# Določanje optimalnega nabora informacijskih terminalov za spremljanje proizvodnje v kosovnih industrijah

**Kleindienst Jani, Juričić Đani**
**Synatec d.o.o., Institut Jožef Stefan**
**Vojkova 8B, Idrija; Jamova 39, Ljubljana**
**jani.kleindienst@synatec.si, dani.juricic@ijs.si**

***Optimal selection of information terminals for production monitoring in manufacturing industries***

***Cilj avtomatskega spremljanja proizvodnje v kosovnih industrijah je zagotavljanje kakovostnih informacij o poteku predvidenih faz proizvodnega procesa. Način zbiranja podatkov je uporaba namenskih informacijskih terminalov. Problem, ki se tukaj pojavlja je, kako določiti optimalno število terminalov. V prispevku predstavljen pristop temelji na optimizaciji stohastične kriterijske funkcije.***

## 1 Uvod

V številnih proizvodnih podjetjih se vodstva odločajo za uvajanje sistemov za avtomatizirano spremljanje proizvodnje. Taki sistemi delujejo vzporedno s poslovnimi informacijskimi sistemi ali sistemi ERP ter se z njimi dopolnjujejo [1]. Za zajem podatkov v proizvodnji obstaja več načinov [2]:

- "ročno" v obliki pisnih poročil,
- neposredno iz strojev (avtomatsko),
- s prijavljanjem oz. elektronskim vnosom različnih dogodkov s pomočjo namenskih terminalov.

Pomembni podatki iz proizvodnje se nanašajo na čase, porabljene na posameznih operacijah delovnega naloga, število izdelanih kosov, število in vzroke izmeta ter podatke o tipih in trajanjih zastojev.

Učinkovit način za zbiranje dogodkov je z namestitvijo posebnih terminalov (glej sliko 1). Za hitrejši vnos podatkov so delavcu lahko v pomoč razne tehnologije. Najpogosteje se uporablja črtna koda [4]. S črtno kodo je mogoče opremiti večino spremne in delovne dokumentacije v proizvodnji, osebne kartice delavcev ter pripraviti ustrezne šifrante strojev in zastojev.


Slika 1: Primer terminala za ročni vnos dogodkov iz proizvodnje

Pred postavitvijo terminalov je potrebno upoštevati:

- porazdelitev dogodkov, ki se pojavljajo v proizvodnem obratu,
- čas trajanja posameznih prijav,
- razdalje med delovnimi mesti in terminali,
- stroške terminalov, oz. stroške vzdrževanja in ožičenja.

Z nižanjem števila nameščenih terminalov, se stroški namestitve sicer manjšajo, posledično pa se večajo stroški zaradi čakanja delavcev na vnos podatkov. Problem, ki ga v tem prispevku obravnavamo je določitev optimalne razmestitve terminalov, ki bo minimizirala *celotno* stroškovno kriterijsko funkcijo.

Prispevek je strukturiran na naslednji način. V prvem poglavju je formuliran problem izbora terminalov kot stohastični optimizacijski problem. Poudarek je na uporabi statistike prijav dogodkov ugotovljenih na podlagi zgodovine procesa. V drugem poglavju je opisan način reševanja optimizacijskega problema z uporabo simulacije. V tretjem poglavju so predstavljeni rezultati, dobljeni na konkretnem primeru iz kosovne proizvodnje.

## 2 Postavitev problema

### *2.1 Organizacija kosovne proizvodnje*

Da bi lažje predstavili problem, se spomnimo kako je strukturirana proizvodnja v kosovni industriji.

