 2),
- pri menjavi barvnega odtenka v lakirnih kabinah za barvne odtenke je potrebno upoštevati čas preureditve lakirne kabine na nov barvni odtenek.

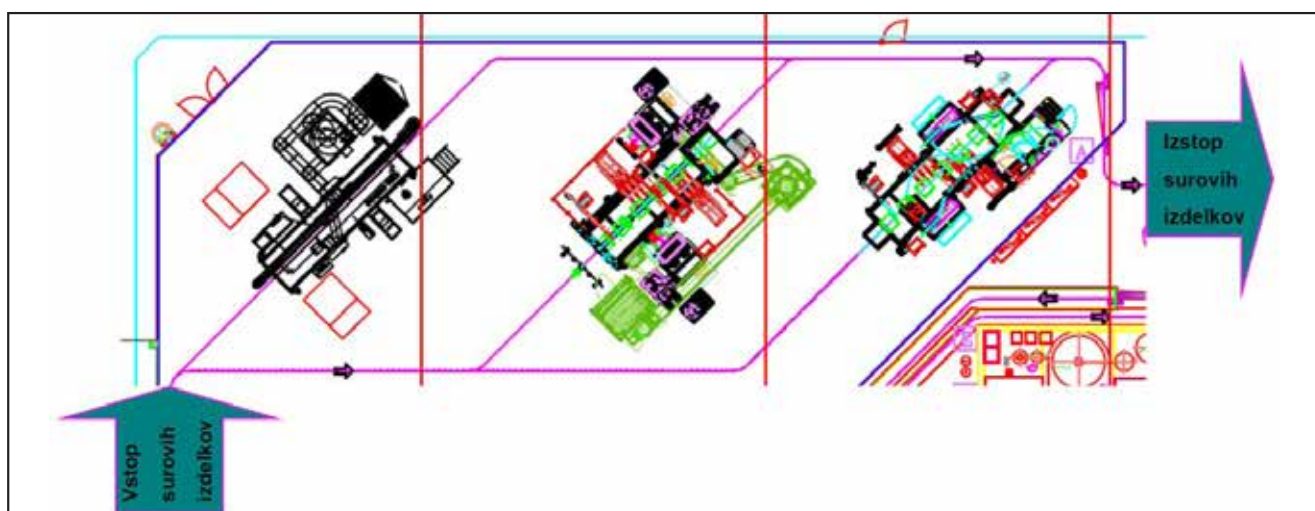
Proizvodni proces v lakirnici oziroma tok izdelkov preko lakirnice je dolo-

čen z naslednjimi proizvodnimi parametri [1]:

- takt procesa laki ranja je odvisen od takta verižnega stropnega transporterja in znaša 16 s,
- število šifer oziroma število različnih izdelkov v lakirnici je okrog 250,
- akira se 5 geometrijsko različnih izdelkov v 12 barvnih odtenkih,
- na posameznem obešalu verižnega stropnega transporterja je lahko različno število izdelkov, kar je odvisno od geometrijskega tipa izdelkov,
- v eni izmeni se polakira okrog 1600 obešal oziroma 3600 surovih izdelkov.

Za doseg zastavljenih ciljev za spremljanje aktualnih zalog v vmesnih skladiščih pred predmontažo smo izvedli sledeče korake:

- izdelava modela proizvodnega procesa lakiranja z raziskovalnim delom,
- izvajanje simulacije proizvodnega procesa lakiranja glede na proizvodni plan lakiranja in izvajanje simulacije predmontaže glede na proizvodni plan predmontaže,
- zagotovitev podatkov iz dejanske proizvodnje, kar je za potrebe raziskav priskrbelo podjetje Gorenje, d. d.,
- zagotovitev programskega orodja za raziskovalno delo ter pomoč pri izdelavi modela in izvajanju simulacije, kar je zagotovilo podjetje ITS, d. o. o.



Slika 2. Lakirne kabine v lakirnici in smer toka izdelkov

Po natančni opredelitvi zastavljenih ciljev in opredelitvi karakteristik proizvodnega procesa smo se lotili razvoja modela proizvodnega procesa lakirnice in predmontaže, ki bo zagotavljal spremljanje aktualnih zalog v vmesnih skladiščih gotovih lakiranih izdelkov pred linijami predmontaže.

