

## **PRIMENA ROBOTA**

- ✓ *Lejauti ćelija sa robotom*
- ✓ *Osnovni problemi u projektovanju ćelija sa robotom*
- ✓ *Analiza ciklusnog vremena ćelije sa robotom*
- ✓ *Tehnoekonomska analiza opravdanosti uvođenja robota*

Primena robota u industriji je započela još *60-tih godina godina prošlog veka* pojavom prvog komercijalnog industrijskog robota (*UNIMATE*).

Danas je njihova primena u industriji velika *od zadataka manipulacije i opsluživanja mašina do obavljanja različitih procesa uključujući i montažu*.

Ove primene su već bile pomenute kada je bilo reči o klasifikaciji robota po ovom osnovu. Smatra se da je danas u industriji "zaposleno" *preko 2.5 miliona robota svih generacija*.

Primena robota u industriji ima za cilj:

- *povećanje produktivnosti,*
- *podizanje i održavanje konstantnog nivoa kvaliteta proizvoda,*
- *podizanje fleksibilnosti proizvodne opreme i*
- *humanizaciju rada.*

Smatra se da je primena robota uspešna ukoliko je zadovoljen jedan ili više od ovih ciljeva.

Različite oblasti primene robota u industriji kao i raznolikost tehnoloških zadataka u okviru njih su nametnule niz specifičnosti:

- *kako u pogledu robota (struktura, upravljanje, programiranje) i*
- *njihovih karakteristika (nosivost, brzina, tačnost itd.)*
- *tako i u pogledu end-efektora, senzora i periferne opreme.*

### **Ćelije sa robotom**

*Primena robota podrazumeva njihovo povezivanje i interakciju sa drugim mašinama i opremom oko njih.*

*Robot i oprema oko njega čine radnu ćeliju ili samo ćeliju. Radna stanica sa robotom takođe može biti odgovarajući termin ali može da znači i radno mesto na liniji sa više robota.*

*Pri projektovanju ćelije sa robotom inženjer mora da reši problem fizičkog projektovanja ćelije odnosno lejauta (layout) i problem upravljanja ćelijom.*

### **Lejauti ćelija sa robotom**

*Ćelije sa robotom odnosno mašine, robot i oprema se mogu organizovati u različite razmeštaje ili lejaute. Lejauti ćelija sa robotom se mogu klasifikovati u tri grupe:*

- ćelije sa mašinama raspoređenim oko robota,*
- linijske ćelije, i*
- ćelije sa mobilnim robotom.*

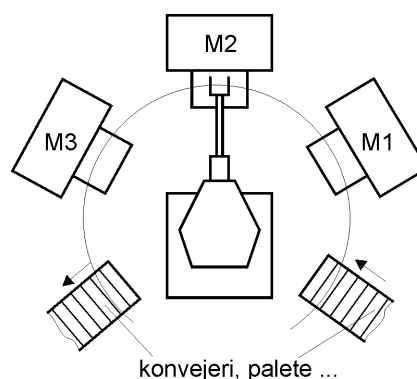
### **Ćelije sa mašinama raspoređenim oko robota**

Robot je lociran približno u centru dela kruga oko kojeg su raspoređene mašine i oprema.

Najjednostavniji slučaj je kada robot izvodi jednu operaciju ili opslužuje jednu mašinu.

Kod mašina sa dužim ciklusnim vremenom jedan robot može opsluživati više mašina.

Kod ovako organizovanih ćelija mora biti obezbeđeno dovođenje i odvođenje delova (konvejeri, punjači, palete i sl.).



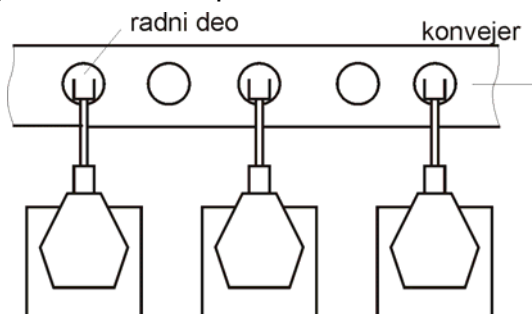
### **Linijske ćelije**

Kod ovih ćelija robot je lociran pored pokretne trake (konvejera) ili drugog transportnog sistema i izvršava zadatak na radnom predmetu dok je traka u pokretu.

