Dr Dragoljub M. Brkić,
dipl. inž.
Tehnički opitni centar KoV,
Beograd

OPTIMIZACIJA AKTIVNE REDUNDANSE SISTEMA REDNO VEZANIH ELEMENATA SA VIŠESTRUKIM OGRANIČENJEM I PRIMENOM METODE „MONTE KARLO"

UDC: 621.3.062.2 : 519.245

Rezime:

U ovom radu opisani su postupci za određivanje optimalne aktivne redundanse sistema redno vezanih elemenata, kada je redundovanje ograničeno njegovom težinom, zapreminom, cenom i minimalno prihvatljivom pouzdanošću. Za rešavanje ovog problema primenjena je metoda „Monte Karlo" sa korišćenjem specijalno urađenog računarskog programa. Primena ovih postupaka prikazana je na jednom primeru.

Ključne reči: elementi sistema, redna veza, redundansa elemenata sistema, pouzdanost sistema, optimalno rešenje.

OPTIMIZATION OF ACTIVE REDUNDANCY FOR A SERIES SYSTEM OF ELEMENTS WITH MANY LIMITATIONS BY APPLYING THE MONTE CARLO METHOD

Summary:

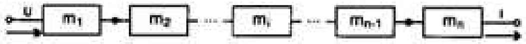
In this paper, the procedures for determining the optimal active redundancy of a series system of elements are described. The system redundancy is limitted by its weight, volume and cost. For this system the minimum acceptable reliability in a specified time is required. For the determination of the series of acceptable results of active redundancy, the Monte Carlo method was applied, and a specially developped computer program was used the application of these procedures is illustrated by one example.

Key words: sistem elements, a series system of elements, redundancy of system elements, system reliability, optimum solution.

Uvod

Posmatra se n elemenata koji su u funkcionalnom smislu povezani na red i čine jedan sistem (slika 1).

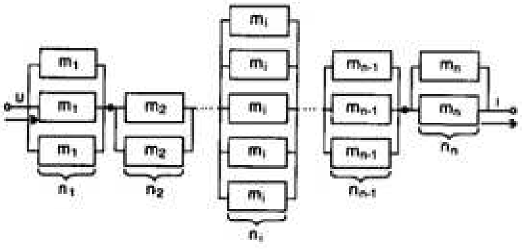
Pretpostavlja se da pouzdanost ovog sistema nije zadovoljavajuća, i da je iscrpljena mogućnost povećanja pouzdanosti



Sl. 1 – Redna veza elemenata sistema

zamenom postojećih elemenata odgovarajućim kvalitetnijim elementima. U tom slučaju, da bi se postigla veća pouzdanost, mora se primeniti postupak redundovanja elemenata, tj. paralelno vezivanje, u funkcionalnom smislu, jednog ili više istih elemenata koji istovremeno obavljaju zadatu funkciju (slika 2).

Neka je R_0 minimalno prihvatljiva pouzdanost redundovanog sistema. Osnovni podaci za svaki elemenat sistema su: masa, g, zapremina, v, cena, c, i



Sl. 2 – Aktivna redundansa elemenata sistema

srednje vreme do/između otkaza, m, ili intenzitet otkaza, λ. Pouzdanost neredundovanog sistema, prikazanog na slici 1, data je sledećim izrazom:

$$R(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t) = \prod_{i=1}^{n} e^{-\frac{t}{m_i}};\ i = 1, 2, \ldots, n \qquad (1)$$

gde je:

m_i – srednje vreme do/između otkaza i-tog elementa sistema,

t – zahtevano vreme bezotkaznog rada (h). Redundovanje elemenata sistema vrši se kada je