■ 3 Model proizvodnega procesa

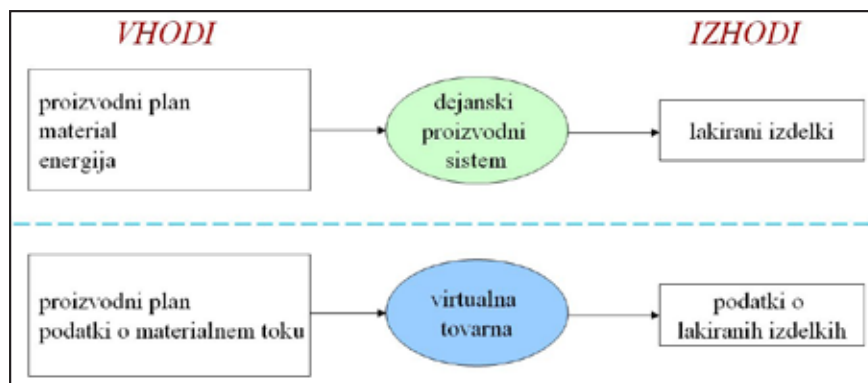
Izdelava modela proizvodnega procesa je potekala v dveh osnovnih korakih:

- v prvem koraku logična zasnova modela in
- v nadaljnjem koraku računalniški model in struktura uporabljenih podatkov.

3.1 Logična zasnova modela

Osnovni in glavni cilj pri raziskavah je bil oblikovanje virtualne tovarne opazovanega dela proizvodnega procesa, ki omogoča in zagotavlja izvajanje načrtovanega proizvodnega plana na enak način, kot se ta izvaja v dejanskem proizvodnem procesu ([2], [3]) (slika 3).

Pri gradnji modela opazovanega proizvodnega procesa je bil sam model zasnovan tako, da je omogočena



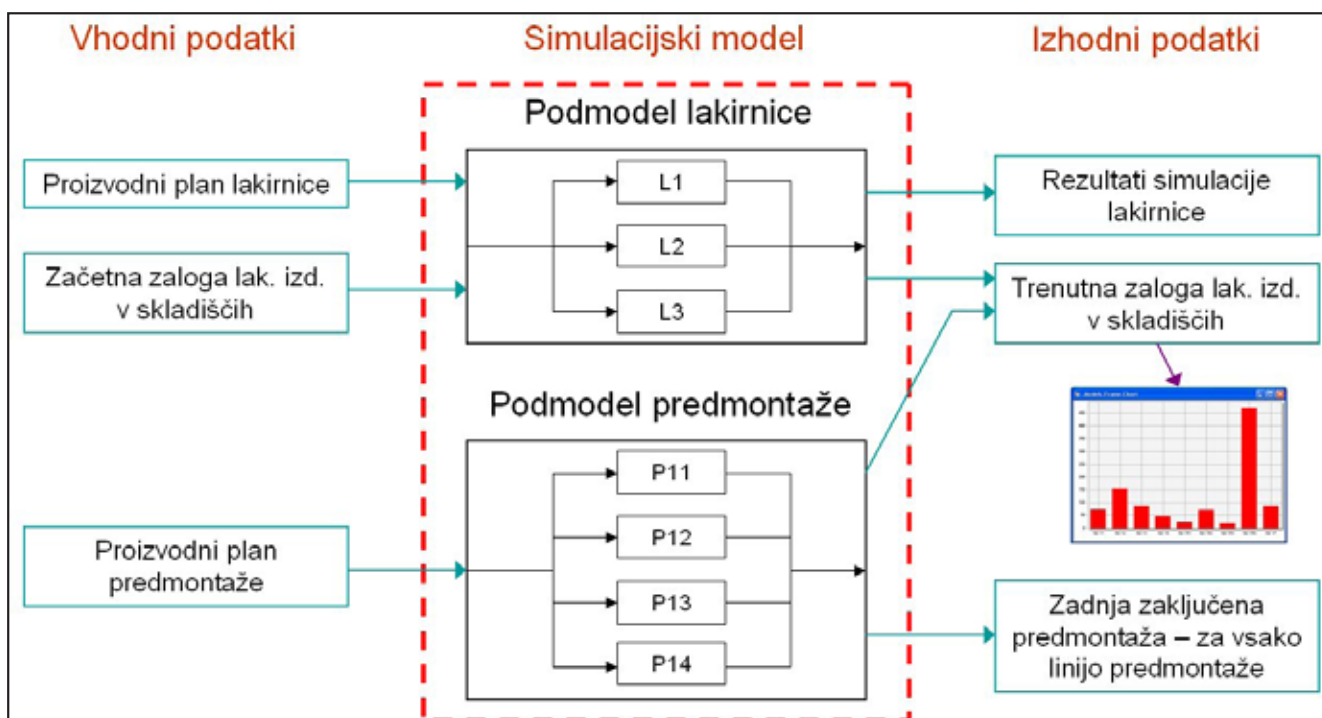
Slika 3. Osnovni princip virtualne tovarne