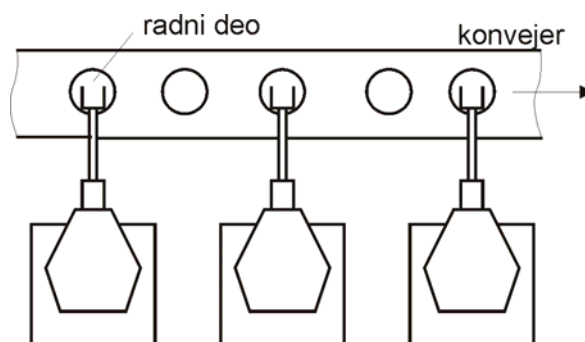
Tipičan primer ovih ćelija je na linijama za montažu karoserija automobila gde roboti izvođe tačkasto zavarivanje.

Kod linijskih ćelija se razlikuju tri vrste transportnih sistema:

- prekidni (sinhronizovani),
- kontinualni, i
- nesinhronizovani.



Kod *prekidnog transporta* se transportni sistem zaustavlja kod svake stanice duž linije. Robot je stacioniran i čini jednu radnu stanicu. *Pri ovome su delovi registrovani i u fiksnoj poziciji.*



Kod *kontinualnog transporta* delovi se kreću konstantnom brzinom pri čemu im se pozicija i orijentacija kontinualno menjaju u odnosu na neki referentni koordinatni sistem. Problem kontinualne promene pozicije i orijentacije delova se može rešiti na dva načina.

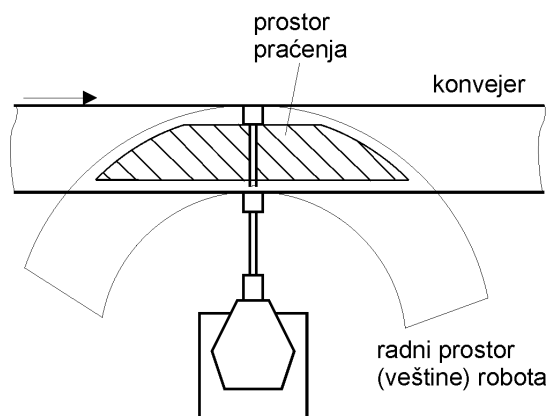
*Prvi način* je da se robot na neki način kreće paralelno sa konvejerom i izvodi operaciju na delu (kao da miruje). Ovaj način zahteva dodatni stepen slobode robota (npr. šine, robokolica i sl.) što poskupljuje sistem uz mogućnost pojave kolizija a takođe zahteva i veću površinu hale.

*Drugi način* je da robot prati deo u pokretu. Ovo znači da robot svojom kinematikom i upravljanjem mora biti u stanju da održava zadatu poziciju, orijentaciju i brzinu end-efektora u odnosu na radni predmet u pokretu.

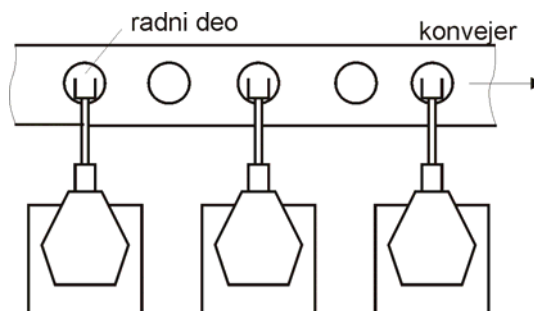
*Prvo*, robot mora imati sistem upravljanja i programiranja koji omogućava izvršavanje ovakvih zadataka. *Drugi problem* se odnosi na tzv. prostor praćenja "tracking window". Kao što se vidi sa slike, prostor praćenja se može predstaviti presekom radnog prostora (veštine) robota i površine konvejera.

Očigledno je da pored mogućnosti upravljanja i programiranja i prostor praćenja mora biti dovoljno veliki da bi se ispunio radni ciklus.

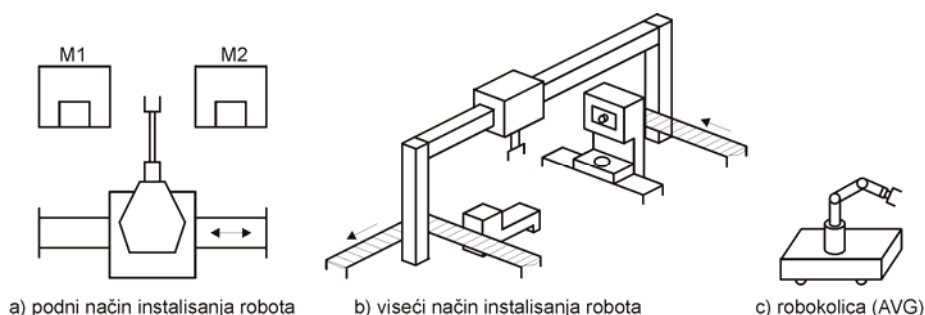
Treće, senzorski sistem mora da identifikuje različite delove na konvejeru, njihov ulaz u prostor praćenja, kretanje u njemu itd.



