Planiranje elektroenergetskih sistema

3. Pouzdanost u dugoročnom planiranju

- Elementi pouzdanosti

- LOLP (Loss of load probability) - indeks pouzdanosti
  očekivani broj dana ili sati tokom godine sa deficitom snage

- LOEP (Loss of energy probability) - indeks pouzdanosti
  očekivanu godišnje neisporučenu električnu energiju potrošačima

- **Pouzdanost** je verovatnoća da će posmatrani elemenat (komponenta mreže) obavljati svoju funkciju na adekvatan način, u toku predviđenog perioda vremena i pod svim uslovima koji u toku rada mogu da nastupe.

- Dakle:

  - verovatnoća, nasuprot determinističkom pristupu;

  - elemenat je bilo koja komponenta elektroenergetskog sistema;

  - funkcija elementa je jedna, najbitnija funkcija komponente, koja čini osnovnu pretpostavku adekvatnog rada;

  - adekvatan rad: termin treba da posluži da se postave granice modela;

  - vreme: statistika ponašanja elementa u prošlosti služi za predviđanje ponašanja elementa (sistema) u budućnosti .

- Pouzdanost je, prema tome i metoda kvantitativnog određivanja mogućih događaja koja može da posluži u ocenjivanju relativnih prednosti alternativnih predloga projekta jednog sistema, s obzirom na unapred usvojeni nivo adekvatnog rada sistema čija se realizacija razmatra.

- Primena teorije verovatnoće ne dovodi do određivanja preciznih vremena kada će se događaji desiti, niti do određivanja, opisivanja ili definisanja diskretnih događaja.

- Prednost primene ove teorije je upravo u određivanju relativne prednosti alternative s obzirom na unapred definisani kriterijum.

- Odgovor se daje u terminima probabilistike (verovatnoće).

Događaj, isključivi i komplementarni događaji

- Događaj je odabrani podskup svih ishoda, koji imaju bar jednu, jedinstvenu, zajedničku osobinu. Na primer, bacanje novčića proishodi ili “glavom”, ili “pismom”. Verovatnoća događaja “glava” izračunava se kao:

$$p('glava') = \frac{\text{broj puta } 'glava'}{\text{ukupan broj bacanja}} = p \tag{1}$$

Verovatnoća događaja “pismo” dobija se kao:

$$p('pismo') = \frac{\text{broj puta } 'pismo'}{\text{ukupan broj bacanja}} = q \tag{2}$$

- Pri čemu je: $$p + q = 1 \tag{3}$$

- Isključivi događaji -

  - događaji koji ne mogu da se realizuju istovremeno
  - međusobno se isključuju.

- Komplementarni događaji -

  - svakom događaju A odgovara suprotan ili komplementaran događaj A^c, koji se realizuje ako i samo ako se događaj A ne realizuje.

- Događaji "glava" i "pismo" su međusobno isključivi, odnosno, ako se dogodio jedan od njih, isključeno je da se mogao dogoditi onaj drugi. Oni su takođe i komplementarni, pošto, ako se nije dogodio prvi, sigurno se desio drugi, i obrnuto.

- Ovaj dualizam među događajima, odnosno, da je događaje moguće podeliti na samo dve grupe, uspeh i neuspeh, radi i ne radi, raspoloživ i nije raspoloživ, prisutan je i na elementarnom i na složenijem nivou.

- U fizičkim sistemima koji poseduju statističku regularnost, kao što su životni vek uređaja, dešavanja određenih kvarova, itd., raspoloživosti ili pokazatelji verovatnoće se dobijaju evidentiranjem velikog, ukupnog broja slučajeva.

- Tada govorimo o verovatnoći kao učestanosti događanja.

- Tamo gde nema regularnosti, teorija verovatnoće ne važi.

OSNOVNI POKAZATELJI POUZDANOSTI

- U teoriji pouzdansti koristi se veći broj pokazatelja koji ukazuju na meru pouzdanosti elemenata i sistema.
- Pri tome treba razlikovati neobnovljive i obnovljive elemente, odnosno sisteme.

NEOBNOVLJIVI SISTEMI

- **Neobnovljivi su sistemi koji se ne obnavljaju posle kvara**, tako da im životni vek traje onoliko dugo koliko protekne vremena do kvara. Za ovakve sisteme direktno se može izračunati **neotkazivost** prema osnovnoj definiciji ovog pojma:

$$R(t) \equiv p\{T > t\} \qquad (4)$$

gde T označava vreme trajanja ispravnog rada sistema, a t je vreme koje je proteklo od početka rada sistema do trenutka posmatranja.

- Prema tome, neotkazivost $R(t)$ je verovatnoća da će sistem u trenutku posmatranja biti ispravan.

- **Otkazivost** sistema je verovatnoća da će sistem u trenutku posmatranja biti u kvaru. Pretpostavlja se da se kvar može dogoditi bilo kada do tog trenutka.

$$Q(t) \equiv p\{T \leq t\} \tag{5}$$

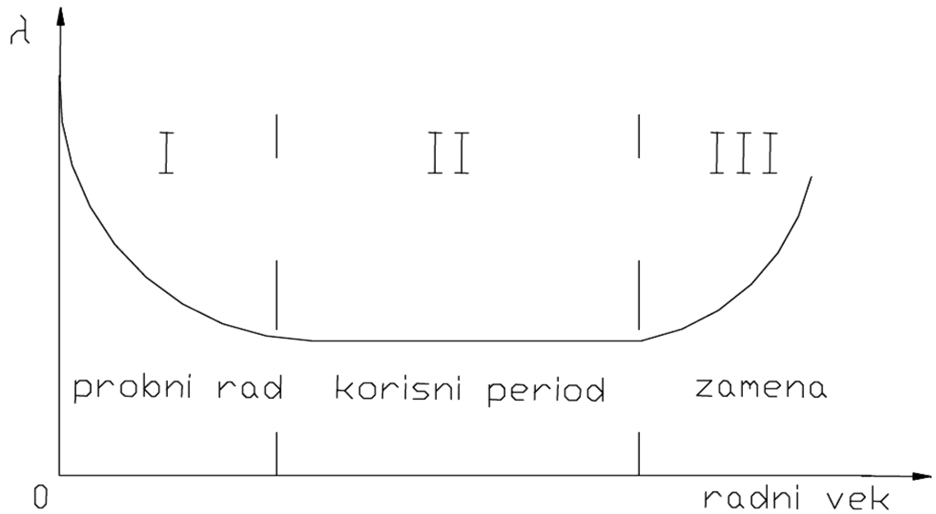
Iz (4) i (5) sledi:

$$R(t) + Q(t) = 1 \tag{6}$$

OBNOVLJIVI SISTEMI

- Pod obnavijanjem se podrazumeva popravka ili zamena delova u kvaru nakon kojih se sistem dovodi u stanje kao da je nov.
- Pri tome se pretpostavlja da je vreme trajanja obnavljanja slučajna veličina sa poznatom funkcijom raspodele verovatnoća.
- Do ove funkcije se može doći praćenjem rada više sistema posmatrane vrste i odgovarajućom obradom podataka o trajanju obnavljanja kod otkaza.
- Raspoloživost i neraspoloživost su dinamički parametri. Za razliku od otkazivosti i neotkazivosti, ovi parametri imaju i specifične stacionarne vrednosti, koje su vrlo važne kod dugogodišnjeg planiranja EES-a.
- Stacionarni pokazatelji pouzdanosti jednog elementa ukazuju na prosečno ponašanje u dugom vremenskom periodu i dobijaju se statističkom obradom podataka iz eksploatacije.

- **Intenzitet kvara** $\lambda = \lambda(t)dt$ je verovatnoća da će element otkazati u narednom trenutku dt, ako je do trenutka t bio ispravan.
- Intenzitet kvara je i pokazatelj broja prelazaka iz stanja rada u stanje kvara, u dovljno dugom periodu vremena i za veliki broj posmatranih komponenata.



$$\lambda = \frac{\text{broj kvarova do vremena t}}{\text{ukupan broj komponenti}} \qquad (7)$$

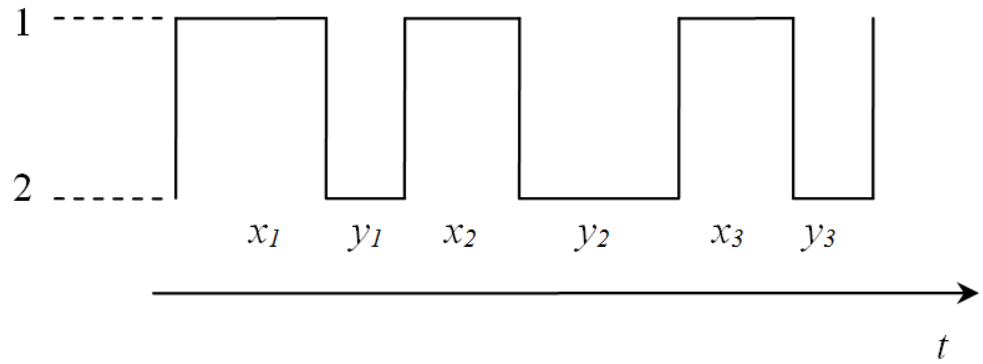
Sl. 1. Zavisnost intenziteta kvarova od vremena

- Posle probnog rada (I) sa povećanim brojem otkaza ulazi se u period eksploatacije (II) koji obeležava statistička regularnost, da bi učestaliji ispadi naznačili da je vreme za zamenu (III).
- Naša razmatranja biće vezana za oblast II. Intenzitet kvara (**λ**) i intenzitet obnavljanja (**μ**) definišu se u odnosu na srednje ukupno vreme koje je elementu potrebno da bi okončao jedan eksploatacioni ciklus (na pr. kvar, popravka, ponovni rad).
- **Srednje vreme između dva ispada** jednako je zbiru srednjeg vremena trajanja ispravnog rada (m_i)+ srednjeg vremena otklanjanja kvarova (r_i)

$$T_i = m_i + r_i \tag{7}$$

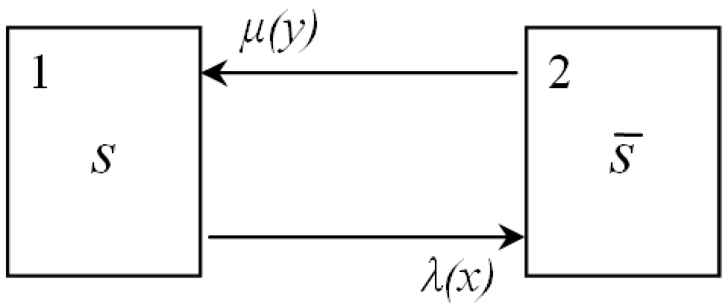
- Veličina μ= μ(y)dy (**intenzitet obnavljanja**) predstavlja verovatnoću da će se obnavljanje zavrsiti u vremenskom intervalu (y,y + dy) ako se do tog perioda nije zavrsilo.