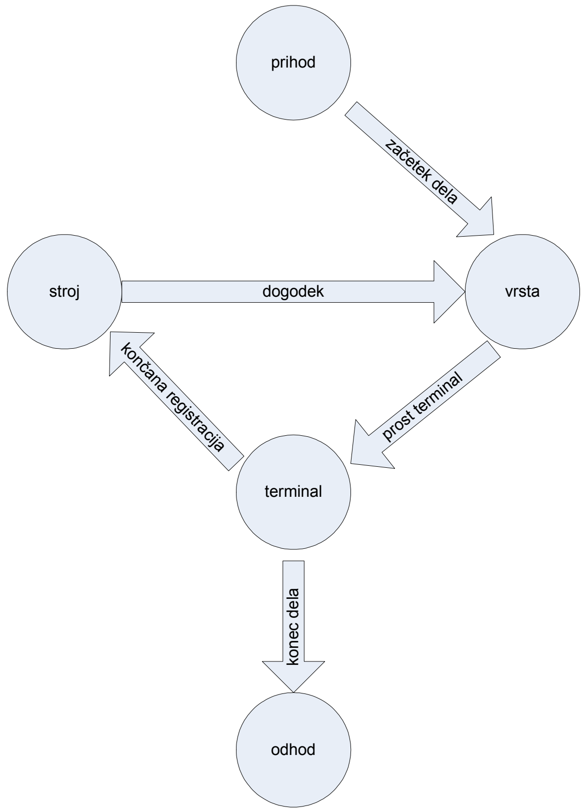
Delo je organizirano preko *delovnih nalogov*, katerih rezultat je določena količina *enakih izdelkov*. Delovni nalog je običajno razdeljen na več diskretnih operacij, katerih nabor in vrstni red določa tehnološki postopek izdelave izdelka. Vsak delavec je zadolžen za svoje *delovno mesto* in posledično za izvajanje ustreznih *operacij*. Delovno mesto v tem primeru razumemo kot množico enega ali več strojev, ki so sposobni izvajati enako proizvodno operacijo.

Z namenom doslednega sledenja učinkovitosti proizvodnje je običajno treba beležiti naslednje *dogodke* [3]:

- začetek dela na operaciji delovnega naloga,
- konec dela,
- začetek zastoja,
- konec zastoja.

### *2.2 Izvor čakalnih časov*

Ob prijavi začetka dela so potrebni podatki o delavcu in stroju, ki operacijo izvajata ter podatki o operaciji in pripadajočem delovnem nalogu. Ob prijavi zastoja pa poleg omenjenih podatkov beležimo še podatke o tipu oziroma vzroku zastoja, ki se običajno izbere iz pripravljenega seznama. Potek prijavljanja dogodkov je ilustriran na sliki 2.




Slika 2: Posamezne faze v postopku beleženja dogodkov.

Za *prijavo* vsakega dogodka je potrebno, da delavec pristopi k ročnemu terminalu in vnese potrebne podatke, ki so karakteristični za posamezni dogodek. V primeru, da je terminal zaseden, mora delavec počakati, da pride na vrsto. Predpostavlja se, da se delavec lahko prijavi na katerikoli terminal. Čas, ki je potreben za dostop do terminala pri tem zanemarimo.

Z namestitvijo dovolj velikega števila terminalov se je mogoče v celoti izogniti čakalnim časom. Seveda to ni racionalna rešitev zaradi stroškov, ki nastanejo pri nabavi, namestitvi in vzdrževanju terminalov. Zato je potrebno definirati takšno kriterijsko funkcijo, ki bo vključevala tako stroške zaradi čakanja na vnos, kakor tudi stroške zaradi nabave terminalov.

### *2.3 Kriterijska funkcija*

Naj bo $N$ število terminalov in $J_{cost}(N)$ funkcija stroškov, ki jih ima podjetje z njihovo namestitvijo, normirana na en dan. Izhodišče predstavlja amortizacijska doba terminala, ki znaša 4 leta. Letni strošek terminala, ki se razdeli na število delovnih dni v letu, je tako sestavljen iz stroškov amortizacije in stroškov vzdrževanja. Prvi znaša četrtino, drugi pa desetino nabavne cene na leto.

Dnevni stroški $J_w(N)$, ki nastanejo zaradi čakalnih časov za prijavo dogodkov na terminalu so preprosto

$$J_w = c_w \tau(N) \tag{1}$$

pri čemer je $c_W$ cena dela delavca v enoti časa, $\tau(N)$ pa kumulativni dnevni čas čakanja.