$$R(t) < R_0 \qquad (2)$$

Pri redundovanju sistema uvećavaju se njegova masa, zapremina i cena, za koje su postavljene granične vrednosti: maksimalna masa G_0, zapremina V_0 i cena C_0. Sva ona rešenja za pouzdanost redundovanog sistema, kod kojih nisu prekoračena ova ograničenja, a postignuta pouzdanost je veća ili jednaka zahtevanoj pouzdanosti R_0, predstavljaju prihvatljiva rešenja. Skup tih rešenja predstavlja skup prihvatljivih rešenja aktivne redundanse sistema. Ako se ova prihvatljiva rešenja urede po vrednostima pouzdanosti u opadajućem poretku, onda će prvo rešenje biti najbolje u pogledu pouzdanosti. Rešenja se mogu urediti i po vrednostima mase redundovanog sistema i to u rastućem poretku. U ovom slučaju, prvo rešenje biće najbolje u pogledu mase sistema. Slično se može izvršiti uređivanje rešenja po vrednostima zapremine ili cene, takođe u rastućem poretku i tako dobiti najbolje rešenje u pogledu zapremine ili cene redundovanog sistema. Ako se odabere ono rešenje koje ima najveću pouzdanost, ono će povlačiti za sobom veliku masu, zapreminu i cenu redundovanog sistema. Međutim, korisniku sistema može da bude prihvatljivije neko kompromisno rešenje pri kojem će pouzdanost redundovanog sistema biti veća ili u krajnjem slučaju jednaka R_0, ali da sistem bude što lakši, što manji po zapremini i što jeftiniji. Tako određeno kompromisno rešenje predstavlja za korisnika optimalno rešenje. U ovom radu prikazan je postupak izbora optimalnog rešenja na osnovu usrednjenih vrednosti karakteristika sistema.

Određivanje maksimalnih brojeva redundanse elemenata sistema

Ako se sistem sastoji od n redno vezanih elemenata čije su mase, zapremine i cene: g_i, v_i i c_i, respektivno, i = 1, 2, ..., n, i ako su za redundovani sistem postavljena ograničenja po masi, G_0, zapremini, V_0 i ceni C_0, onda se maksimalni broj redundansi i-tog elementa sistema određuje pomoću sledećih izraza:

$$n_{i\,max}(g_i) = 1 + \left\lfloor \frac{G_0 - G_u}{g_i} \right\rfloor \qquad (3)$$

$$n_{i\,max}(v_i) = 1 + \left\lfloor \frac{V_0 - V_u}{v_i} \right\rfloor \qquad (4)$$

$$n_{i\,max}(c_i) = 1 + \left\lfloor \frac{C_0 - C_u}{c_i} \right\rfloor \qquad (5)$$

gde su G_u, V_u i C_u maksimalna masa, zapremina i cena neredundovanog sistema, date sledećim izrazima:

$$G_u = \sum_{i=1}^{n} g_i \tag{6}$$

$$V_u = \sum_{i=1}^{n} v_i \tag{7}$$

$$C_u = \sum_{i=1}^{n} c_i \tag{8}$$

U izrazima (3), (4) i (5), $\lfloor Q \rfloor$ označava celobrojnu vrednost broja Q. Izraz (3) odnosi se na maksimalni broj redundansi i-tog elementa u odnosu na masu, (4) u odnosu na zapreminu i (5) u odnosu na cenu redundovanog sistema. Da bi bila ispunjena sva ograničenja po masi, G_0, zapremini, V_0 i ceni C_0, od tri rešenja koja su data izrazima (3), (4) i (5) uzima se ono rešenje koje ima najmanju vrednost, i ono predstavlja maksimalni broj redundansi i-tog elementa posmatranog sistema, tj.:

$$n_{i\max} = \min\{n_{i\max}(g_i), n_{i\max}(v_i), n_{i\max}(c_i)\};\quad i = 1, 2, \ldots, n. \tag{9}$$

Određivanje niza prihvatljivih rešenja redundovanja sistema (metoda „Monte Karlo")

Neka je posmatrani sistem sastavljen od n redno vezanih elemenata. Sa porastom broja elemenata n pouzdanost sistema opada, pa se može desiti da njena vrednost bude neprihvatljiva. Ako je iscrpljena mogućnost povećanja pouzdanosti sistema ugradnjom pouzdanijih elemenata, onda se pribegava rešavanju ovog problema redundovanjem elemenata sistema, tj. paralelnim vezivanjem istih odgovarajućih elemenata koji istovremeno funkcionišu. Ovde se uzima da je broj paralelno vezanih elemenata slučajan i da se određuje pomoću sledećeg izraza:

$$n_i = 1 + \lfloor RND \cdot n_{i\max} \rfloor;\ i = 1, 2, \ldots, n \tag{10}$$

gde $\lfloor Q \rfloor$ označava celobrojnu vrednost broja Q, n je ukupan broj grupa koje su vezane na red i sačinjene su od paralelno vezanih istih elemenata, $RND \in [0,1]$ je pseudoslučajni broj i $n_{i\max}$ je maksimalno dozvoljeni broj redundansi i-tog elementa sistema. Kao što se vidi, n_i se može kretati od 1 do $1 + n_{i\max}$. Kada je $n_i = 1$, tada nema redundanse, jer u grupi je samo jedan polazni element. Kada je $n_i = 1 + n_{i\max}$, tada će i-ti elemenat sistema biti preredundovan. Iz toga proizilazi da je broj redundansi i-tog elementa za jedan manji od broja paralelno vezanih elemenata, tj. $n_i - 1$. Kada se generišu pseudoslučajni brojevi n_i koji se pridruže elementima sistema, onda se ukupna masa, zapremina i cena tako redundovanog sistema izračunava pomoću sledećih izraza:

$$G_u = \sum_{i=1}^{n} n_i g_i \tag{11}$$

$$V_u = \sum_{i=1}^{n} n_i v_i \tag{12}$$

$$C_u = \sum_{i=1}^{n} n_i c_i \tag{13}$$

Pouzdanost redundovanog i-tog elementa sa $n_i - 1$ redundansa, određenih pomoću (10), data je izrazom:

$$R_i(t) = 1 - \left(1 - e^{-\frac{t}{m_i}}\right)^{n_i} \tag{14}$$

gde je:

t – zadato vreme bezotkaznog rada,

m_i – srednje vreme rada do/između otkaza i-tog elementa sistema.

Pošto se posmatrani sistem sastoji od redne veze n grupa sa paralelno vezanim elementima, pouzdanost celog sistema data je izrazom:

$$R(t)=\prod_{i=1}^{n}R_i(t)=\prod_{i=1}^{n}\left[1-\left(1-e^{-\frac{t}{m_i}}\right)^{n_i}\right] \qquad (15)$$

Kada se odredi vrednost za R(t), onda se ona upoređuje sa vrednošću za R_0, koja treba da se postigne redundovanjem. Da bi se konfiguracija sistema sa brojevima paralelno vezanih elemenata n_i; i = 1, 2, ..., n i postignutom vrednošću:

$$R(t) \geq R_0 \qquad (16)$$

mogla prihvatiti, potrebno je da bude:

$$\left.\begin{array}{l} G_u \leq G_0 \\ V_u \leq V_0 \\ C_u \leq C_0 \end{array}\right\} \qquad (17)$$

koji proizilaze iz postavljenih ograničenja za masu, zapreminu i cenu redundovanog sistema.

Kada se pri datim vrednostima brojeva n_i paralelno vezanih elemenata, koji predstavljaju jednu konfiguraciju sistema, ispune uslovi dati izrazima (16) i (17), tada se ta konfiguracija, odnosno to rešenje prihvata i zabeleže se vrednosti n_i, G_u, V_u, C_u i R(t). Inače, ako uslovi (16) i (17) nisu ispunjeni, generisanje pseudoslučajnih brojeva n_i se nastavlja sve dok se ne ispune ovi uslovi.

Međutim, ako se posle mnogo pokušaja ne ispune uslovi (16) i (17), tada se moraju smanjiti zahtevi za pouzdanost R_0 ili proširiti ograničenja u pogledu mase, zapremine i cene redundovanog sistema. Tokom proba beleže se samo rešenja za različite konfiguracije sistema. Tokom velikog broja proba (generisanja pseudoslučajnih brojeva n_i) dobiće se niz od N prihvatljivih rešenja, tj. konfiguracija sistema koje ispunjavaju uslove date izrazima (16) i (17). Tako dobijena prihvatljiva rešenja urede se u opadajućem poretku po pouzdanosti, i u rastućim porecima po masi, zapremini i ceni redundovanog sistema. Ako je korisniku sistema najbitnije da sistem bude što pouzdaniji, on će odabrati prvo rešenje u uređenom skupu rešenja po pouzdanosti. Isto tako, odabraće prvo rešenje u uređenim rešenjima po masi, zapremini i ceni, zavisno od toga koja mu je od ovih karakteristika najbitnija. Tako odabrano rešenje je subjektivno optimalno rešenje.