- Ponašanje sistema se može prikazati u vidu **vremenskog dijagrama stanja**, kako je pokazano na *Sl. 2.a* gde je sa 1 označeno radno stanje, a sa 2 obnavljanje. Slučajna veličina X je vreme trajanja rada. Vreme trajanja obnavljanja je slučajna veličina Y . Sa x_k i y_k , k = 1, 2,... označena su trajanja ispravnog rada i obnavljanja, koja su zabeležena u toku posmatranja.
- Pomenute veličine predstavljaju zabeležene pojedinačne vrednosti slučajnih velicina X i Y



Sl. 2. Vremenski dijagram stanja

- Ponašanje sistema se može prikazati preko **dijagrama prelaza**. Na dijagramu je sa S označeno radno stanje sistema a sa $\overline{S}$ obnavljanje.
- Pretpostavljeno je da su raspodele verovatnoća trajanja ispravnog rada i obnavljanja proizvoljne, što je simbolično naznačeno kod intenziteta otkaza i obnavljanja koji su prikazani kao funkcije trajanja boravka u odgovarajućim stanjima.



Sl. 2.b Dijagram prelaza

❖ Važan pokazatelj pouzdanosti obnovljivih sistema je **raspoloživost**, **p(t)** , koja se definiše kao verovatnoća da će sistem u trenutku t vremena biti ispravan. Verovatnoća da u trenutku t sistem neće raditi, označeno je sa **q(t)** i naziva se **neraspoloživost** sistema. Njihove stacionarne vrednosti:

$$p_i = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} = \frac{m_i}{r_i + m_i} = \frac{m_i}{T_i} = \frac{f_i}{\lambda_i} \qquad q_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} = \frac{r_i}{r_i + m_i} = \frac{r_i}{T_i} = \frac{f_i}{\mu_i} \qquad (8)$$

gde su:

λ_i - intenzitet kvarova i-te komponente u [kvarova/god]; $\lambda_i = \frac{1}{m_i}$

μ_i - intenzitet obnavljanja i-te komponente u [obnavljanja/god]; $\mu_i = \frac{1}{r_i}$

$T_i = r_i + m_i$ - srednje vreme izmedu dva ispada i-te komponente u [god];
$f_i = 1/(r_i + m_i) = 1/T_i$ - srednja učestanost ispada i-te komponente u [ispada/god].

- U opštem slučaju, intenziteti otkaza mogu biti i funkcije apsolutnog vremena t . Ovo bi značilo da se vrednost razmatranih intenziteta menja ne samo sa dužinom boravka u pojedinim stanjima nego i uopšte, sa proticanjem vremena.
- Jasno je da je verovatnoća da je sistem ispravan u nekom trenutku t veća ako je sistem obnovljiv nego ako nije. Naime, kod neobnovljivih sistema svaki kvar koji se dogodio prouzrokovaće neradno stanje sve vreme posle tog trenutka.
- Kod obnovljivih sistema posle otkaza sistem se obnavlja tako da postoji konačna verovatnoća da će sistem koji je otkazao pre trenutka t biti ispravan u ovom trenutku i kasnije.

$$p(t)>R(t) \tag{9.a}$$

$$q(t)<Q(t) \tag{9.b}$$

PRAVILA ZA KOMBINOVANJE VEROVATNOĆA

- Pravila za kombinovanje verovatnoća su osnova za sva razmatranja u ovom poglavlju:

  1. Dva događaja su nezavisna, ako dešavanje jednog ne utiče na verovatnoću nastupanja drugog događaja.

  2. Dva događaja su isključiva, ako ne mogu oba da se dogode (i rad i kvar, na primer).

  3. Verovatnoća nastupanja dva nezavisna događaja proizvod je verovatnoća ovih događaja. Neka su A i B nezavisni događaji, tada

  $$p(A \cap B) = p(A) \cdot p(B)$$

  \- U notaciji teorije skupova $p(A \cap B)$ je verovatnoća novog događaja pod nazivom "i A i B", koja se, sa druge strane, izračunava kao proizvod verovatnoća nezavisnih događaja.

  \- Znak množenja čita se kao "i".

4. Verovatnoća nastupanja bilo kojeg od dva isključiva događaja zbir je verovatnoća ovih događaja. Neka su A i B isključivi događaji, tada

$$p(A \cup B) = p(A) + p(B)$$

- U notaciji teorije skupova p(A U B) je verovatnoća novog događaja pod nazivom “ili A ili B” koja se, sa druge strane, izračunava kao zbir verovatnoća isključivih događaja.
- Znak sabiranja čita se kao “ili”.

5. Verovatnoća nastupanja bilo kojeg od dva, ili oba događaja ako oni nisu isključivi, data je kao

$$p(A \cup B) = p(A) + p(B) - p(A) \cdot p(B)$$

ako su A i B ipak isključivi događaji, verovatnoća njihovog istovremenog nastupanja je, naravno, nula i

$$p(A \cup B) = p(A) + p(B) .$$

6. Kada se dopunski uslovi nametnu jednom delu skupa događaja, tada se verovatnoće u vezi sa podskupom nazivaju uslovnim verovatnoćama.

Uslovna verovatnoća događaja A u odnosu na događaj B - verovatnoća da je ispunjen A, ako je ispunjen B piše se kao: $p(A|B)$.

7. Verovatnoća istovremenog dešavanja dva događaja jednaka je proizvodu verovatnoće prvog događaja i uslovne verovatnoće drugog događaja, određenog pod uslovom da se prvi događaj desio.

$$p(A \cap B) = p(A) \cdot p(B|A)$$

$$p(A \cap B) = p(B) \cdot p(A|B)$$

Ako su A i B nezavisni događaji, tada imamo slučaj 3, s obzirom na

$$p(B|A) = p(B)$$

$$p(A|B) = p(A)$$

8. Ako je dešavanje događaja A zavisno od izvesnog broja događaja B_j koji su međusobno isključivi, tada je:

$$p(A)=\sum_{i=1}^{j} p(A|B_i)\cdot p(B_i)$$

Ako je dešavanje A zavisno od samo dva međusobno isključiva događaja u vezi sa komponenom B (rad i kvar, B_x i B_y), tada

$$p(A)=p(A|B_x)\cdot p(B_x)+p(A|B_y)\cdot p(B_y)$$

- Ako je A definisano kao kvar sistema, tada

p(sistem u kvaru)=p(sistem u kvaru ako B radi) p(Bx) +
+ p(sistem u kvaru ako B ne radi) p(By)

- Komplementarna situacija je slična po obliku kada je događaj A definisan kao rad sistema:

p(sistem radi)=p(sistem radi ako B radi) p(Bx) +
+ p(sistem radi ako B ne radi) p(By)

9. Matematičko očekivanje: razmotrimo model zasnovan na verovatnoći čijim je ishodima x_1, x_2, x_3, ...,x_n, moguće pridružiti verovatnoće p_1, p_2, p_3, ...,p_n. Matematičko očekivanje promenljive x definisano je kao:

$$E(x) = p_1 x_1 + p_2 x_2 + \cdots + p_n x_n = \sum_{i=1}^{n} p_i x_i$$

- Matematičko očekivanje je ponderisana srednja vrednost mogućih ishoda, sa verovatnoćom kao težinskim faktorom.
- Matematičko očekivanje ne ukazuje na najveću verovatnoću nekog događaja.
- Dobra je mera za formiranje kriterijumske vrednosti, ili usvojenog nivoa adekvatnog rada.

10. Binomna raspodela: eksperimenti koji se sastoje od nezavisnih ponavljanja pokušaja fiksne verovatnoće i sa dualnim ishodom, pokazuju diskretnu raspodelu ishoda binomnog tipa.

- Ako je p verovatnoća pozitivnog, a q negativnog ishoda, p + q = 1, onda je verovatnoća da se iz n pokušaja dobije r pozitivnih ishoda (a n-r negativnih)

$$P_r = \frac{n!}{r!(n-r)!} p^r (1-p)^{n-r} = \frac{n!}{r!(n-r)!} p^r (q)^{n-r} = \binom{n}{r} p^r (q)^{n-r}$$

a to je r-ti član binomnog razvoja $(p + q)^n$. Znači,

$$(p+q)^n = \sum_{r=0}^{n} \binom{n}{r} p^r (q)^{n-r} = 1$$

❖ Koeficijenti binomnog razvoja mogu se dobiti i iz Pascal-ovog trougla:

n=0						1					
n=1					1		1				
n=2				1		2		1			
n=3			1		3		3		1		
n=4		1		4		6		4		1	
n=5	1		5		10		10		5		1
...itd.											