***Komentar 1***

Čas potreben za vnos dogodka znaša cca 30 sekund in se ne šteje za izgubo, tako kot čas čakanja.

***Komentar 2***

Pričakovani dnevni čakalni čas $\tau(N)$ je naključna spremenljivka, ki je opisana z neko funkcijo porazdelitve gostote verjetnosti $p(\tau(N))$, ki je definirana na odprtem intervalu $[0,\infty)$. Njena analitična oblika ni znana.

Zaradi raztrosa čakalnih časov pri možnih realizacijah je smiselno poiskati takšen $\tau_\alpha$ za katerega velja, da je verjetnost $P(\tau\leq\tau_\alpha)=1-\alpha$, pri čemer je $0\leq\alpha\leq1$ stopnja signifikantnosti. Npr. pri $\alpha=0{,}05$ lahko s 95% verjetnostjo trdimo, da bo realizirani čakalni čas pri danem številu terminalov $N$ enak $\tau(N)\leq\tau_{0.05}(N)$ [5].

Torej, za optimalno izbiro terminalov rešujemo naslednji stohastični optimizacijski problem

$$N^* = \underset{N\geq 1}{arg\,min}\left(J_{cost}(N) + c_w \tau_\alpha(N)\right) \tag{2}$$

***Komentar 3***

Kriterijska funkcija (2) je unimodalna saj je prvi člen v vsoti na desni strani strogo monotono naraščajoča funkcija števila terminalov N, drugi člen pa strogo monotono padajoča funkcija argumenta N. Torej, zagotovo obstaja $N^*$ pri katerem dosežemo minimum.

## 3 Reševanje optimizacijskega problema

Za reševanje problema (2) je pomembno poznavanje porazdelitve dogodkov tekom delovnega časa. Frekvenca nastajanja dogodkov se med delovnim časom spreminja in je zelo odvisna od tipa proizvodnje.

Reševanje optimizacijskega problema temelji na pripravi učnih podatkov in na izračunu statističnih parametrov v kriterijski funkciji (2). Množico tovrstnih podatkov imenujemo *učna množica.*

### *3.1 Priprava učnih podatkov*

Časovno realizacijo dogodkov za učno množico pridobimo iz obstoječega sistema za spremljanje proizvodnje (ki je lahko povsem "ročni") ali pa sestavljen iz sorodnih informacijskih virov, ki hranijo podatki o realizaciji in zastojih. Vsak zapis o opravljenem delu in zastoju vsebuje tudi podatka o začetku in koncu posamezne aktivnosti, ki ju lahko smatramo kot posamezna dogodka. Končni rezultat je zaporedje časov pojavitve dogodkov po dnevih znotraj učne množice. Točnost učnih podatkov je velikega pomena. Problem predstavljajo predvsem zaokrožanja časov pri ročnem vnosu. Posledica tega je večja gostota dogodkov okoli polnih ur, kar pomeni izračun večjih čakalnih časov od dejanskih.

### *3.2 Izračun čakalnih časov na učni množici*

Osnova izračunu so podatki o časovni realizaciji dogodkov na učni množici. Vsi dogodki so predstavljeni z datumom in časom, pred obdelavo pa se kronološko razvrstijo. Obdelava vsakega dogodka poteka po sledečem postopku:

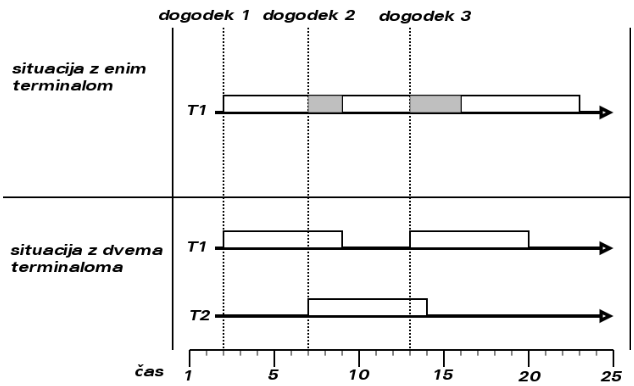
1. poišče se terminal, ki bo prvi prost za prijavo;
2. preveri se, kdaj se terminal sprosti za prijavo (če je terminal že prost, se prijava lahko prične takoj);
3. izračuna se čas čakanja (razlika med časom sprostitve terminala in časom dogodka);

4. terminal se rezervira še za čas prijavljanja;

5. za tekoči dan se poveča skupni čas čakanja za vrednost iz 3. točke.