uporaba vhodnih podatkov, ki so namenjeni za dejansko proizvodnjo. Model je zasnovan parametrično, s čimer je omogočena uporaba različnih vhodnih podatkov, kot so na primer različni proizvodni plani. Obenem model opisuje dejanski proizvodni proces v taki meri, da so zajete vse njegove bistvene značilnosti ([2], [3]). Izpisi o proizvodnih časih v modelu so izdelani za lot, ki je privzet kot osnovni opazovani element materialnega toka v proizvodnem procesu.

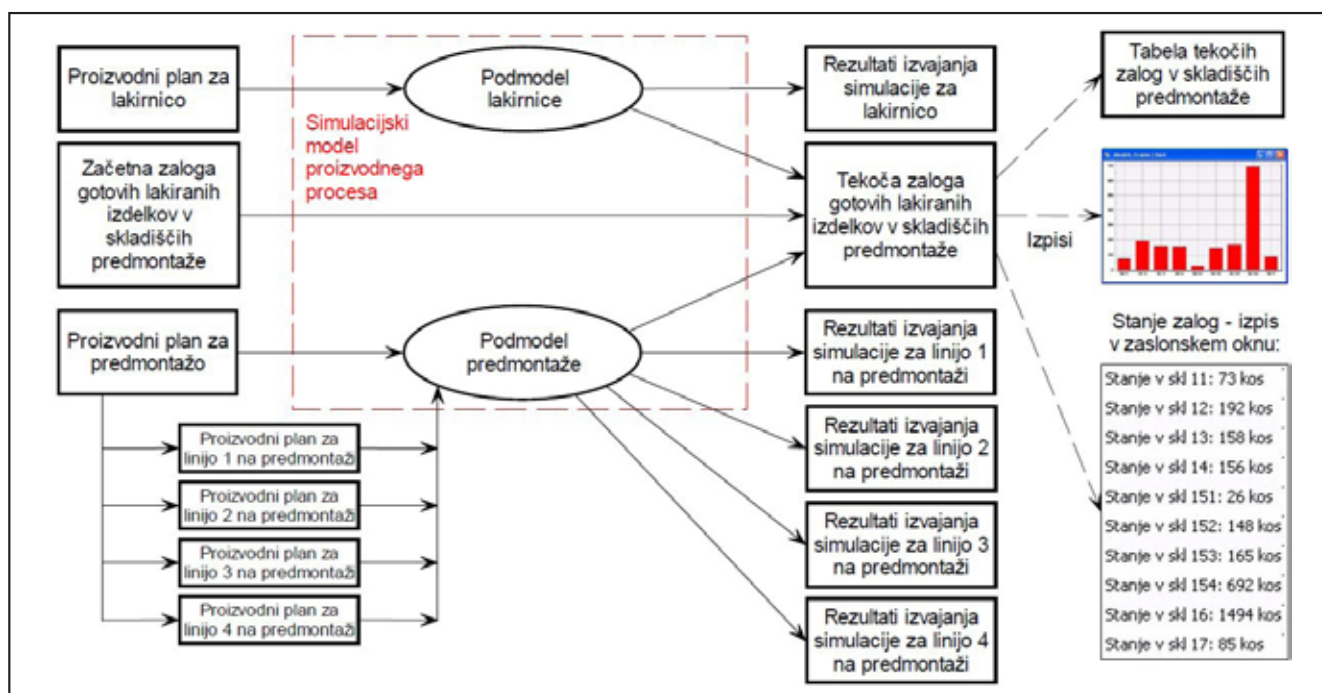
Na podlagi predpostavk virtualne tovarne ([2], [3]) in značilnosti dejanskega opazovanega proizvodnega procesa smo zasnovali logično shemo modela proizvodnega procesa (slika 4). Sam simulacijski model tako zajema podmodel lakirnice in podmodel predmontaže (slika 4).