(pošto se ispišu jedinice od vrha trougla prema dole, unutrašnji članovi razvoja dobijaju se sabiranjem dva člana prethodnog reda, simetrično iznad posmatranog mesta). Na primer, za n=5 binomni razvoj je:

$$(p+q)^5 = p^5 + 5p^4q + 10p^3q^2 + 10p^2q^3 + 5pq^4 + q^5 = 1$$

Primer 1: Novčić se baca sedam puta. Verovatnoća da se iz jednog pokušaja dobije “glava” iznosi p=0,5. Potrebno je da se izračuna raspodela verovatnoće za broj slučajeva kada padne “glava” novčića. Nacrtati ovu raspodelu.

Rešenje:

Raspodela verovatnoće se dobija iz izraza:

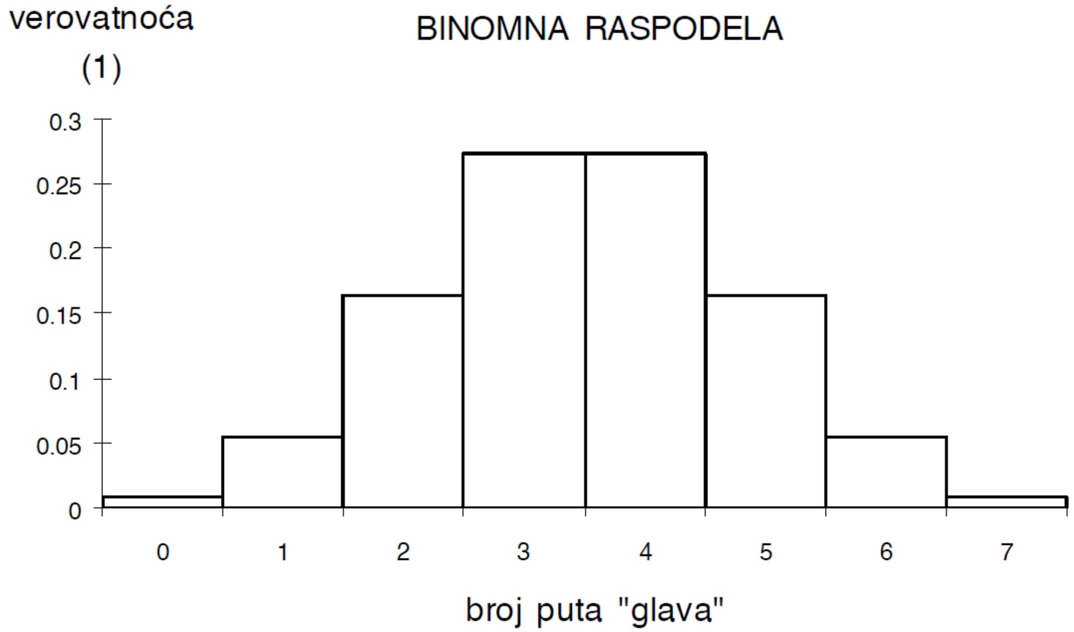
$$(p + q)^7 = 1$$

gde je p=q=0,5. Verovatnoća da se dobije “pismo” označena je sa q.

$$(p+q)^7 = p^7 + 7p^6q + 21p^5q^2 + 35p^4q^3 + 35p^3q^4 +$$
$$+ 21p^2q^5 + 7pq^6 + q^7 = 1$$

- Svaki od sabiraka predstavlja jedan od mogućih ishoda eksperimenta.
- Na primer, postoji i jedan takav rezultat u kojem bi pet puta “pala” “glava” a dva puta “pismo” i mi znamo da ovaj događaj može da se desi na 21 način.
- Samo su “sedam puta glava” ili “sedam puta pismo” događaji koji mogu da se dogode na samo jedan način.
- Sva moguća bacanja su isključivi događaji.

- Slika 3 i tabela 1 prikazuju simetričnu binomnu raspodelu koja se dobija u ovom slučaju, pošto je p=q=0,5.



Sl. 3.

Tabela 1

stanje	*verovatnoća*
p^7	0,007813
$7p^6q$	0,054688
$21p^5q^2$	0,164063
$35p^4q^3$	0,273438
$35p^3q^4$	0,273438
$21p^2q^5$	0,164063
$7pq^6$	0,054688
q^7	0,007813
	1,000000

Primer 2: Razmotrimo slučaj binomne raspodele kada je verovatnoća povoljnog ishoda u jednom pokušaju p=0,2. Eksperiment se sastoji od sedam pokušaja. Potrebno je da se izračuna binomna raspodela verovatnoće za slučajeve povoljnog ishoda.

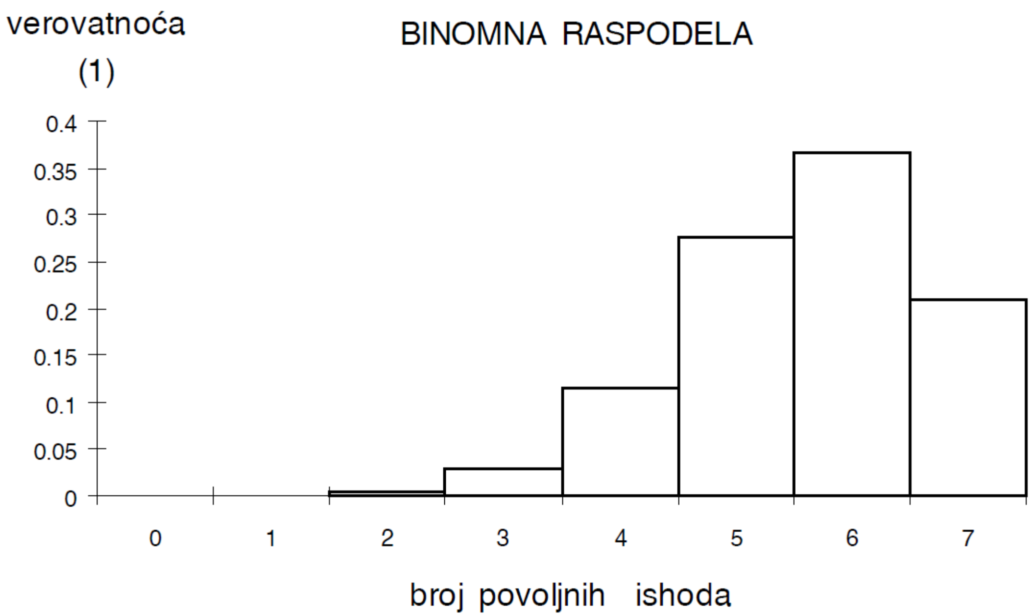
Rešenje:

$$(p+q)^7 = p^7 + 7p^6q + 21p^5q^2 + 35p^4q^3 + 35p^3q^4 + $$
$$+ 21p^2q^5 + 7pq^6 + q^7 = 1$$

p=0,2

q=0,8

Binomna raspodela u ovom slučaju nije simetrična.

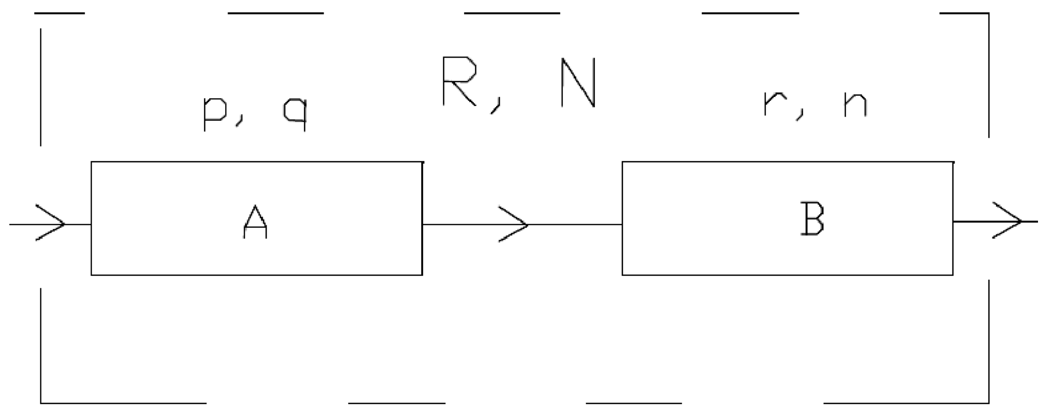


Sl. 4.

Tabela 2

stanje	*verovatnoća*
p^7	1,28E-05
$7p^6q$	0,000358
$21p^5q^2$	0,004301
$35p^4q^3$	0,028672
$35p^3q^4$	0,114688
$21p^2q^5$	0,275251
$7pq^6$	0,367002
q^7	0,209715
	1,000000

Primer 3: Raspoloživost redne veze. Sistem čine dve redno povezane komponente, A i B. Verovatnoća rada elementa (raspoloživost) A je p, a kvara (neraspoloživost) q, dok je raspoloživost komponente B jednaka r, a neraspoloživost n. Predstaviti raspoloživost sistema s obzirom na njegovu funkciju prenosa.



- Stanja ukupne raspoloživosti oba elementa sistema su nezavisni događaji.
- Sva stanja sistema dobijaju se primenom pravila 3 na sistem, ili

$$(p + q)(r + n) = 1$$

Ako se proizvod grupiše ovako:

$$pr + (pn + rq + qn) = 1$$

- Sistem je raspoloživ samo ako su i jedan i drugi element raspoloživi (pravilo 3). Verovatnoća događaja "sistem je raspoloživ" označena je sa R.

$$R = pr$$

- Neraspoloživost sistema N je evidentna kada je neraspoloživ ili prvi (dok drugi radi), ili drugi (dok prvi radi), ili kada su oba neraspoloživa, odnosno

$$N = pn + rq + qn$$

- Vidimo, sistem se ponaša kao jedan ekvivalentan element raspoloživosti R i neraspoloživosti N,

$$R + N = 1$$

- Najjednostavnije je, za rednu vezu dva elementa, naći prvo raspoloživost R,

a potom neraspoloživost izračunati kao N = 1 - R .