Kod *nesinhronizovanog transporta* delovi se kreću nezavisno. U određenoj stanici se sistem zaustavlja i kada se operacija izvrši taj deo se kreće do sledeće stanice. Na ovaj način neki delovi su završeni a neki nisu. Pri ovom načinu transporta svaki deo mora imati nezavisni pokretni nosač ili paletu što ovaj sistem transporta čini komplikovanijim od prethodna dva. Međutim roboti mogu biti jednostavniji. Zbog nepravilnog ciklusa nailaska delova senzori moraju naznačiti početak ciklusa.



### Ćelije sa mobilnim robotom



Robot se dodatnim, mobilnim osama kreće od mašine do mašine. Uglavnom je reč o podnom ili visećem načinu instalisanja robota. Viseći način instalisanja robota zauzima manje mesta ali je komplikovaniji i skuplji. *Ovaj način je pogodan za opsluživanje mašina alatki sa dužim ciklusnim vremenom pri čemu je važno pravilno odrediti broj mašina koji se opslužuje.* U nekim slučajevima je moguće da robot bude i na robokolicima (AGV).

### Osnovni problemi u projektovanju ćelija sa robotom

Projektovanje ćelije obuhvata projektovanje lejauta ćelije i upravljanja ćelijom. Osnovni problemi koji se moraju rešiti pri projektovanju ćelija sa robotom su:

*Interferenca:* Moguća su dva slučaja interference. *U prvom slučaju* je reč o *fizičkoj interferenci* odnosno koliziji koja se može javiti između robota i mašina ili između robota u kooperativnom radu. Ovaj problem se rešava odgovarajućim razmeštanjem i programiranjem. *U drugom slučaju* je reč o *vremenskoj ili tzv. mašinskoj interferenci* koja se javlja kada robot opslužuje više mašina i kada jedna ili više mašina čekaju dok robot opslužuje drugu mašinu. Ovo se može potpuno ili delimično izbeći tako da ciklus robota bude kraći od najkraćeg ciklusa mašine u ćeliji i uz pravilno određivanje redosleda opsluživanja.

*Promena opreme ćelije:* Ćelija mora imati mogućnost integralnog rada i uz promenu odnosno izmenu specifičnih delova opreme, pribora, alata i sl. Uz programabilnost ovo čini osnovu fleksibilnosti ovih sistema.

*Pozicioniranje i orijentacija delova:* Za robot u ćeliji je važno da radni predmeti odnosno pripremci budu precizno pozicionirani i orijentisani na konvejerima i drugim sistemima za transport i manipulaciju. Ovaj se problem može rešavati na različite načine ali je najefikasniji sistem prepoznavanja. Primenom ovih sistema problem tačnog pozicioniranja i orijentacije delova na transportnom sistemu se praktično eliminiše jer transportni sistem treba samo da dovede deo u ograničenu oblast za uzimanje a poziciju i orijentaciju delova kao i njihovu identifikaciju rešava sistem prepoznavanja.

*Identifikacija delova:* S obzirom da se u ćeliji može naći više različitih delova problem njihove identifikacije mora biti rešen. Ovo se rešava na različite načine od primene različitih mikroprekidača i senzora koji treba da detektuju razlike između delova u oblicima i dimenzijama do primene sistema prepoznavanja.

*Zaštita robota:* U mnogim slučajevima primene robota kao što su bojenje, manipulacija vrućim objektima i sl. robot mora biti zaštićen od nepovoljnih uticaja.

*Napajanje:* Ćelija mora imati pouzdane sisteme napajanja električnom energijom, komprimovanim vazduhom i različitim sistemima za podmazivanje, hlađenje i sl.

*Bezbednost:* Ćelija mora biti opremljena različitim sistemima za zaštitu personala. Sistem zaštite uključuje propisano ograđivanje i obeležavanje kao i primenu različitih senzora, zvučnih i svetlosnih upozorenja.