Podmodel lakirnice opisuje proces lakiranja, pri čemer predstavlja vhodne podatke proizvodni plan za lakirnico, izhodne podatke pa proizvodni časi lotov gotovih lakiranih izdelkov (slika 5). Podmodel predmontaže opisuje odjem gotovih lakiranih izdelkov iz vmesnih skladišč predmontaže glede na proizvodni plan predmontaže, pri čemer predstavlja vhodne podatke podmodela proizvodni plan za predmontažo, izhodne podatke pa proizvodni časi zadnjih zaključenih predmontaž na posameznih linijah predmontaže (slika 5).

Z logično povezavo obeh podmodelov smo vzpostavili zasledovanje ažurnega stanja gotovih lakiranih izdelkov v vmesnih skladiščih pred linijami predmontaže.



Slika 4. Logična shema simulacijskega modela



Slika 5. Relacije med strukturami podatkov v modelu opazovanega proizvodnega procesa

Za model proizvodnega procesa smo zasnovali ustrezne relacije med podatkovnimi strukturami, ki so uporabljene v modelu (slika 5). Za spremljanje aktualne zaloge gotovih lakiranih izdelkov moramo spremljati stanje v treh podatkovnih strukturah modela: začetno zalogo gotovih lakiranih izdelkov v skladiščih pred linijami predmontaže, število izdelanih gotovih lakiranih izdelkov v podmodelu lakirnice in število porabljenih gotovih lakiranih izdelkov v podmodelu predmontaže.

Tekočo zalogo gotovih lakiranih izdelkov sproti spremljamo preko treh različnih izpisov (slika 5), da je ažurno stanje zalog uporabniku kar najbolj nazorno predstavljeno:

- preko tabele tekočih zalog v skladiščih predmontaže,
- preko grafa tekočih zalog in
- preko izpisa v zaslonskem oknu s prikazom števila gotovih lakiranih izdelkov v posameznem skladišču predmontaže.

Na osnovi logične sheme modela in relacij med podatkovnimi strukturami v modelu smo izdelali računalniški simulacijski model lakirnice in predmontaže.

3.2 Računalniški model in struktura podatkov

Računalniški model smo v okviru

raziskovalnega dela izdelali v programskem paketu Plant Simulation 7.6 (slika 6).

V modelu so enostavne logične odvisnosti proizvodnega procesa popisane s standardnimi objekti programskega paketa, zahtevnejše

- vhodni podatki za proces predmontaže (*Proizvodni plan predmontaže* na sliki 4, preglednica 2) in
- vhodni podatki o začetnih zalogah v vmesnih zalogovnikih predmontaže (*Začetna zaloga lak. izd. v skladiščih* na sliki 4, preglednica 3).