Izbor optimalnog rešenja usrednjavanjem vrednosti karakteristika sistema

Neka je u toku proračuna pouzdanosti redundovanog sistema dobijeno N prihvatljivih i različitih rešenja za pouzdanost R: R_1, R_2,..., R_N. Sva ova rešenja ispunjavaju uslov da je $R_j \geq R_0$; j = 1, 2, ..., N. Dobijene vrednosti za R_j urede se u opadajućem poretku, tj. $R_1 \geq R_2 \geq \ldots \geq R_N$, što znači da je prvo rešenje, R_1, najbolje, a poslednje rešenje, R_N, najlošije. Pošto su ova rešenja dobijena u uslovima ograničenja po masi G_0, zapremini V_0, i ceni, C_0, redundovanog sistema, najbolje rešenje, R_1, u smislu pouzdanosti ne može da bude najbolje i u smislu mase, G, zapremine, V, i cene, C. Dakle, potrebno je iz skupa prihvatljivih rešenja naći optimalno rešenje, tj. rešenje pri kojem masa, zapremina i cena redundovanog sistema neće biti blizu graničnih vrednosti.

Radi iznalaženja optimalnog rešenja može se poći od normiranih proizvodnih funkcija datih sledećim izrazima:

$$GVC_j = \frac{G_j}{G_{max}} \cdot \frac{V_j}{V_{max}} \cdot \frac{C_j}{C_{max}}; \; j \in [1,N], \quad (18)$$

$$GRC_j = \frac{R_j}{R_{max}}; \; j \in [1,N], \quad (19)$$

gde su G_j, V_j, C_j i R_j – masa, zapremina, cena i pouzdanost, respektivno, redundovanog sistema j-tog rešenja, a G_{max}, V_{max}, C_{max} i R_{max} – najveća masa, zapremina, cena i pouzdanost redundovanog sistema u posmatranom skupu rešenja. Sada se može uvesti nova funkcija koja predstavlja apsolutnu vrednost razlike između GRC_j i GVC_j, tj.

$$d_j = |GRC_j - GVC_j|; \; j \in [1,N]. \quad (20)$$

Iz skupa vrednosti $\{d_j\}$; $j \in |1,N|$ odredi se najveća:

$$d_{max} = \max \{d_j\}; \; j \in [1,N]. \quad (21)$$

Rešenje n_{1j}, n_{2j}, ..., n_{nj}, G_j, V_j, C_j, R_j, sa rednim brojem j, sa uređenim vrednostima za R_j, pri kojem je

$$d_{max} = d_j \quad (22)$$

predstavlja optimalno rešenje u odnosu na vrednosti karakteristika sistema: mase, zapremine, cene i pouzdanosti.

Pošto se funkcija GRC_j maksimizira, GVC_j minimizira, to se optimum postiže pri maksimalnoj apsolutnoj razlici ovih funkcija. Funkcija GVC_j predstavlja proizvod promenljivih koje se minimiziraju, a funkcija GRC_j proizvod promenljivih koje se maksimiziraju. U ovom slučaju, funkcija GVC_j ima tri promenljive, a GRC_j samo jednu promenljivu.

Numerički primer

Posmatrani sistem sastoji se od n = 5 elemenata. Pretpostavimo da ovaj sistem u pogledu pouzdanosti ne ispunjava postavljeni zahtev za minimalno prihvatljivu pouzdanost, $R_0 = 0{,}8$. Podaci o ovom, još neredundovanom sistemu dati su u tabeli.

Podaci o elementima sistema

i	q_i	g_i	v_i	c_i
1	0,10	3	1	8
2	0,20	5	5	4
3	0,15	2	4	6
4	0,10	2,5	1	8
5	0,05	1	1	16

Podaci su uzeti iz primera 5.8. [1].

U tabeli i označava redni broj elementa koji su međusobno povezani na red, q_i je nepouzdanost, g_i je masa u kg, v_i je zapremina u dm^3 i c_i je cena u hiljadama dinara i-tog elementa sistema.

Povećanje pouzdanosti ovog sistema treba izvršiti primenom aktivne redundanse. Za ceo redundovani sistem postavljena su sledeća ograničenja: maksimalna masa $G_0 = 30$ kg, zapremina, $V_0 = 25$ dm^3 i cena, $C_0 = 100000$ dinara. Pod ovim ograničenjima i zahtevom da pouzdanost redundovanog sistema, R(t), bude veća ili jednaka zahtevanoj vrednosti R_0, treba odrediti niz prihvatljivih rešenja kod kojih je $R(t) \geq R_0$, a zatim odrediti optimalna rešenja po pouzdanosti, masi, zapremini i ceni, kao i jedno jedino optimalno rešenje zasnovano na usrednjavanju karakteristika sistema: mase, zapremine i cene. Za rešavanje ovog problema treba usvojiti da je vreme bezotkaznog rada t = 100 h. Pod jednim rešenjem ovde se podrazumevaju izračunati brojevi paralelno vezanih istih elemenata za prvi, drugi, ..., peti podsistem: $n_1, n_2, \ldots, n_5$, na osnovu kojih se izračunava ukupna masa, G_u, zapremina, V_u, cena, C_u, i pouzdanost, R(t), redundovanog sistema.