- Međutim, neraspoloživost sistema možemo da odredimo i po pravilu 5, pošto su rad i kvar na elementima A i B nezavisni i isključivi kod svakog od elemenata, ali nisu i isključivi događaji između elemenata (na primer, kvar A ne isključuje kvar B).

$$N = pn + rq + qn$$

$$N = (1 - q)n + (1 - n)q + qn$$

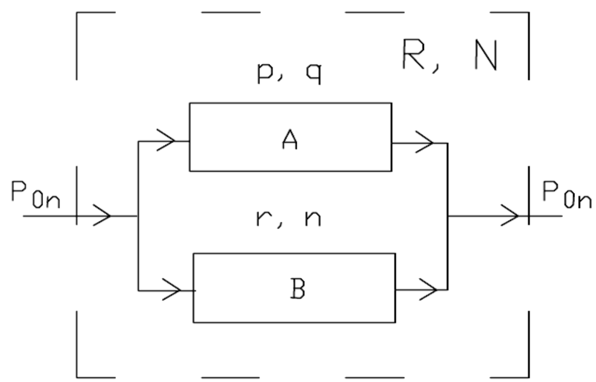
$$N = q + n - qn$$

- Što može da se interpretira i ovako: “sistem ne radi kada ne radi A i bilo šta da se dogodilo sa B, ili kada ne radi B i bilo šta da se desllo sa A, od čega treba oduzeti jednom qn pošto je dvaput citirano kao događaj, a dešava se samo na jedan način”, odnosno

$$N = q \cdot 1 + n \cdot 1 - qn = q(r + n) + n(p + q) - qn$$

$$N = q + n - qn$$

Primer 4: Raspoloživost paralelne veze. Potpuno redundantan sistem čine dve paralelno povezane komponente, A i B. Raspoloživost komponente A je p, a neraspoloživost q, dok je raspoloživost elementa B jednaka r, a neraspoloživost n. Predstaviti raspoloživost sistema s obzirom na njegovu funkciju prenosa.

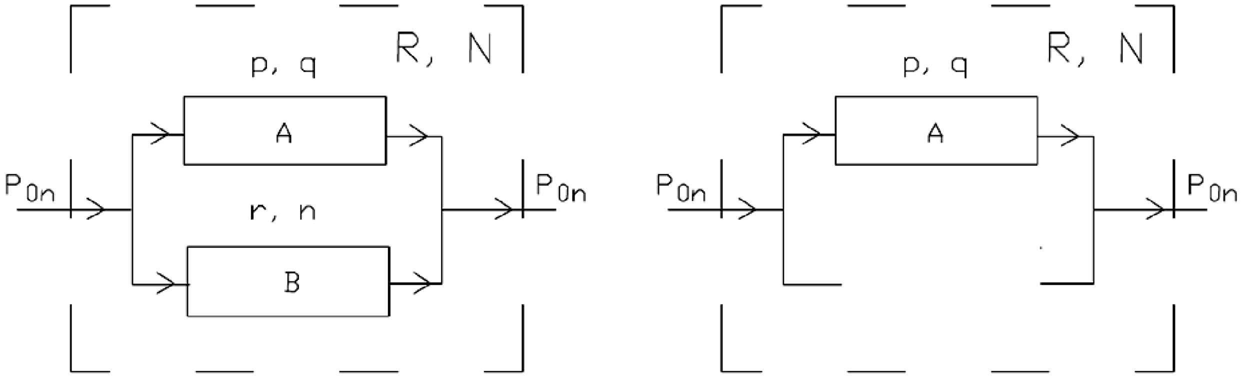


Primer 4: Raspoloživost paralelne veze. Potpuno redundantan sistem čine dve paralelno povezane komponente, A i B. Raspoloživost komponente A je p, a neraspoloživost q, dok je raspoloživost elementa B jednaka r, a neraspoloživost n. Predstaviti raspoloživost sistema s obzirom na njegovu funkciju prenosa.

Rešenje:

- Potpuno redundantan je onaj sistem kojem je funkcija (prenos) 100% očuvana, bez obzira na umanjenje verovatnoće da takav sistem zbog oslabljenja opstane u radu.
- Primetimo da se u postavci problema propusna moć elementa ne javlja se kao zadato ograničenje.

Sl. 5.



- Sistem se ponaša kao jedan ekvivalentan element (slika 5), raspoloživosti R i neraspoloživosti N. Ispadom jednog elementa, snagu P_{0n} prenosi preostali element. Stanja ukupne raspoloživosti oba elementa sistema su nezavisni događaji. Sva stanja sistema dobijaju se primenom pravila 3 za kombinovanje verovatnoća, ili

$$(p + q)(r + n) = 1$$

$$(pr + pn + rq) + qn = 1$$

- Sistem je neraspoloživ jedino ako su i jedan i drugi (znak množenja) element neraspoloživi (pravilo 3). Verovatnoća događaja "sistem je neraspoloživ" označena je sa N.

$$N = qn$$

- Raspoloživost sistema R je evidentna kada je raspoloživ ili jedan, ili drugi, ili oba elementa, odnosno

$$R = pr + pn + rq$$

$$R + N = 1$$

- Najjednostavnije je, za paralelnu vezu dva elementa, naći prvo neraspoloživost N, a potom raspoloživost izračunati kao R = 1 - N. Tada imamo i najmanje operacija sabiranja i množenja.

- Međutim, raspoloživost sistema možemo da odredimo i po pravilu 5, pošto su rad i kvar na elementima A i B nezavisni između elemenata, ali ne i međusobno isključivi događaji (na primer, kvar A ne isključuje kvar B).

$$R = pr + pn + rq$$

$$R = pr + p(1 - r) + r(1 - p)$$

$$R = p + r - pr$$

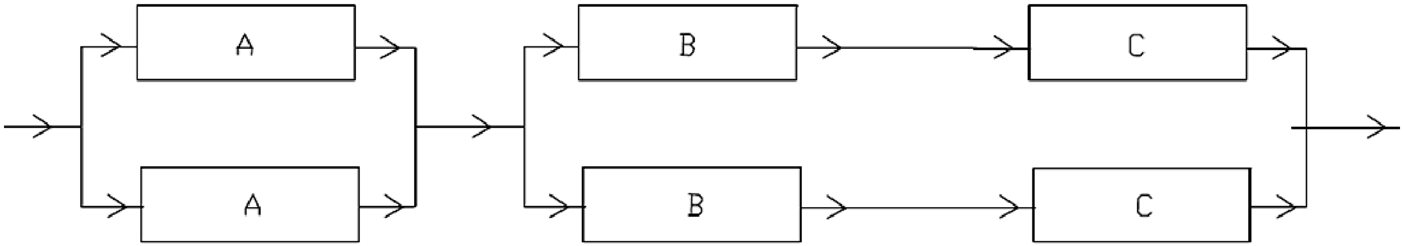
- Što može da se interpretira i ovako: “sistem radi kada radi A i bilo šta da se desilo sa B, ili kada radi B i bilo šta da se desilo sa A, od čega treba oduzeti jednom pr pošto je dvaput citirano kao događaj, a dešava se samo na jedan način”, odnosno

$$R = p \cdot 1 + r \cdot 1 - pr = p(r + n) + r(p + q) - pr$$

$$R = p + r - pr$$

Primer 5: Izračunati raspoloživost šeme na slici ako su sistemi A, i BC potpuno redundantni. Poznate su verovatnoće rada $p_A=p_B=p_C=0{,}95$.

Sl. 6.



Rešenje:

$$R = \left[1-(1-p_A)^2\right]\left[1-(1-p_{BC})^2\right]$$

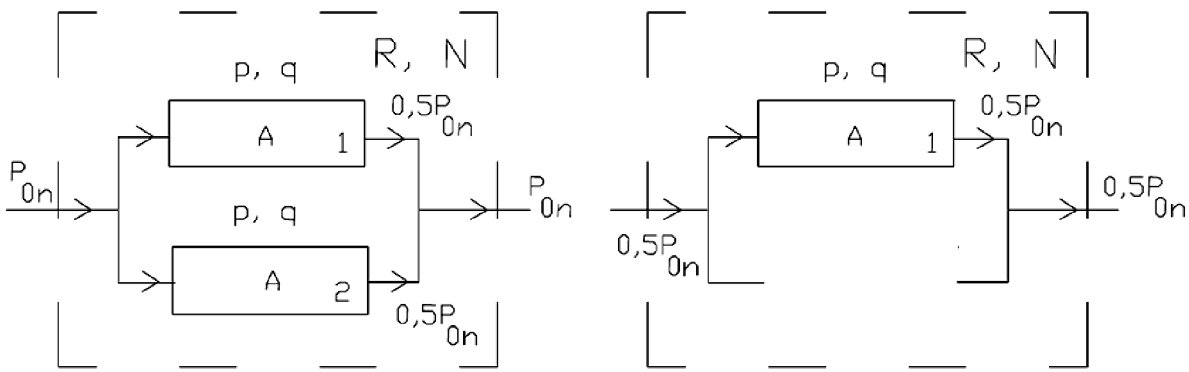
$$R = \left[1-(1-p_A)^2\right]\left[1-(1-p_Bp_C)^2\right]$$

$$R = \left[1-(1-0{,}95)^2\right]\left[1-(1-0{,}95^2)^2\right] = 0{,}9880175$$

Primer 6: Dva paralelno povezana A elementa označena brojevima 1 i 2, poznate raspoloživosti (p) i prenosne moći 0,5 P_{0n}, zajedno prenose snagu P_{0n}.