Preglednica 1. Primer podatkov za proizvodni plan lakirnice

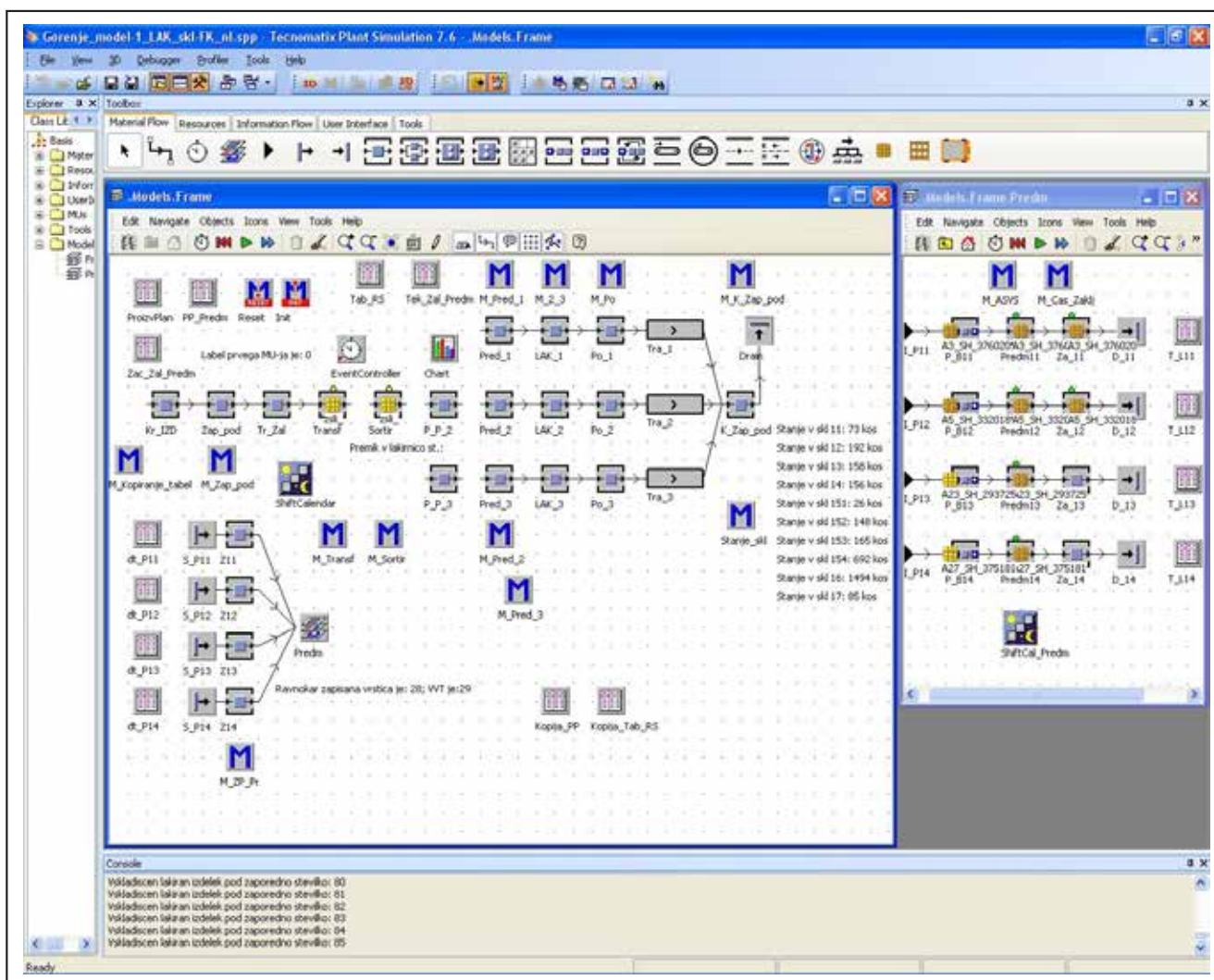
Šifra	Zaporedje	Količina	Št. kosov na obešalo	Št. lak. kabine	Čas menjave (min.)	Št. predmontaže - skladišče	Transport od razlaganja do skladišča ohišij in vrat (min.)
280607	1	90	1	2		12	1
307630	2	60	1	1		13	1
303223	3	70	2	1		153	4
303228	4	80	4	1		153	4
279768	5	90	20	2		16	1

logične odvisnosti pa z metodami oziroma podprogrami v programskem jeziku SimTalk ([4], [5], [6]).