*Upravljanje ćelijom:* Pored projektovanja fizičkog leajauta ćelije potrebna je koordinacija aktivnosti robota i okoline. *U opštem slučaju neke aktivnosti se izvode sekvencijalno a neke simultano.* Koordinaciju ovih aktivnosti obavlja upravljački sistem ćelije ili tzv. ćelijski kontroler koji mora obezbediti:

- upravljanje sekvencom (redosledom procesa),
- vezu sa operatorom (koji se smatra inteligentnim delom ćelije, unos podataka, sigurnosne mere i sl.)
- nadgledanje (safety monitoring).

Ove funkcije se mogu ostvariti ili *upravljačkim sistemom samog robota ili upravljanjem na višem nivou pomoću ćelijskog kontrolera* različitih nivoa (od programabilnog automata do računarskog sistema). Obično US robota ima ograničenu mogućnost I/O signala za vezu sa periferijom pa se ide na upravljanje sa višeg nivoa.

Za zaštitu sekvence (redosleda) radnog ciklusa usled iznenadnih ili postavljenih uslova se obezbeđuju prekidi (*ili interlocks*) koji mogu biti ulazni ili izlazni. Izlazni idu iz kontrolora ćelije na mašine i opremu a ulazni sa mašine u kontroler.

### ***Analiza ciklusnog vremena ćelije sa robotom***

U planiranju i projektovanju ćelija sa robotom ciklusno vreme je veoma važno jer utiče na produktivnost koja je veoma važan faktor za uspešnu primenu robota.

Na bazi potrebe MTM metode (*Methods Time Measurement*) iz organizacije rada, za *rašćlanjavanje operacija na osnovne pokrete* sa unapred datim vremenima, razvijena je RTM metoda (*Robot Time Motion*) za procenu potrebnog vremena za odgovarajući radni ciklus pre projektovanja i programiranja ćelije.

RTM metoda omogućava inženjeru da vrednuje i poredi *različite varijante izvršavanja zadataka robota*.

Takođe *može da posluži i pri izboru robota* poredeći različite kandidate robota.

*I pored toga što u savremenim i moćnim simulacionim sistemima, postoje funkcije za određivanje ciklusnih vremena u ovom izlaganju će se ukratko razmotriti konvencionalni pristup RTM metodom.*

*Iako se na prvi pogled RTM metoda može učiniti po malo anahronom ona omogućava razumevanje strukture ciklusa rada ćelije a može da posluži i kao priručno ali efikasno sredstvo za ad-hoc inženjerski proračun.*

RTM metoda ima deset opštih elemenata ciklusa podeljenih u četiri grupe:

- *elementi kretanja robota sa ili bez opterećenja,*
- *elementi senzorskih aktivnosti ciklusa (sila, prepoznavanje itd.),*
- *elementi aktivnosti EE (hvatači i alati), i*
- *elemeni čekanja.*

Ovi elementi sa odgovarajućim simbolima i opisima su dati u tabeli. Za korišćenje ove tabele *radni ciklus robota mora biti raščlanjen na odgovarajuće elemente* koji su definisani svojim parametrima kao što su rastojanja, brzine, sile itd.

Elementi i simboli u RTM metodi

| Grupa | Element | Simbol | Definicija elementa                                                                                                              | Parametri elemenata                                 |
|-------|---------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1     | 1       | Rn     | n - segment kretanja: kretanje neopterećenog robota po putanji sastavljenoj od n segmenata (pristup/napuštanje i druga kretanja) | Rastojanje i brzina ili geometrija putanje i brzina |
|       | 2       | Mn     | n - segment kretanja: kretanje objekta po putanji sastavljenoj od n segmenata (pristup/napuštanje i prenošenje)                  |                                                     |
|       | 3       | ORn    | n - segment orijentacije: kretanje robota u cilju orijentacije (ne računa se ako se orijentacija vrši u toku nekog kretanja)     |                                                     |