Rešenje

U tabeli su date nepouzdanosti elemenata sistema, q_i, koje treba konvertovati u srednja vremena do/između otkaza, m_i, pomoću sledeće formule:

$$m_i = -\frac{t}{\ln(1-q_i)}.$$

Pošto je usvojeno da je vreme bezotkaznog rada sistema, t = 100 h, to se pomoću vrednosti za q_i iz tabele i formule za m_i dobijaju sledeća vremena do/između otkaza za elemente sistema:

$m_1 = 949{,}12$ h, $m_2 = 448{,}14$ h,
$m_3 = 615{,}31$ h, $m_4 = 949{,}12$ h i
$m_5 = 1949{,}57$ h.

Posle toga određuju se maksimalni brojevi od kojih se mogu redundovati prvi, drugi, ..., peti elemenat sistema, a da se pri tome ne izađe iz domena postavljenih ograničenja. Koristeći postupak određivanja $n_{i\,max}$, dobija se:

$n_{1\,max} = 6$, $n_{2\,max} = 3$, $n_{3\,max} = 4$,
$n_{4\,max} = 7$ i $n_{5\,max} = 4$.

Dakle, prvi elemenat sistema može biti paralelno vezan sa još pet istih elemenata (ima pet redundansi), drugi elemenat sa još dva elementa, itd. Pošto su određeni ovi maksimalni brojevi, pristupa se generisanju pseudoslučajnih brojeva koji uzimaju celobrojne vrednosti između 1 i $n_{i\,max}$; i = 1, 2, ..., 5. Tako pet generisanih pseudoslučajnih brojeva predstavljaju brojeve paralelno vezanih istih elemenata prvog, drugog, ..., petog podsistema. To predstavlja jedno rešenje ili jednu konfiguraciju sistema za koju se određuje pouzdanost R(t), pa ako je $R(t) \geq R_0$, tada se to rešenje ili podaci o konfiguraciji sistema zapisuju, a ako je $R(t) < R_0$, ta konfiguracija sistema se odbacuje.

Ovaj postupak se ponavlja N_p puta. Za fiksni broj ponavljanja izračunavanja, N_p, dobije se određeni broj, N, različitih rešenja ili konfiguracija sistema kod kojih je ispunjen uslov da je $R(t) \geq R_0$. Pošto je ovo izračunavanje mukotrpno, ono je sprovedeno korišćenjem specijalnog računarskog programa. Pomoću ovog programa, za $N_p = 5000$ puta, dobijeno je N = 21 različita konfiguracija, odnosno prihvatljiva rešenja:

1. $n_i = 3$ 2 1 2 2
   G = 28 V = 21 C = 86000 R = 0,805014
2. $n_i = 1$ 2 2 3 1
   G = 25,5 V = 23 C = 68000 R = 0,801529
3. $n_i = 1$ 2 2 4 2
   G = 29 V = 25 C = 92000 R = 0,842364
4. $n_i = 1$ 2 2 3 3
   G = 27,5 V = 25 C = 100000 R = 0,843609
5. $n_i = 1$ 2 2 4 1
   G = 28 V = 24 C = 76000 R = 0,802251
6. $n_i = 1$ 2 2 2 2
   G = 24 V = 23 C = 76000 R = 0,834023
7. $n_i = 3$ 2 2 1 3
   G = 28,5 V = 25 C = 100000 R = 0,843609
8. $n_i = 2$ 2 1 3 2
   G = 27,5 V = 21 C = 86000 R = 0,805014
9. $n_i = 2$ 2 2 1 2
   G = 24,5 V = 23 C = 76000 R = 0,834023

10. $n_i = 2 \quad 2 \quad 1 \quad 4 \quad 2$
$G = 30 \quad V = 22 \quad C = 94000 \quad R = 0{,}805739$

11. $n_i = 2 \quad 2 \quad 2 \quad 3 \quad 2$
$G = 29{,}5 \quad V = 25 \quad C = 92000 \quad R = 0{,}925766$