Potrebni vhodni podatki za računalniški model, ki jih je zagotovilo podjetje Gorenje, d. d., iz dejanske proizvodnje, so zapisani v tabelah in so sledeči:

- vhodni podatki za proces lakiranja (*Proizvodni plan lakirnice* na sliki 4, preglednica 1),

Vhodni podatki za proces lakiranja (preglednica 1) zajemajo vse bistvene podatke o lakiranju izdelkov v posameznem lotu: ID oznako, količino izdelkov v lotu, število kosov na obešalo, oznako lakirne kabine, oznako vmesnega skladišča in čas transporta od lakirne kabine do vmesnega skladišča. Vhodni podatki za proces predmontaže (preglednica 2) zajemajo vse bistvene podatke o procesu predmontaže posameznega hladilnika:



Slika 6. Računalniški model v Plant Simulation

Preglednica 2. Primer podatkov za proizvodni plan predmontaže

Šifra hladilnika	Količina serije	Zap. številka zapisa	Šifra lak. ohišja	Št. lak. ohišij (kos)	Skladišče	Šifra lak. vrat HI	Št. lak. vrat HI	Skladišče	Šifra lak. vrat ZO	Št. lak. vrat ZO	Skladišče	Šifra lak. robnika SP	Št. lak. robnik SP	Skladišče	Šifra lak. vezni profil SR	Število lak. vezni profil SR	Skladišče	Šifra lak. vezni profil ZG	Število lak. vezni profil ZG	Skladišče	Šifra lak. letev podnožna OT	Število lak. letev podnožna OT	Skladišče
335551	168	A1	138333	1	11	253211	1	151	253216	1	151	105413	1	16	107672	1	16	105403	1	16		0	16
382423	70	A2	138333	1	11	318946	1	151	263064	1	151	105413	1	16	107672	1	16	105403	1	16		0	16
376020	4	A3	138333	1	11	379225	1	151	263064	1	151	105413	1	16	107672	1	16	105403	1	16		0	16
332018	210	A4	138333	1	12	253211	1	152	253216	1	152	105413	1	16	107672	1	16	105403	1	16		0	16
332018	70	A5	138333	1	12	253211	1	152	253216	1	152	105413	1	16	107672	1	16	105403	1	16		0	16

šifra hladilnika, količina serije in za vsak sestavni del, ki se vgradi v posamezen hladilnik: šifra, število in skladišče lakiranega izdelka.

Začetno zalogo v posameznem skladišču pred linijami predmontaže pred začetkom izvajanja simulacije vnese-

mo v preglednico Začetna zaloga lak. izd. v skladiščih (preglednica 3).

Zadnji korak pred izvajanjem simulacije je nastavitev začetnega časa simulacije in parametrov o režimih dela tako za lakirnico kot predmontažo oziroma nastavitev delovnih kole-

darjev za vsako posamezno izmeno.

4 Izvajanje simulacije modela proizvodnega procesa

Z izvajanjem simulacije modela proizvodnega procesa smo pridobili sledeče podatke:

Preglednica 3. Primer podatkov za začetno zalogo lakiranih izdelkov

Skladiščno mesto	Začetna zaloga lakiranih izdelkov
11	90
12	120
13	90
14	90
151	88
152	12
153	125
154	812
16	1000
17	85

- izhodne podatke za proces lakiranja (*Rezultati simulacije lakirnice* na sliki 4, *preglednica 4*),
- podatke o aktualnih zalogah gotovih lakiranih izdelkov v vmesnih skladiščih pred predmontažo (*Trenutna zaloga lak. izd. v skladiščih* na sliki 4, *preglednica 5*); na podlagi teh podatkov sta izdelana še:
- izpis aktualne zaloge gotovih lakiranih izdelkov v vmesnih skladiščih predmontaže neposredno preko izpisov v zaslonskem oknu in
- izpis aktualne zaloge gotovih lakiranih izdelkov v vmesnih skladiščih predmontaže preko grafa (*slika 7*).