Nacrtati dijagram prelaza i naznačiti stanja sistema.

- Sistem nije redundantan. Kapacitet za prenos ovog sistema se smanjuje na polovinu kada se dogodi ispad jedne komponente.



Sl. 7.

- **Rešenje:**
- Sva stanja sistema:

$$(p + q)^2 = 1$$

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1$$

- Označimo kao događaje ***neraspoloživosti snage*** i odredimo njihove verovatnoće.

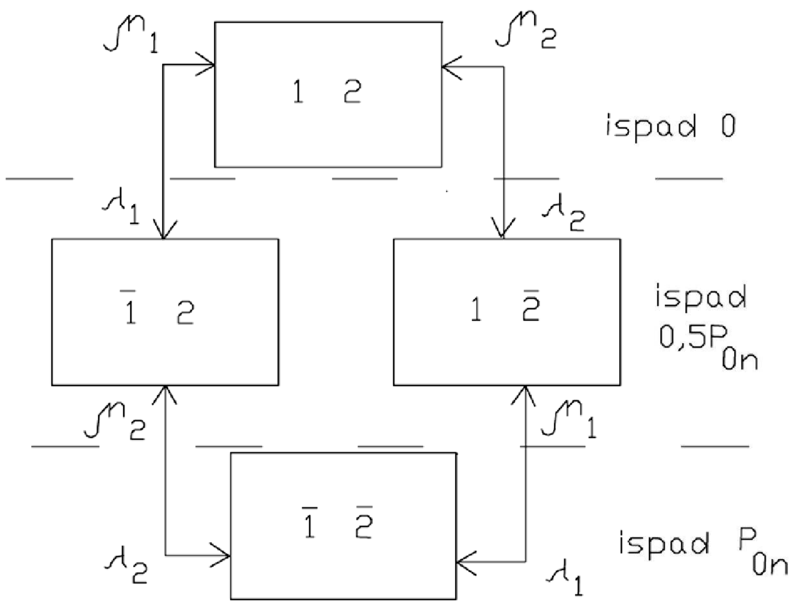
$$p(0) + p(0{,}5P_{0n}) + p(P_{0n}) = 1$$

$$p(0) = p^2$$

$$p(0{,}5P_{0n}) = 2pq$$

$$p(P_{0n}) = q^2$$

❖ Slika 8 prikazuje dijagram prelaza sa tri stanja.

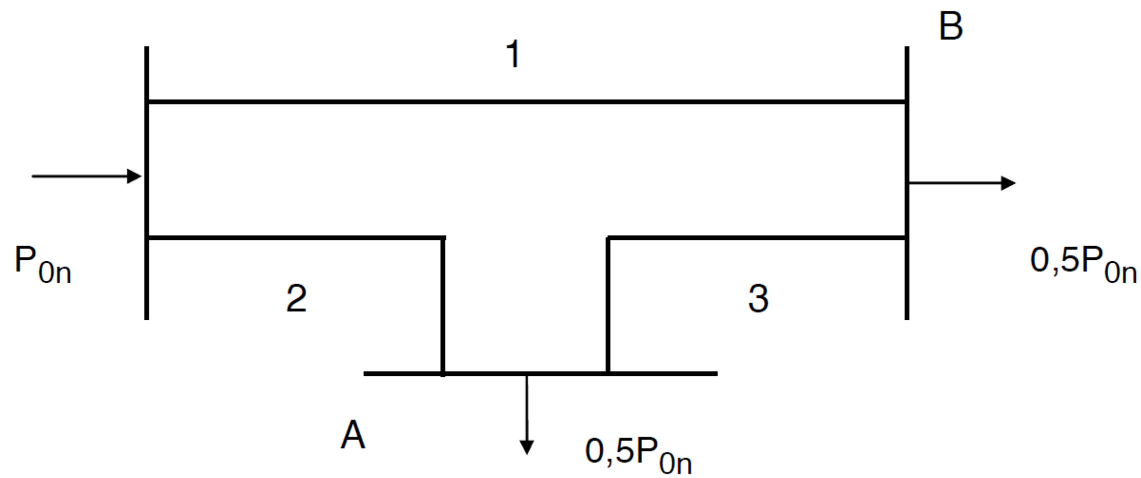


Sl. 8.

Iz stanja “ispad 0” kada su oba elementa u radnom stanju (oznake 1 i 2), prelazi se u stanje “ispad 0,5P0n” ispadom jednog, bilo kojeg elementa (oznake - $\bar{1}$ i 2 ili 1 i $\bar{2}$) pri kojem prenosna moć sistema pada na $0{,}5P_{0n}$. Otkazom preostalog elementa celokupna šema gubi funkciju (“ispad P_{0n}”).

Primer 7: Na slici prikazana je šema sa dvostranim napajanjem, koju čine vodovi 1, 2 i 3. Prenosni kapacitet svakog voda iznosi P_{0n}. Verovatnoće kvara (neraspoloživosti) vodova iznose: q_1=0,1, q_2=0,05, q_3=0,01. Naći:

a) verovatnoću 100% podmirenja opterećenja potrošača A; **b)** verovatnoću 100% podmirenja opterećenja potrošača B; **c)** ako se kao neraspoloživost definišu oni događaji koji ne predstavljaju punu (100%) raspoloživost opterećenja potrošača, kolika je tada neraspoloživost opterećenja potrošača A, odnosno B?



Sl. 9.

Rešenje:

a) Događaji koji definišu 100% podmirenja opterećenja potrošača u A:

· Vod 1 i vod 2 i vod 3 ispravni, ili

· Vod 2 u kvaru i redna veza vodova 1 i 3 ispravna, ili

· Vod 2 ispravan i redna veza vodova 1 i 3 u kvaru.

Prema tome, verovatnoća 100% podmirenja opterećenja potrošača u A izračunava se iz

$$p_A = p_1 p_2 p_3 + q_2 p_1 p_3 + p_2 (1 - p_1 p_3)$$

$$p_A = p_2 + q_2 p_1 p_3$$

$$p_1 p_3 = (1 - q_1)(1 - q_3)$$

$$p_A = 1 - q_2 (q_1 + q_3 - q_1 q_3)$$

$$p_A = 1 - 0{,}05(0{,}1 + 0{,}01 - 0{,}1\ 0{,}01) = 0{,}99455$$

b) Događaji koji definišu 100% podmirenja opterećenja potrošača u B:

· Vod 1 i vod 2 i vod 3 ispravni, ili

· Vod 1 u kvaru i redna veza vodova 2 i 3 ispravna, ili

· Vod 1 ispravan i redna veza vodova 2 i 3 u kvaru.

Prema tome, verovatnoća 100% podmirenja opterećenja potrošača u B izračunava se iz:

$$p_B = p_1 p_2 p_3 + q_1 p_2 p_3 + p_1(1 - p_2 p_3)$$

$$p_B = p_1 + q_1 p_2 p_3$$

$$p_2 p_3 = (1 - q_2)(1 - q_3)$$

$$p_B = 1 - q_1(q_2 + q_3 - q_2 q_3)$$

$$p_B = 1 - 0{,}1(0{,}05 + 0{,}01 - 0{,}05\,0{,}01) = 0{,}99405$$

c) Neraspoloživosti se izračunavaju prema

$$q_A = 1 - p_A = 1 - 0,99455 = 0,00545$$

$$q_B = 1 - p_B = 1 - 0,99405 = 0,00595$$

ISPAD, PRINUDNI ISPAD I PLANIRANI ISPAD

- **Ispad (otkaz)** je stanje komponente kada ona nije u mogućnosti da izvršava svoju osnovnu funkciju, zbog nekog događaja koji je direktno povezan sa tom komponentom.
  - U zavisnosti od konfiguracije sistema, ispad ne mora da prouzrokuje i prekid snabdevanja potrošača.

- **Prinudni ispad** je ispad kao posledica rada komponente u havarijskim uslovima, koji rezultira zahtevom da komponenta bude odmah isključena iz pogona, bilo automatski, bilo ručno i to što je pre moguće.
  - Prinudni ispad je takođe i ispad prouzrokovan neadekvatnom eksploatacijom komponente ili čovekovom greškom.

- **Planirani ispad** je ispad koji nastaje kada se komponenta namerno isključi iz pogona, u unapred određenom trenutku, obično da bi se omogućili izvođački radovi, preventivno održavanje ili popravka.

- Razvrstavanje u prinudne ili planirane ispade se može izvršiti na osnovu sledećeg testa:
  - Ako je moguće odložiti ispad kada je to potrebno, radi se o planiranom, inače, o prinudnom ispadu.
  - Odlaganje ispada može da bude poželjno kada se želi da spreči preopterećivanje uređaja ili da onemogući neki drugi potencijalni uzrok prekida snabdevanja potrošača.

Stanja raspoloživosti elektrane / Tabela ispada snage generatora

1. **Tri generatora istog tipa**

- Snaga svakog od njih je P=20 MW, dok im je raspoloživost p=0,98.

➢ Sva stanja raspoloživosti, za n generatora istog tipa, dobijaju se iz binomne raspodele.