|   |     |     |                                                                     |                                      |
|---|-----|-----|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 2 | 4   | SEi | Stop usled greške pozicije                                          | Granice greške                       |
|   | 4.1 | SE1 | Zaustavljanje robota bez čekanja eliminacije greške                 |                                      |
|   | 4.2 | SE2 | Zaustavljanje robota unutar tolerancije greške pozicije             |                                      |
|   | 5   | SFi | Stop usled sile ili momenta                                         | Sila, moment, dodir                  |
|   | 5.1 | SF1 | Zaustavljanje robota kad se ispuni uslov sile                       |                                      |
|   | 5.3 | SF3 | Zaustavljanje robota kad se ispuni ili uslov sile ili uslov momenta |                                      |
|   | 5.4 | SF4 | Zaustavljanje robota kad se ispuni uslov dodira                     |                                      |
|   | 5.2 | SF2 | Zaustavljanje robota kad se ispuni uslov momenta                    |                                      |
|   | 6   | Vi  | Operacija prepoznavanja                                             | Vremenska funkcija                   |
|   | 7   | GRI | Hvatanje objekta                                                    | Razmak prstiju, otvaranje/zatvaranje |
|   | 7.1 | GR1 | Jednostavno hvatanje zatvaranjem prstiju                            |                                      |
|   | 7.2 | GR2 | Hvatanje objekta sa orijentacijom šake iznad njega                  |                                      |
|   | 7.3 | GR3 | Hvatanje objekta pojedinačnim zatvaranjem prstiju                   |                                      |
| 3 | 8   | RE  | Otpuštanje (oslobađanje) objekta otvaranjem prstiju                 |                                      |

|   |    |   |                                                      |                    |
|---|----|---|------------------------------------------------------|--------------------|
| 4 | 9  | T | Vreme čekanja procesa kada robot ušestvuje u procesu | Vremenska funkcija |
|   | 10 | D | Vreme čekanja robota da se proces završi             |                    |

Potrebna vremena za ostvarivanje ovih elemenata su različita zavisno od modela robota. *Vremena elemenata ciklusa moraju biti određena za svaki konkretan robot* pri korišćenju RTM metode.

Moguća su četiri pristupa za određivanje vremena pojedinih elemenata ciklusa:

- *korišćenjem tabele elemenata sa vremenima* (to je osnovni pristup pa će o njemu ovde biti više reči),
- *korišćenjem regresionih jednačina* za komplikovanije elemente čija su vremena višefaktorne funkcije,
- *metodom "upravljano kretanje"* koja može biti primenjena na elemente prve grupe. Ova metoda je zasnovana na kinematičkoj i dinamičkoj analizi pokreta robota odnosno određivanju vremena elemenata ciklusa na osnovu rastojanja (puta), brzina i ubrzanja,
- *metodom "geometrije putanje"*, slično kao i prethodna metoda zahteva specifikaciju putanje i brzine vrha robota kao i brzina u zlobovima. U ovoj metodi se može razmatrati i samo jedan zglob (osa) koji ima odlučujući uticaj (tzv. "vodeća osa", o čemu je bilo govora). Za ovu metodu su razvijeni i simulacioni programi.

Hipotetičke vrednosti vremena trajanja za izabrane elemente u RTM metodi za hipotetički model robota

| Element | Simbol | Vreme trajanja elemenata ciklusa [s]                                                                                                                                                                                                                                          | Parametri                                              |
|---------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1       | R1     | $s/v + 0.4$ za $s > v/7.5$<br>$0.4$ za $s < v/7.5$                                                                                                                                                                                                                            | s [m] rastojanje<br>v [m/s] brzina                     |
| 2       | M1     | masa objekta $0.5 \text{ kg}$<br>$s/v + 0.4$ za $s > v/7.5$<br>$0.4$ za $s < v/7.5$<br>masa objekta $0.5 - 2.5 \text{ kg}$<br>$s/v + 0.6$ za $s > v/7.5$<br>$0.6$ za $s < v/7.5$<br>masa objekta $2.5 - 7.5 \text{ kg}$<br>$s/v + 0.9$ za $s > v/7.5$<br>$0.9$ za $s < v/7.5$ |                                                        |
| 4.1     | SE1    | $0.1 v$                                                                                                                                                                                                                                                                       | v [m/s] prethodna brzina                               |
| 7.1     | GR1    | $0.1$                                                                                                                                                                                                                                                                         | Pretpostavka da ne zavise od drugih parametara         |
| 8       | RE     | $0.1$                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                        |
| 9       | T      | T                                                                                                                                                                                                                                                                             | T=vreme čekanja procesa kada robot učestvuje u procesu |
| 10      | D      | D                                                                                                                                                                                                                                                                             | D=ciklus procesa                                       |

U tabeli za listu izabranih elemenata, data hipotetička vremena i jednačine za sračunavanje vremena za jedan hipotetički model robota. Tabela se može koristiti za uprošćenu demonstraciju primene RTM metode.