V tabeli o rezultatih simulacije za proces lakiranja (*preglednica 4*) so zbrani podatki o času začetka lakiranja posameznega lota in o času uskladiščenja posameznega lota v vmesno skladišče gotovih izdelkov. Ta čas nam daje podatek, kdaj so posamezni gotovi izdelki pripravljeni za vgradnjo na linijah predmontaže. Časi so

Preglednica 5. Primer tabele s podatki o aktualnih zalogah v skladiščih

Skladiščno mesto	Št. izdelanih izdelkov od začetka simulacije	Tekoča zaloga	Št. porabljenih izdelkov od začetka simulacije
11	224	72	242
12	313	153	280
13	308	85	313
14	306	46	350
151	420	24	484
152	618	70	560
153	520	19	626
154	360	472	700
16	3620	752	3868
17	0	85	0

spremljani v dveh zapisih: absolutno in relativno glede na čas začetka izvajanja simulacije in obenem pripravljene za nadaljnje analize.

V tabeli o aktualnih zalogah v skladiščih (*preglednica 5*) so zbrani podatki o aktualnem številu gotovih lakiranih izdelkov v posameznem vmesnem skladišču pred predmontažo. Poleg teh podatkov so v tej tabeli zbrani tudi podatki o aktualnem številu izdelanih gotovih lakiranih izdelkov od začetka simulacije in podatki o aktualnem številu porabljenih gotovih lakiranih izdelkov od začetka simulacije.

Graf aktualnih zalog gotovih lakiranih izdelkov v vmesnih skladiščih pred predmontažo (*slika 7*) prikazuje aktualno stanje izdelkov v posameznem skladišču pred predmon-

tažo in se obnavlja ob vsakem zaključku lakiranja posameznega lota.

5 Ugotovitve

V prispevku smo predstavili primer dobre prakse sodelovanja med industrijo in fakulteto. Rezultat raziskovalnega dela kaže prednosti in možnosti, ki jih imamo z izdelavo

**Slika 7.** Izpis aktualne zaloge preko grafa**Preglednica 4.** Izhodni podatki simulacije o procesu lakiranja

Šifra	Zaporedje	Količina	Št. kosov na obešalo	Št. lak. kabine	Čas menjave (min.)	Št. predmontaže skladišče	Transport od razlaganja do skladišča ohišij in vrat (min.)	Začetek lakiranja (Date/Time)	Začetek lakiranja (Time)	Konec lakiranja (Date/Time)	Konec lakiranja (Time)
280607	1	90	1	2		12	1	2012/10/15 06:00:00.0000	0.0000	2012/10/15 06:51:00.0000	51:00.0000
307630	2	60	1	1		13	1	2012/10/15 06:24:00.0000	24:00.0000	2012/10/15 07:15:00.0000	1:15:00.0000
303223	3	70	2	1		153	4	2012/10/15 06:40:00.0000	40:00.0000	2012/10/15 07:29:00.0000	1:29:00.0000
303228	4	80	4	1		153	4	2012/10/15 06:49:20.0000	49:20.0000	2012/10/15 07:38:20.0000	1:38:20.0000
279768	5	90	20	2		16	1	2012/10/15 06:54:40.0000	54:40.0000	2012/10/15 07:40:40.0000	1:40:40.0000

modela in izvajanjem simulacije:

- imamo možnost nastavitve različnih delovnih koledarjev tako za lakirnico kot za predmontažo,
- imamo možnost nastavitve različnih režimov odmorov za delavce v posameznih izmenah tako za lakirnico kot za predmontažo,
- imamo možnost nastavitve različnih začetnih zalog v vmesnih skladiščih gotovih lakiranih izdelkov pred linijami predmontaže,
- imamo možnost hitrega izvajanja različnih proizvodnih planov tako za lakirnico kot za predmontažo,
- imamo možnost hitrega spreminjanja velikosti lotov v proizvodnih planih,
- imamo možnost nastavljanja hitrosti izvedbe simulacije oziroma jo lahko izvajamo po korakih,
- z enostavnimi dograditvami imamo možnost izdelave želenih izpisov o poteku simulacije.