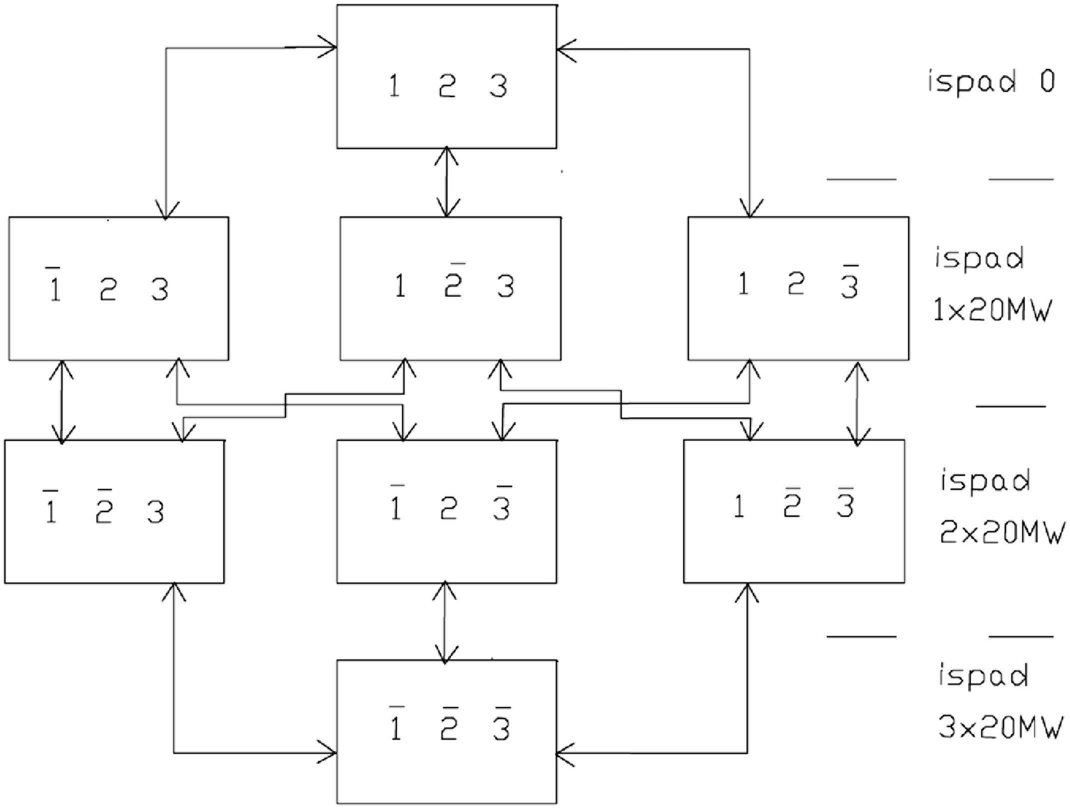
$$(p + q)^n = 1$$

$$(p + q)^3 = p^3 + 3p^2q + 3pq^2 + q^3 = 1$$

- Tabela ispada snage generatora je uobičajeni način prikazivanja rezultata.
- Ova tabela sadrži “opis” stanja koji je jednostavno protumačiti verbalizacijom iz binomnog razvoja, deficit (ili ispad) snage, kao i verovatnoću tog događaja. Kumulativna verovatnoća je verovatnoća da ispad snage nije manji od naznačenog iznosa P_{isp} i data je u tabeli 3.
- Verovatnoća opada sa porastom snage u ispadu.

Tabela 3

stanje ispada	P_{isp} *(MW)*	*p* *(1)*	*kumulativna verovatnoća (1)*
p^3	0	0,941192	1,000000
$3p^2q$	20	0,057624	0,058808
$3pq^2$	40	0,001176	0,001184
q^3	60	0,000008	0,000008
Σ		1,000000	



Sl. 10 *Dijagram prelaza*

Tabela 4

stanje ispada	P_{isp} *(MW)*
p^3	0
$3p^2q$	20
$3pq^2$	40
q^3	60
Σ	

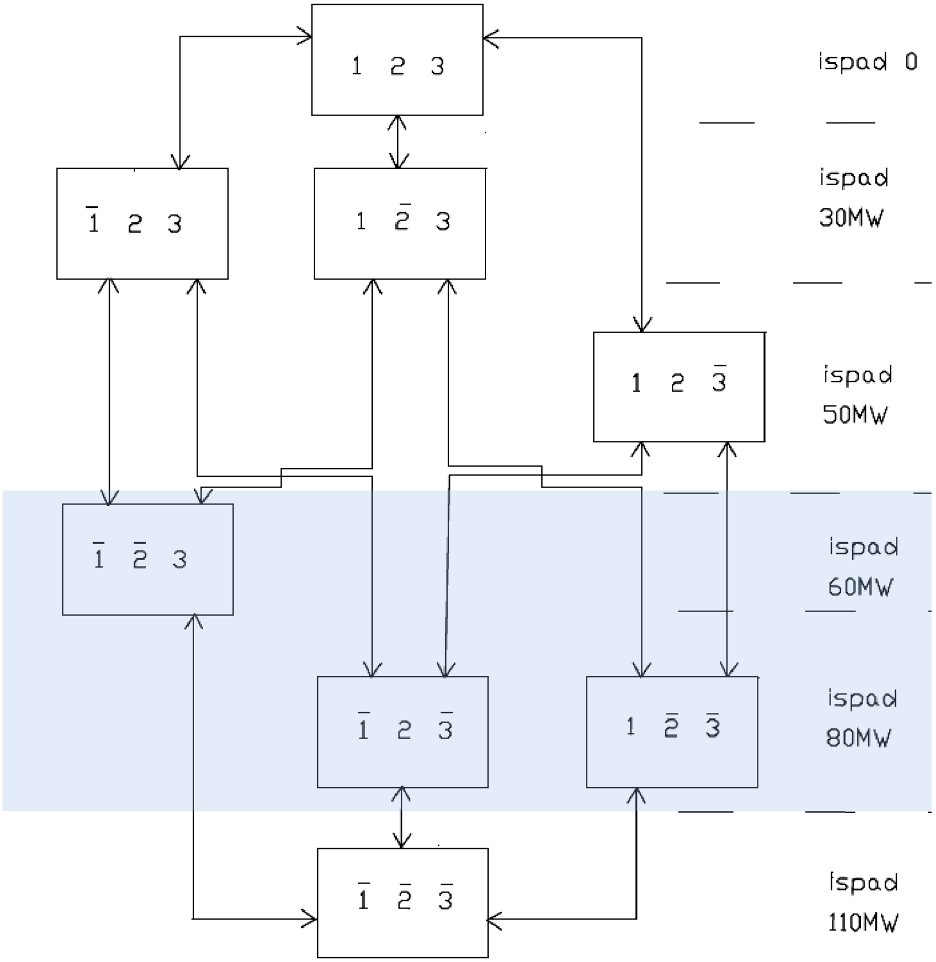
Stanja raspoloživosti elektrane / Tabela ispada snage generatora

2. generatori nisu istih karakteristika (bilo snage, bilo verovatnoće)

- U elektrani rade dva generatora snage P_1=30MW (broj 1 i 2) i jedan generator snage P_2=50MW (broj 3). Raspoloživost ovih generatora iznosi p=0,98.

- Kada svi generatori nisu istih karakteristika (bilo snage, bilo verovatnoće), binomna raspodela nije u potpunosti primenljiva.
- Zadržimo simbol (p) za raspoloživost dva generatora tipa 1 (P_1=30MW), a uvedimo (r) da obeležimo raspoloživost jednog generatora tipa 2 (P_2=50MW). Odgovarajuće neraspoloživosti su q=0,02 i n=0,02.
- Verovatnoće svih mogućih kombinacija rada u dve grupe generatora elektrane dobijaju se razvijanjem sledećeg proizvoda:

$$(p+q)^2(r+n)=1$$



Sl. 11 *Dijagram prelaza*

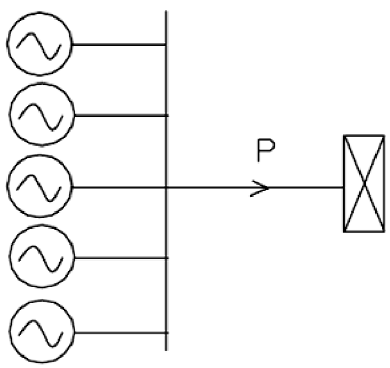
-tip 1: P_1=30MW (broj 1 i 2)
-tip 2: P_2=50MW (broj 3)

Tabela 5

stanje ispada	P_{isp} *(MW)*	*p* *(1)*
p^2r	0	0,941192
2pqr	30	0,038416
p^2n	50	0,019208
q^2r	60	0,000392
2pqn	80	0,000784
q^2n	110	0,000008
Σ		1,000000

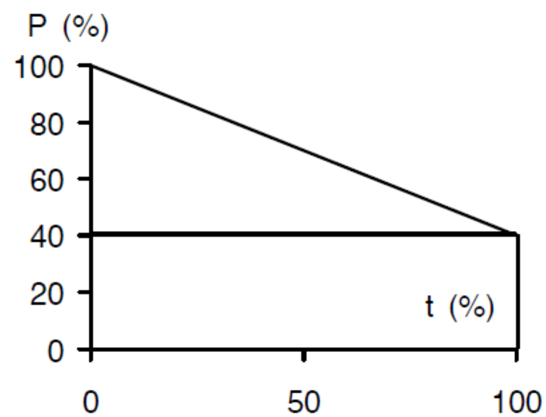
Metoda očekivanog gubitka opterećenja ili LOLP metoda

- LOLP -indeks je najčešće korišćeni pokazatelj pouzdanosti proizvodnog i potrošačkog podsistema.
- Metoda očekivanog gubitka opterećenja (LOLP=Loss of Load Probability) zasnovana je na redukovanom modelu elektroenergetskog sistema.
- Celokupna aktivna potrošnja sistema (inače raznovrsna i brojna, sa klasifikacijom po kategorijama, po naponskim nivoima, sa gubicima, zavisna od učestanosti, napona i reaktivne snage, sa geografskom raspodeljenošću i drugim specifičnostima) sabrana za ceo sistem, vezana je na fiktivne sabirnice, zajedno sa svim generatorima sistema, kao na slici 12.