Končni rezultat je zaporedje čakalnih časov po dnevih T={$\tau_1$,...,$\tau_M$}. Časovna kompleksnost omenjenega algoritma je $O(m*N_{max})$, pri čemer *m* predstavlja število vseh dogodkov v učnem intervalu, $N_{max}$ pa predstavlja največje število terminalov, za katerega nas še zanimajo podatki o čakalnih časih.

Na sliki 3 sta prikazana primera izračuna čakalnih časov za situaciji z enim in dvema terminaloma. V obeh primerih nastopijo trije dogodki ob časih 2, 7 in 13. Obdelava vsakega izmed dogodkov na terminalu traja 7 časovnih enot. Prvi dogodek ob času 2 takoj preide v obravnavo v obeh situacijah. Enako se v situaciji z dvema terminaloma zgodi pri preostalih dveh dogodkih. V situaciji z enim terminalom pa je le-ta zaseden ob nastanku drugega in tretjega dogodka. Obravnava drugega dogodka, ki se pojavi ob času 7, se odloži do sprostitve terminala (čas 9). Obravnava tretjega dogodka pa se iz enakega razloga prestavi iz časa nastanka 13 za 3 časovne enote. Čakalni čas je na diagramu osenčen. V navedenem primeru je čakalni čas pri enem terminalu 5 časovnih enot, pri dvema terminaloma pa čakanja ni bilo.




Slika 3: Ilustracija izračuna čakalnih časov.

### *3.3 Določanje kritičnih čakalnih časov*

Na podlagi množice T se lahko izračuna histogram za naključno spremenljivko $\tau_d$. Histogram je približek za funkcijo porazdelitve verjetnosti p($\tau_d$) dnevnega časa čakanja $\tau_d$. Seveda se le-ta spreminja v odvisnosti od števila terminalov in je njena analitična oblika v splošnem težko določljiva.

Čeprav poznamo vsote posameznih komulativnih čakalnih časov $\tau_1$, ..., $\tau_M$, računane za dneve 1, ..., M, je analitično nemogoče določiti povezavo med p($\tau_d$) in p($\tau$).

Za določitev $\tau_\alpha$, porazdelitve p($\tau$) uporabimo **centralni limitni izrek**, ki pravi:

**Izrek (centralni limitni izrek):** naj bodo $x_1$, $x_2$, ..., $x_n$ neodvisne naključne spremenljivke enake porezdelitve, srednje vrednosti $\mu$ in variance $\sigma^2$. Naj bo

$$S_n = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \qquad (3)$$

in

$$Z_n = \frac{S_n - \mu}{\sigma} \qquad (4)$$

Limitno razmerje $Z_n$ je normalno porezdeljeno z varianco $\sigma^2$ = 1.

Za potrebe našega problema se osredotočimo na vsoto

$$\tau_M = \sum_{i=1}^{M} \tau_i \qquad (5)$$

naključno porazdeljenih $\tau_i$ s srednjo vrednostjo $\mu$ in varianco $\sigma^2$. Potem je tudi standardna vsota

$$Z_M = \frac{\frac{\tau_M}{M} - \mu}{\sigma} \qquad (6)$$

porazdeljena normalno s srednjo vrednostjo 0 in varianco 1. Za vrednost $Z_\alpha$ poznamo

$$P(z \le Z_\alpha) = \alpha \qquad (7)$$

iz tabele kritičnih vrednosti normalne porazdelitve. Na primer, za vrednost $\alpha$ = 0,05 je $Z_\alpha$ = 1,6449. $\tau_\alpha$ dobimo iz

$$\tau_\alpha = M(Z_\alpha \sigma + \mu) \qquad (8)$$

### 3.4 *Optimizacijski postopek*

Kriterijska funkcija (2) ima argument iz množice naravnih števil. V našem primeru imamo opravka z enodimenzionalnim problemom kjer je iskanje sorazmerno enostavno, saj gre minimume običajno pričakovati pri relativno majhnih vrednosti števila terminalov. Zato bomo uporabili nasjbolj enostaven postopek:

*inicializacija:*

$N_{opt} = 0,\ J_{opt} = 1e10$

*za* $N = 1$ *do* $N_{max}$ *izvajaj*

*izračun histograma čakalnih časov na učni množici za N terminalov*

*izračun kritičnega čakalnega časa* $\tau_\alpha$

*izračun kriterijske funkcije J(N)*

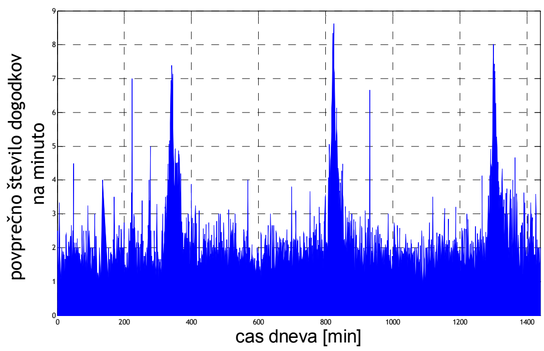
*če je* $J(N) < J_{opt}$ *izvedi*

$N_{opt} = N$

$J_{opt} = J(N)$

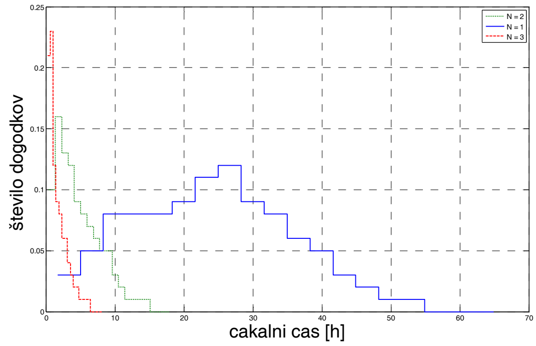
## 4 Primer uporabe

V nadaljevanju bomo predstavili primer uporabe v kosovni industriji. Gre za obrat z okoli 60 delavci v dveh izmenah. Število strojev je prav tako 60. Delni vpogled v naravo proizvodnje odraža frekvenca dogodkov v obratu (slika 4).



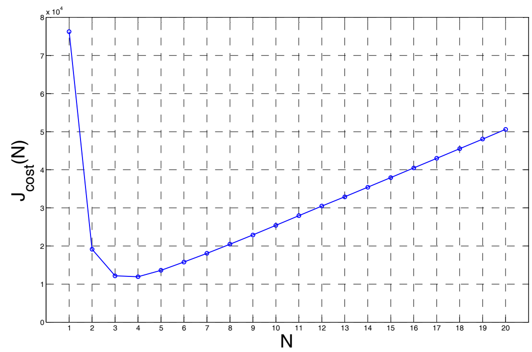

Slika 4: Povprečno število dogodkov na minuto.

Učna množica je obsegala 1205 delovnih dni. V obdobju tega intervala smo zabeležili 331448 dogodkov. Pri optimizaciji števila terminalov smo izhajali iz konkretnih podatkov o stroških in sicer $c_W$=4.6 in $c_0$=1500[1]. Pri izvajanju optimizacijskega postopka se za vsako število terminalov izračuna histogram dnevnih čakalnih časov. Na sliki 5 so narisani histogrami za N=1, 2, 3.




Slika 5: Histogram porazdelitve čakalnih časov za število terminalov N = 1, 2, 3.