Z raziskovalnim delom izdelan simulacijski model smo testirali na podatkih iz dejanske proizvodnje, pri čemer smo dokazali uporabnost izdelanega modela. Predstavljeni model je v primerjavi s preračuni napovedovanja poteka proizvodnega procesa mnogo bolj uporaben, ker dosledno upošteva zaporedje izvajanja posameznih operacij lakiranja ob pogoju, da se posamezna operacija lakiranja lahko izvede takrat, ko so

izpolnjeni vsi pogoji za njen začetek.

Meritve porabljenega časa za izvedbo simulacije so v fazi testiranja modela pokazale, da porabimo po opravljenih začetnih nastavitvah približno 15 sekund za izvedbo simulacije proizvodnega procesa za cel delovni dan (dve izmeni), kar je bistveno hitreje od preračunov napovedovanja poteka proizvodnega procesa.

Sama zgradba simulacijskega modela, ki je sestavljen iz funkcionalnih podmodelov, v našem primeru podmodela lakirnice in podmodela predmontaže, se je izkazala za zelo uporabno. Preko podmodela lakirnice sprotno zasledujemo število izdelanih gotovih lakiranih izdelkov, kjer je najmanjša enota skupine enakih gotovih lakiranih izdelkov lot. Preko podmodela predmontaže pa zasledujemo število porabljenih gotovih lakiranih izdelkov iz skladišč pred linijami predmontaže. In z ustrezno povezavo obeh podmodelov sprotno zasledujemo ažurno stanje lakiranih izdelkov v vmesnih skladiščih predmontaže v kateremkoli trenutku simulacije. Ažurno stanje v skladiščih gotovih izdelkov sprotno izpisujemo na želen način in v želeni obliki.

Na splošno pa je glavna in bistvena prednost virtualne proizvodnje preko izdelave modelov in izvajanja

simulacije v primerjavi z dejansko proizvodnjo ta, da se ne porablja nič materiala, nič energije in se ne uporabljajo proizvodna sredstva, ampak se obdelujejo le podatki.

Literatura

- [1] Podatki o podjetju Gorenje, d. d. – interno gradivo, Velenje, 2012.
- [2] Debevec, M.: Modeliranje strege orodij pri obdelavi v digitalnem okolju, doktorska disertacija, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2010.
- [3] Debevec, M., Herakovič, N.: Virtualna proizvodnja v virtualni tovarni za primere maloserijske proizvodnje, Posvet Avtomatizacija strege in montaže 2011 – ASM '11: zbornik posveta, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2011.
- [4] Bangsow, S.: Manufacturing simulation with Plant Simulation and Simtalk: Usage and Programming with Examples and Solutions, Heidelberg: Springer, Berlin, 2010.
- [5] eM-Plant: Reference Manual, Tecnomatix Technologies GmbH & Co. KG, 1998.
- [6] eM-Plant: Objects Manual, Tecnomatix Technologies GmbH & Co. KG, 1998.

Optimization of stock of semi-finished parts for refrigerators through a model in computer and discrete event simulation

Abstract: Gorenje d.d. is one of the major manufacturers of refrigerators. The production lines among other includes painting line for painting raw products and intermediate storages of finished painted products, which should provide sufficient capacity for the existing production volume and pre-assembly. The finished painted products are installed on the pre-assembly lines, for which are considered to be operating without stopping.

The company plans to relocate a refrigerators production to a new location, where the capacity of the interim storages of finished painted products is decreased by approximately 6.5 times. The reduced capacity of planned interim storages for planners of production process means extremely precise planning of painting process that all the necessary finished painted products are provided on the pre-assembly lines for housings and doors in the appropriate quantities and also the minimal critical stocks must be considered for the cases of painting line deadlocks. For this reason, the company has connected with laboratory LASIM from the Faculty of Mechanical Engineering in Ljubljana. Within the researches there was developed a computer model of the painting and pre-assembly production process that through the implementation of simulation enables tracking and real-time monitoring of the current status of finished painted products stock in intermediate storages with regards to the production plan of painting.

Keywords: discrete event simulation, modelling, optimization, production process, large-scale production