Sl. 12.

❖ **Prikaz potrošnje sistema** je veoma redukovan i dat kao dijagram trajanja opterećenja, obično idealizovan pravom negativnog nagiba, u koordinatnom sistemu sa normalizovanom podelom po osama.



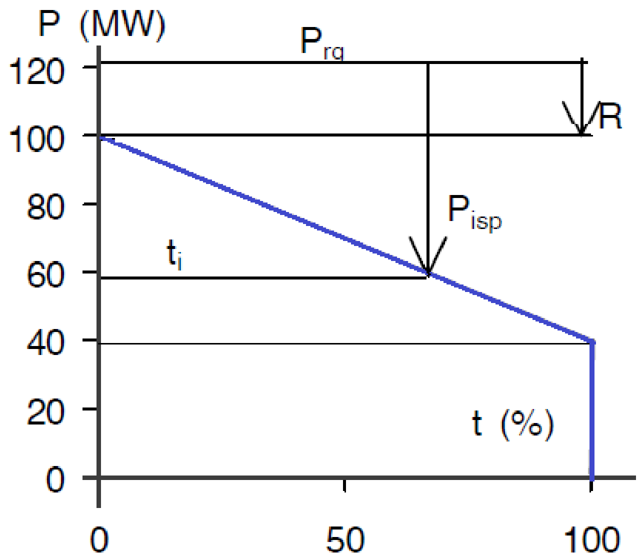
Sl. 13.

❖ Koordinate na slici 13 su u procentima:

$$P(\%) = \frac{P}{P_M} 100 \qquad t(\%) = \frac{t}{365} 100 \tag{21}$$

gde je aktivna snaga P (MW), P_M (MW) maksimalno opterećenje sistema prema dijagramu trajanja. Procenti na t-osi su za osnovu od 365 dana.

❖ **Predstava izvora sistema** je takođe redukovana do informacije o raspoloživom ili instalisanom kapacitetu (P_{rg}), koje se prikazuje kao ordinata raspoložive (instalisane) snage, na istom dijagramu sa opterećenjem (slika 14).



Sl. 14.

Rezerva:

$$R = P_{rg} - P_M \qquad (22)$$

❖ Rezerva R je razlika P_{rg} (MW), ukupne raspoložive snage izvora u sistemu koincidentnog sa maksimalnim opterećenjem i P_M(MW), maksimalnog opterećenja sistema.

❖ Ukupna raspoloživa snaga izvora sistema je uvek manja od sume maksimalnih snaga elektrana zbog pregleda, popravki (remonta) i kvarova (ispada). Kod hidroelektrana može da bude manja još i zbog nižih dotoka i stanja akumulacije.

- **Pokazatelj u LOLP metodi je matematičko očekivanje:**

$$E = \sum_i p_i t_i \tag{23}$$

- Ovde je p_i verovatnoća gubitka one snage izvora (P_{isp}) koji dovodi do gubitka opterećenja, odnosno, redukcije potrošnje.
- Vreme t_i je vreme trajanja gubitka opterećenja, kao na slici 14.
- Jedinica je E (dan/god) ili E (h/god).
- Da bi uopšte došlo do gubitka opterećenja potrošača, potrebno je da bude P_{isp}>R, odnosno i da se dogodi ispad i da on bude veći od rezerve.
- Ispadi manji od rezerve ne dovode do gubitka opterećenja i ne računaju se.

❖ Uobičajeno je da se problemi ovog tipa rešavaju tako što se formira kombinovana tabela događaja ispada, u koju se upisuju događaji ispada, njihove verovatnoće, kao i vreme.

stanje	P_{isp} *(MW)*	*p* *(1)*	*t* *(%)*	*pt* *(%)*
p^5	0	0,950991	-	-
$5p^4q$	40	0,048029	-	-
$10p^3q^2$	80	0,000970	41,67	0,040433
$10p^2q^3$	120	0,000010	83,33	0,000833
$5p\ q^4$	160	0,0	-	-
q^5	200	0,0	-	-
$(p+q)^5 = 1$		Σp=1,000000		Σpt=0,041266

$$E = \sum_i p_i t_i$$

→ E[dan/god] ili E [h/god]

- Vrednost matematičkog očekivanja za jedan elektroenergetski sistem usvaja se kao tolerantni nivo rizika, ili kriterijumski nivo gubitka opterećenja, E_{kr} .

- Ovde je E_{kr} samo mera adekvatnosti i ne daje odgovore na pitanja kada će se neki događaj desiti, koliki će biti ispad snage izvora, koliki će biti gubitak opterećenja i koliko će on trajati.

- LOLP metoda se često koristi zbog fleksibilnosti modela i obuhvatanja promene opterećenja (makar i na tako redukovan način kao što daje dijagram trajanja opterećenja i trajanja gubitka opterećenja).

- Na osnovu proračunatog (LOLP)-indeksa preko izraza (23) donosi se zaključak o **nivou pouzdanosti elektroenergetskog sistema.**

- Ako nivo pouzdanosti nije zadovoljavajući, moraju se u plan razvoja sistema dodavati novi proizvodni kapaciteti, čime se povećava rezerva generatorske snage, sve dok se ne ostvare željene performanse pouzdanosti elektroenergetskog sistema.

- Tipične ciljne vrednosti godišnjeg (LOLP)-indeksa koje se koriste pri planiranju razvoja proizvodnih kapaciteta su (shodno IEEE preporuci) u opsegu (0,1−1,0) dan/god, zavisno od zahtevane (ciljne) pouzdanosti rada elektroenergetskog sistema.

- Ako u sistemu postoji više tipova identičnih agregata, verovatnoća simultanih ispada (23) računa se za svaki tip posebno.

- Na primer, neka se raspolaže sa tri različita tipa agregata (j = A, B i C), čiji je ukupan broj mogućih kombinacija ispada n_A, n_B i n_C, respektivno, a pojedinačna raspoloživa snaga P_{grA}, P_{grB} i P_{grC} i verovatnoća pojave ispada q_A, q_B i q_C, respektivno.

- Verovatnoće pojave pojedinačnih ispada r_A, agregata tipa A, r_B agregata tipa B i r_C agregata tipa C i ukupne ispale snage su:

$$p(r_A) = \binom{n_A}{r_A} q_A^{r_A} p_A^{n_A - r_A}, \qquad \Delta P_g(r_A) = r_A P_{grA} \tag{24.a}$$

$$p(r_B) = \binom{n_B}{r_B} q_B^{r_B} p_B^{n_B - r_B}, \qquad \Delta P_g(r_B) = r_B P_{grB} \tag{24.b}$$

$$p(r_C) = \binom{n_C}{r_C} q_C^{r_C} p_C^{n_C - r_C}, \qquad \Delta P_g(r_C) = r_C P_{grC} \tag{24.c}$$

- Verovatnoća simultanog ispada r_A agregata tipa A i r_B agregata tipa B i ukupne ispale snage onda je:

$$\Delta P_g(r_A + r_B) = r_A P_{grA} + r_B P_{grB} \tag{25.a}$$

$$p(r_A + r_B) = p(r_A)\,p(r_B) \tag{25.b}$$

- Verovatnoća simultanog ispada r_A agregata tipa A, r_B agregata tipa B i r_C agregata tipa C, ukupne ispale snage (26.a) data je izrazom (26.b).
- Formule (25) i (26) daju verovatnoću simultane pojave dva i tri nezavisna događaja, kao proizvod njihovih individualnih verovatnoća pojava.

$$\Delta P_g(r_A + r_B + r_C) = r_A P_{grA} + r_B P_{grB} + r_C P_{grC} \tag{26.a}$$

$$p(r_A + r_B + r_C) = p(r_A)\,p(r_B)\,p(r_C) \tag{26.b}$$

❖ Moguća stanja sistema sa tri tipa agregata (A, B i C) navedena su u tabeli 6.

Tabela 6

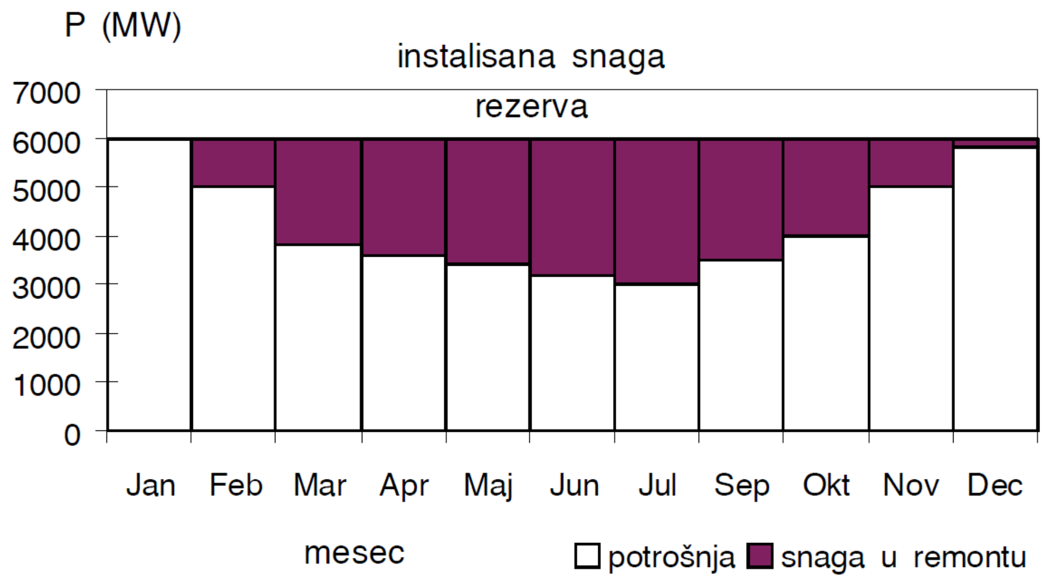
Stanje i	Status proizvodnog agregata A	B	C	Ispala snaga ΔP_{gi}	Verovatnoća pojave i-tog stanja
1	+	+	+	0	$(1-q_A)(1-q_B)(1-q_C)$
2	+	+	–	P_{grC}	$(1-q_A)(1-q_B)q_C$
3	+	–	+	P_{grB}	$(1-q_A)q_B(1-q_C)$
4	–	+	+	P_{grA}	$q_A(1-q_B)(1-q_C)$
5	+	–	–	$P_{grB}+P_{grC}$	$(1-q_A)q_Bq_C$
6	–	+	–	$P_{grA}+P_{grC}$	$q_A(1-q_B)q_C$
7	–	–	+	$P_{grA}+P_{grB}$	$q_Aq_B(1-q_C)$
8	–	–	–	$P_{grA}+P_{grB}+P_{grC}$	$q_Aq_Bq_C$
+ Agregat u pogonu – Agregat van pogona					Zbir: 1,00