### **Tehnoekonomska analiza opravdanosti uvođenja robota**

Uvođenje robota se može odnositi na postojeću tehnologiju odnosno *robotizaciju postojećih radnih mesta* ili na *uvođenje pri projektovanju novog pogona* ili fabrike. Varijantnost rešenja u ovim i drugim slučajevima uključuje i tehnoekonomsku analizu opravdanosti uvođenja robota koja, između ostalog, može da posluži pri:

- *poređenje sa postojećom varijantom radnog mesta bez robota,*
- *poređenju sa varijantom primene specijalizovanih (krutih) automata i sl.*
- *poređenju različitih varijanti robota i periferne opreme koju je moguće primeniti,*

Postoji nekoliko metoda tehnoekonomske analize primene robota od kojih je najjednostavnija ali dovoljno tačna *metoda vremena otplate* koja se zasniva na analizi troškova i uštede.

*Ova metoda je najpogodnija za tehnoekonomsku analizu uvođenja robota u postojeću tehnologiju odnosno robotizaciju postojećih radnih mesta.*

Polazi se od troškova jednokratnih ulaganja koji obuhvataju:

- $T_R [din]$  troškovi nabavke robota,
- $T_G [din]$  troškovi nabavke EE koji su po pravilu izdvojeni iz cene robota,
- $T_S [din]$  troškovi nabavke dodatnih senzora za robote, ako su potrebni, za mašine i opremu itd.
- $T_{PU} [din]$  troškovi nabavke ili izrade svih potrebnih perifernih uređaja (konvejeri, palete, uređaji za dodavanje itd.),
- $T_{IR} [din]$  troškovi instalisanja robota: ulaganje u prilagođavanje mašina, alata, eventualna nabavka novih alata, mašina, instalacija, spoljna saradnja i sl.,
- $T_L [din]$  troškovi promene lejauta,
- $T_O [din]$  ostali troškovi,

Ukupni troškovi jediničnih ulaganja su:

$$T_{JU} = T_R + T_G + T_S + T_{PU} + T_{IR} + T_L + T_O [din],$$

pri čemu bi trebalo odbiti vrednost eventualno oslobođene opreme i sredstava.

Za približan proračun se, prema preporukama, može uzeti da su troškovi jednokratnih ulaganja oko 50% od troškova nabavke robota odnosno

$$T_{JU} = 1.5 T_R [din].$$

Godišnji troškovi:

- $T_A = \frac{T_R \cdot f_A}{100\%} \left[ \frac{din}{god} \right]$  troškovi amortizacije (robota), gde je  $f_A \cong 10 \left[ \frac{\%}{god} \right]$  (godišnja stopa amortizacije),
- $T_{OD} = \frac{(T_R + T_{PU}) \cdot f}{100\%} \left[ \frac{din}{god} \right]$  troškovi održavanja robota i periferne oprema, gde je  $f \cong 5 \left[ \frac{\%}{god} \right]$  (godišnja stopa održavanja),
- $T_P \left[ \frac{din}{god} \right]$  troškovi rada i programiranja.

Uštede koje se ostvaruju uvođenjem robota obuhvataju:

- $BP = n \cdot 12 \cdot B_p - T_{OB} [\frac{din}{god}]$  bruto plate oslobođenih radnika, gde su:
  - $B_p [\frac{din}{mese}]$  bruto mesečna plata po jednom radniku,
  - $n$  broj radnika  $\times$  broj smena, i
  - $T_{OB} [\frac{din}{god}]$  troškovi obuke operatera (novog),
- $GU [\frac{din}{god}]$  uštede usled smanjenja škarta,
- $P [\frac{din}{god}]$  porast produktivnosti (npr. može se sračunati na osnovu ciklusnog vremena nove i stare ili prethodne varijante),
- $OU [\frac{din}{god}]$  ostale uštede (u materijalu, energiji i sl.).

Sada se vreme otplate u  $[god]$  može sračunati kao:

$$V_{ot} = \frac{T_{JU}}{BP + GU + P + T_A + OU - T_{OD} - T_P} [god] .$$

Kompanije smatraju ekonomski opravdanim uvođenje robota ako je vreme otplate između 2 i 3 godine.

Iako je metoda u suštini jednostavna neke stavke nije jednostavno odrediti pa se zbog "sigurnosti" u grubljoj analizi usvajaju nepovoljniji slučajevi.