12. $n_i = 3 \quad 2 \quad 2 \quad 1 \quad 2$
$G = 27{,}5 \quad V = 24 \quad C = 84000 \quad R = 0{,}841605$

13. $n_i = 3 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 1$
$G = 29 \quad V = 24 \quad C = 76000 \quad R = 0{,}881682$

14. $n_i = 2 \quad 2 \quad 2 \quad 1 \quad 3$
$G = 25{,}5 \quad V = 24 \quad C = 92000 \quad R = 0{,}836009$

15. $n_i = 4 \quad 2 \quad 2 \quad 1 \quad 1$
$G = 29{,}5 \quad V = 24 \quad C = 76000 \quad R = 0{,}802251$

16. $n_i = 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 3$
$G = 28 \quad V = 25 \quad C = 100000 \quad R = 0{,}919610$

17. $n_i = 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2$
$G = 27 \quad V = 24 \quad C = 84000 \quad R = 0{,}917426$

18. $n_i = 1 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 3$
$G = 25 \quad V = 24 \quad C = 92000 \quad R = 0{,}836009$

19. $n_i = 2 \quad 3 \quad 1 \quad 2 \quad 2$
$G = 30 \quad V = 25 \quad C = 82000 \quad R = 0{,}824353$

20. $n_i = 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 1$
$G = 26 \quad V = 23 \quad C = 68000 \quad R = 0{,}873739$

21. $n_i = 1 \quad 2 \quad 2 \quad 3 \quad 2$
$G = 26{,}5 \quad V = 24 \quad C = 84000 \quad R = 0{,}841605$

NAPOMENA – U gornjim podacima ukupna masa redundovanog sistema, G, izražena je u kilogramima, zapremina, V, u kubnim decimetrima i cena, C, u dinarima, n_i ($i = 1, 2, \ldots, 5$) je broj paralelno vezanih istih elemenata i odnosi se na prvi, drugi, ..., peti elemenat sistema.

Ako bi se prihvatljiva rešenja uredila po vrednostima pouzdanosti, R, u opadajućem poretku, onda bi na prvom mestu bilo rešenje pod rednim brojem 11:

$n_i = 2 \quad 2 \quad 2\ 3 \quad 2$
$G = 29{,}5 \quad V = 25 \quad C = 92000 \quad R = 0{,}925766.$

Ukoliko bi se prvi, drugi, treći i peti elemenat sistema redundovao sa još po jednim elementom, a četvrti elemenat redundovao sa još dva elementa, dobila bi se najveća vrednost za pouzdanost, R, redundovanog sistema. Međutim, u ovom slučaju ukupna težina, G, zapremina, V, i cena, C, vrlo su blizu ili su na graničnim vrednostima: $G_0 = 30$ kg, $V_0 = 25$ dm^3 i $C_0 = 100\,000$ din.

NAPOMENA – Dobijena vrednost za $R = 0{,}925766$ važi za navedeni broj ponavljanja, $N_p = 5000$. Za $N_p > 5000$, možda bi se dobila i neka veća vrednost za R.

Slično, ako bi se prihvatljiva rešenja uredila po vrednostima mase G, u rastućem poretku, onda bi na prvom mestu bilo rešenje pod rednim brojem 6:

$n_i = 1\ 2 \quad 2\ 2 \quad 2$
$G = 24 \quad V = 23 \quad C = 76000 \quad R = 0{,}834023.$

Redundovani sistem ovakve konfiguracije je najlakši, ali mu pouzdanost, **R**, nije mnogo veća od zahtevane pouzdanosti, $R_0 = 0{,}80$. Takođe, ako bi se prihvatljiva rešenja uredila po vrednostima zapremine, V, u rastućem poretku, onda bi na prvom mestu bilo rešenje pod rednim brojem 8:

$n_i = 2 \quad 2 \quad 1\ 3 \quad 2$
$G = 27{,}5 \quad V = 21 \quad C = 86000 \quad R = 0{,}805014.$

Konfiguracija pod rednim brojem 1 ima, takođe, najnižu zapreminu $V = 21$:

$n_i = 3\ 2 \quad 1\ 2 \quad 2$
$G = 28 \quad V = 21 \quad C = 86000 \quad R = 0{,}805014.$