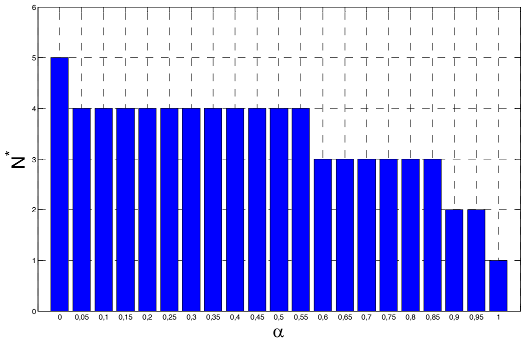
Kritični pričakovani čas čakanja se z večanjem števila terminalov hitro približuje vrednosti 0. Na sliki 6 so narisane vrednosti kriterijske funkcije (2) v odvisnosti od števila terminalov. Na sliki 7 je pokazana odvisnot minimuma N* od vrednosti parametra α. Očitno z večanjem α se optimalno potrebno število terminalov zmanjšuje. To najlažje pojasnimo s tem, da povečani α ima za posledico (preveč) optimistične, t.j. prekratke kumulativne čase čakanja. Priporočljiva vrednost je α=0,05.




Slika 6: Kriterijska funkcija $J_{cost}$, za izbrano kritično vrednost α=0.05, prikazana v odvisnosti od števila terminalov N.

---

[1] Enote so namenoma izpuščene




Slika 7: Odvisnost optimalnega števila terminalov N* od parametra α, izračunana za α na intervalu [0,1].

## 5 Diskusija

V zvezi z rezultati lahko komentiramo naslednje:

1. Rešitev testnega primera je presenetljivo v precejšnjem skladu z dosedanjo prakso razporejanja terminalov v proizvodnih obratih. Izkustveno pravilo predvideva postavitev enega terminala na vsakih 10 – 15 delavcev, odvisno od velikosti posameznega obrata.

2. Predstavljena rešitev omogoča enostaven pregled in primerjavo predvidenih dnevnih stroškov v odvisnosti od števila terminalov. Pri znani kriterijski funkciji (sl. 6) lahko namreč hitro ugotovimo, kolikšen dodaten strošek pomeni namestitev dodatnih terminalov, za primer okvare katerega izmed osnovnih. Čeprav poznamo optimalno število terminalov N* = 5, vidimo, da dva dodatna terminala ne predstavljata bistvenih stroškov v primerjavi s povečanjem zanesljivosti celotnega sistema.

3. V tej fazi ne upoštevamo geografske razporeditve terminalov, ampak se osredotočamo le na njihovo število. Predpostavlja se, da se terminali porazdelijo enakomerno po proizvodnji in se poti med delovnimi mesti in terminali po dolžini ne razlikujejo bistveno.

## 6 Sklep

V prispevku smo k reševanju problema razmestitve terminalov v proizvodnji pristopili s stohastično optimizacijo kriterijske funkcije. Cilj dela je bil določiti postopek, po katerem bi lahko določali optimalno število terminalov za dani primer proizvodnje. Kriterijska funkcija upošteva dve vrste stroškov: take, ki nastanejo zaradi nabave terminalov in take, ki nastajajo zaradi čakanja delavcev na prost terminal. Mogoča nadgradnja predstavljene rešitve bi lahko upoštevala še geografsko komponento. Terminalov v proizvodnji ni mogoče razporejati poljubno, ampak je potrebno upoštevati opremljenost posamezne lokacije z električnim in komunikacijskim priključkom. Ker terminali obstajajo tudi v brezžični izvedbi, vendar so ustrezno dražji, bi bilo smiselno v nadgradnji predstavljene rešitve upoštevati tudi ta dejavnik.

## 7 Literatura


[1] S. Boyer, SCADA Supervisory Control and Data Acquisition, ISA, Research Triangle Park 1999

[2] J. Kleindienst, Magistrsko delo. Ekonomska fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana 2004.

[3] S. Kokošar, Podpora kosovni proizvodnji, Sistem, priloga revije Monitor, Ljubljana 2002

[4] T. Wallace, M. Kremzar, ERP: Making It Happen, John Wiley & Sons, New York 2001

[5] L. Wasserman, All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference. Springer, New York 2004