❖ Pristup problemu planiranja remonta

- Planirani ispad ili remont u dugoročnom planiranju (2-30 godina) obično se analiziraju sa manje detalja nego u eksploataciji.
- **Elementi za odlučivanje u planiranju remonta su:**
  - godišnji dijagram opterećenja potrošača sistema
  - zahtevi svake generatorske jedinice u vezi sa remontom
  - proteklo vreme od poslednjeg planiranog remonta za svaku generatorsku jedinicu
  - veličina generatorske jedinice.

- Tipično za remonte je da imaju cikličnost.
- Glavna planirana isključenja kod termoelektrana sprovode se svakih 4 do 6 godina, kada se izvode veliki izvođački radovi, preventivno održavanje i popravke. Ova isključenja sa mreže mogu da traju i 5-10 nedelja.

❖ Problem remonta se rešava kroz ispunjenje cilja da rezerva u sistemu bude konstantna. To se najbolje postiže tako što se snaga generatora planirana za remont vidi kao dodata opterećenju potrošača (slika 15).

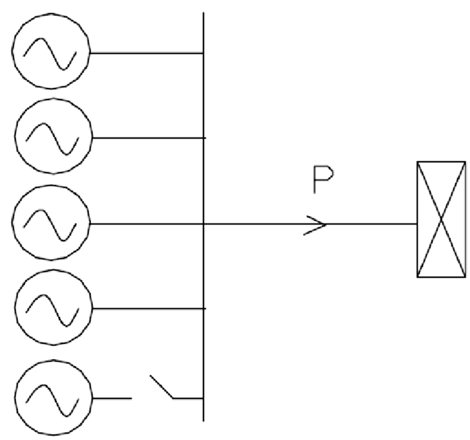


Sl. 15.

Dijagram na slici 15 sastavljen je od mesečnih maksimuma P_M.
Neka je P_{rem} mesečna snaga u remontu, a P_i instalisana snaga sistema (konstantna).
Izrazimo rezervu ovako:

$$R = (P_i - P_{rem}) - P_M = P_i - (P_{rem} + P_M) \qquad (27)$$

- Znači, treba i ($P_{rem} + P_M$) da bude konstantno, kao što je idealizovano na slici 15.
- Približni algoritam održavanja: pošto se generatori, kandidati za remont, poređaju po veličini, najveći generatori planiraju se za remont u mesecima sa najnižim maksimumom opterećenja, zatim na red dolaze srednji, da bi na kraju na red došle male jedinice.
- Do sada smo podrazumevali da u LOLP metodi model opterećenja važi tokom cele godine i da je generisanje sistema konstantno u toku godine.
- Model je pružao mogućnost da planiramo adekvatan rad sistema za događanje prinudnih ispada.
- LOLP metoda može da uključi i planirane ispade (remonte) u model.

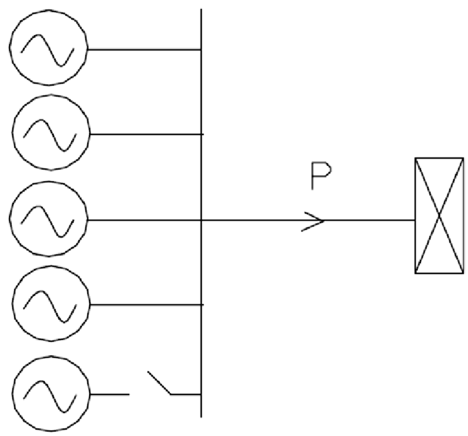


Sl. 16.a

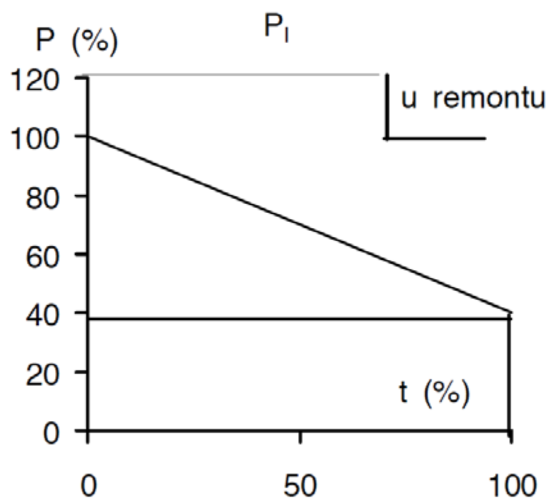
- Na primer, neka remont jednog generatora traje četvrtinu godine, u periodu nižeg opterećenja sistema.
- Planski ispadi (remonti) mogu da se modeluju u LOLP metodi tako, što se:

  1. "crta" raspoložive snage "spusti" za iznos snage u remontu sve dokle remont traje (Sl.16.b), ili

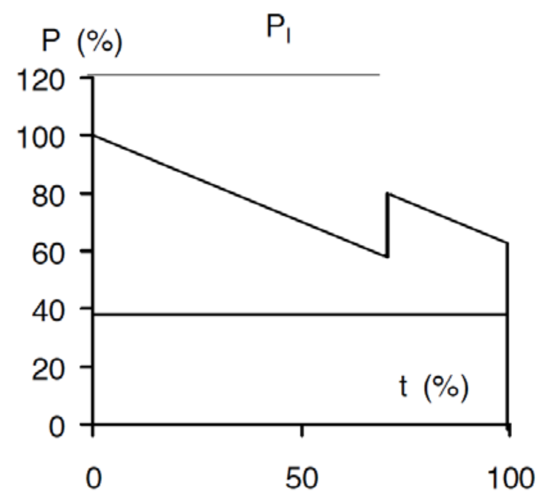
  2. "podigne" prava idealizovanog dijagrama trajanja opterećenja (Sl.16.c), što se svodi na isto.



Sl. 16.a



Sl. 16.b



Sl. 16.c

- **LOLP metoda u različitim uklopnim šemama sistema**
- Sabirnice su komponenta koja se ne modeluje kao poseban element u LOLP metodi, u smislu u kojem model elementa definišu njegova funkcija, snaga i pouzdanost.
- Sabirnice su samo čvor u kojem je zadovoljena jednačina bilansa tokova snaga.
- Konfiguracija mreže dobija na elastičnosti uvođenjem sabirničkih sistema.
- Sistemi sabirnica bitno utiču na sigurnost elektroenergetskih sistema, kao i na pouzdanost.
- Promenom konfiguracije u mreži sistema može da se "upravlja" i to onim što izgleda neupravljivo: mestom vezivanja generatora, vodova i transformatora.
- Tako može da se nađe "manje povrediva" konfiguracija u kojoj će mreža verovatno duže raditi bez ispada, odnosno, sa manjim očekivanjem ispada, u kojoj će biti manje gubitaka ili koja će da bude manje izložena opasnostima od naponskog kolapsa.

- Elastičnije projektovane šeme, koje imaju veće mogućnosti za promenu uklopnog stanja, skuplje su i njihova funkcija (u novije vreme) nije shvaćena samo kao rezerviranje u slučaju ispada, već i kao aktivna funkcija upravljanja pogonom sistema (rasterećenje, smanjenje gubitaka, izbegavanje naponskog kolapsa, povećanje sigurnosti).
- Pošto postoji veliki broj kombinacija uklopnog stanja, sigurno postoje neke kombinacije koje imaju povoljniji ishod, nego neke druge (heuristika).
- Treba generisati rešenja i pretražiti.
- Ovde, “generator rešenja” je LOLP metoda, a kriterijum adekvatnosti povezivanja - očekivani gubitak opterećenja.

❖ **(LOEP)-indeks pouzdanosti**

❖ Treba napomenuti da (LOLP)-indeks pouzdanosti daje samo očekivani broj dana (ili sati) pojave deficita generatorske snage u godini.

❖ Očekivana godišnje neisporučena električna energija potrošačima

(LOEP)-indeks [(LOEP) - "Loss of Energy Probability"], koji se na godišnjem nivou definiše kao:

$$(LOEP) = \sum_i p_i (LOE)_i \tag{28}$$

gde je p_i verovatnoća ispada generatorskih kapaciteta koji dovodi do neisporučene energije $(LOE)_i$.

❖ Kao što se vidi iz jedn. (28) godišnji (LOEP)-indeks izražava se u [r.j./god], što znači da je očekivana vrednost godišnje neisporučene energije (LOE) relativizovana u odnosu na ukupnu godišnje isporučenu električnu energiju potrošačima sistema.