Iako obe konfiguracije sistema imaju iste zapremine, treba odabrati konfiguraciju pod rednim brojem 8, jer ona ima nešto manju masu, $G = 27{,}5$, a ostale karakteristike su iste. Kao što se vidi, redundovani sistem ovakve dve konfiguracije je najmanji po zapremini, ali im je pouzdanost, R, skoro na granici zahtevane pouzdanosti $R_0 = 0{,}80$. I, najzad, ako bi se prihvatljiva rešenja uredila po vrednostima cene, C, u rastućem poretku, onda bi na prvom mestu bilo rešenje navedeno pod rednim brojem 20:

$n_i = 2 \quad 2 \quad 2 \; 2 \quad 1$
$G=26 \;\; V=23 \;\; C=68000 \;\; R=0,873739.$

Konfiguracija sa rednim brojem 2 ima, takođe, najnižu cenu, C = 68000:

$n_i = 1 \quad 2 \quad 2 \; 3 \quad 1$
$G=25,5, \;\; V=23 \;\; C=68000 \;\; R=0,801529.$

Iako obe konfiguracije sistema imaju iste cene, treba odabrati konfiguraciju pod rednim brojem 20, jer ona ima znatno veću pouzdanost, a ostale karakteristike su iste ili veoma slične. Korisnik sistema odabraće jedno od ovih rešenja, odnosno jednu od ovih konfiguracija sistema, zavisno od toga šta je za njega najvažnije. Ako mu je najvažnija pouzdanost sistema, on će odabrati onu konfiguraciju sistema koja ima najveću pouzdanost. Ako mu je važno da sistem bude što je moguće lakši, odabraće onu konfiguraciju sistema koja ima najmanju masu. Na sličan način korisnik se odlučuje i kada je u pitanju zapremina ili cena sistema.

Izbor optimalne konfiguracije sistema može se izvršiti i metodom usrednjavanja karakteristika sistema. Kada se prihvatljiva rešenja urede po vrednostima pouzdanosti u opadajućem poretku i primeni postupak izbora optimalnog rešenja usrednjavanjem vrednosti karakteristika sistema, dobiće se kao optimalno rešenje sledeća konfiguracija sistema:

$n_i = 2 \; 2 \quad 2 \; 2 \quad 1$
$G=26 \;\; V=23 \;\; C=68000 \;\; R=0,873739$

Ovo rešenje je pod rednim brojem 20 u navedenim prihvatljivim rešenjima. Kao što se vidi, ova konfiguracija ima pouzdanost koja je nešto veća od zahtevane pouzdanosti $R_0 = 0,80$, ali su mu ostale karakteristike znatno ispod postavljenih granica.

Zaključak

Izloženi postupak određivanja prihvatljivih rešenja i optimizacije aktivne redundanse sistema koji čine redno vezani elementi, sa višestrukim ograničenjima, sa primenom metode „Monte Karlo", znatno je jednostavniji od metoda opisanih u referenci [1].

Međutim, zbog generisanja pseudoslučajnih brojeva koji se koriste u izloženoj metodi, kao i brojnih izračunavanja, neophodna je primena računara. Dobijanje prihvatljivih rešenja za broj redundansi je prirodan, jer se za rezultat dobijaju celi brojevi redundansi, odnosno nula u slučaju da se neki od elemenata ne redunduje, za razliku od metoda navedenih u [1], gde se brojevi redundansi dobijaju kao decimalni razlomci. Osim toga, ako se rezultati dobijeni u praktičnom primeru, u ovom radu, uporede sa rezultatima navedenim u primeru 5.8, [1], može se videti da su oni znatno bolji, jer u primeru 5.8 [1] nije ispunjen uslov, pod istim ograničenjima, da postignuta pouzdanost $R = 0,675$ bude veća od zahtevane pouzdanosti $R_0 = 0,80$, dok je u praktičnom primeru u ovom radu dobijeno 21 prihvatljivo rešenje. Kod nekih konfiguracija dobijene su vrednosti pouzdanosti $R > 0,90$.

Literatura:

[1] Petrić, J., Jevtić, M., Stojanović, V.: Analiza pouzdanosti, Savremena administracija, Beograd, 1979.

[2] Chapouille P., De Pazzis, R.: Fiabilité des systèmes, Masson et C^{ie}, Editeurs, Paris, 1968.

[3] Van Der Waerden, B. L.: Mathematische Statistik, Springer-Verlag, Berlin, 1965.