

## 1. Анализа стабла неисправности (АСН)

АСН идентификује, моделира и процењује везе између догађаја које воде до: отказа, нежељених догађаја (стања) или непланираних догађаја (стања). Методологија АСН је дефинисана, структурирана и стриктна; лака је за савладавање, извођење и праћење. АСН може бити скупа и временски захтевна, због чега треба увек упоредити трошкове спровођења анализе са трошковима које изазивју нежељени догађаји.

АСН је дедуктивна метода у којој се прво дефинише нежељени догађај тзв. вршни догађај (Top event), а затим се анализира утицај понашања појединих компоненти система на његово појављивање. Анализа се ослања на дијаграм, стабло неисправности-СН (*Fault tree*), који симболички описује логичке релације између догађаја. Најчешћи кораци анализе су следећи:

- Дефинисање система, нежељеног догађаја (отказа) система и услова отказа.
- Конструкција стабла неисправности.
- Квалитативна анализа стабла неисправности.
- Квантитативна анализа стабла неисправности.

### 1.1. Дефинисање система, нежељеног догађаја система и услова отказа

На почетку примене АСН мора се добро упознати систем. Због тога је често почетна тачка постојећа FMEA и блок дијаграм који обезбеђују боље разумевање система. Након тога, потребно је одредити границе у оквиру којих се врши анализа:

- Физичке границе система: који делови система су укључени у анализу а који се могу занемарити;
- Почетни услови: у ком се стању систем налази када се деси посматрани нежељени догађај;
- Спољашњи утицаји: који типови спољашњих утицаја треба да буду укључени у анализу (ратни услови, саботажа, земљотрес, нестанак електричне енергије итд.);
- Ниво детаљности: колико детаљна треба да буде анализа.

Као што је већ поменуто, АСН је дедуктивна анализа која се фокусира на одређени нежељени догађај система и утврђује његове узроке. Под догађајем се подразумева динамичка промена стања која се дешава у систему или елементу система. Са аспекта АСН, значајна су три нивоа догађаја:

- Вршни догађај -нежељени догађај система.
- Посредни догађај – догађај који се дешава као последица једног или више догађаја. То је догађај неисправности који се дешава зато што су један или више претходних догађаја активирали логичко коло.
- Примарни догађај - догађај који се даље не разлаже и представља границу редуције система.

Избор вршног догађаја је важан за успех анализе: уколико је сувише општи анализа постаје преобимна и тешко сагледива; ако је сувише специфичан анализа не обезбеђује довољно добар поглед на систем. Дефиниција вршног догађаја треба да да одговоре на питања: шта се десило, где и када. Након тога, приступом одозго-на-доле, утврђује се како одређени нежељени догађаји у вези елемената система (подсистеми, делови, компоненте) утичу на вршни догађај.

Приликом одређивања нежељених догађаја могуће је дефинисати два појма:

- Отказ (*failure*) – квар система или његових елемената изражена кроз одступање од планиране функције или понашања или кроз немогућност система, подсистема или компоненте да обаве потребну функцију. Степен отказа система или компоненте може бити различит: не ради у потребном тренутку, ради повремено, не престаје са радом у потребном тренутку, недостатак потребног излаза, промењен излаз или смањен оперативни капацитет.
- Неисправност (*fault*) – нежељено стање система или његових делова узроковано: 1) присуством неодговарајућих команди или одсуством одговарајућих, или 2) отказом. Сваки отказ изазива неисправност али није свака неисправност и изазвана отказом (систем који је искључен из безбедносних разлога није отказао). Неисправност је општи термин које се може рангирати од минорног дефекта до отказа.






Упоредо са догађајима (неисправностима) у систему, утврђују се и логичке везе између њих и последице њиховог појављивања.

## 1.2. Конструкција стабла неисправности.







Стабло неисправности (СН) је модел који графички и логички представља комбинације догађаја које могу довести до неисправности система. Конструкција СН се врши одозго на доле, од вршног догађаја до његових узрока и тако редом до примарних догађаја. У конструкцији стабла се полази од претпоставке да су догађаји бинарни, статистички независни и да везе између њих могу да се представе логичким операцијама (колима).

СН садржи две врсте симбола: догађаја и логичких кола (Табеле 1 и 2).

Табела 1. Симболи догађаја СН

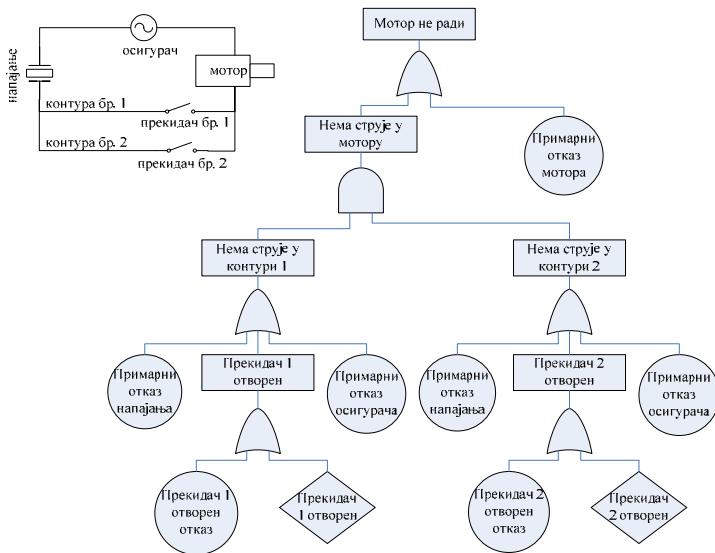
Симбол	Значење симбола	
	Базични догађај – базична иницирајућа неисправност која не захтева даље развијање	Примарни догађаји
	Неразвијени догађај - догађај који није даље развијен или зато што то не би имало нарочит значај или зато што не постоји расположива информација.	
	Специфични услови или рестрикције које се могу применити на било које логичко коли (првенствено Приоритетно И и инхибиторско коло).	
	Спољашњи догађај (тригер) - догађај који се нормално очекује да ће се десити због пројекта и услова рада.	
	Посредни догађај	

Табела 2. Симболи логичких кола СН

Назив кола	Симбол кола	Значење симбола
И		Неисправност на излазу ће се десити ако се десе све улазне неисправности.
ИЛИ		Неисправност на излазу ће се десити ако се деси бар једна улазна неисправност.
Приоритетно И		Неисправност на излазу ће се десити ако се све улазне неисправности десе у специфицираној секвенци.
Ексклузивно ИЛИ		Неисправност на излазу ће се десити ако се деси тачно једна улазна неисправност.
$m$ од $n$		Неисправност на излазу ће се десити ако се деси $m$ од $n$ улазних неисправности.
Инхибиторско коло		Неисправност на излазу ће се десити само ако се деси улазна неисправност и условни догађај.

Поред наведених стандардних симбола, користе се и симболи за трансфер, а за специфичне употребе АСН увођене су различите врсте специјалних симбола.

На слици 1 је приказано електрично коло у коме је потребно анализирати вршни догађај “Мотор не ради” и одговарајуће стабло неисправности.

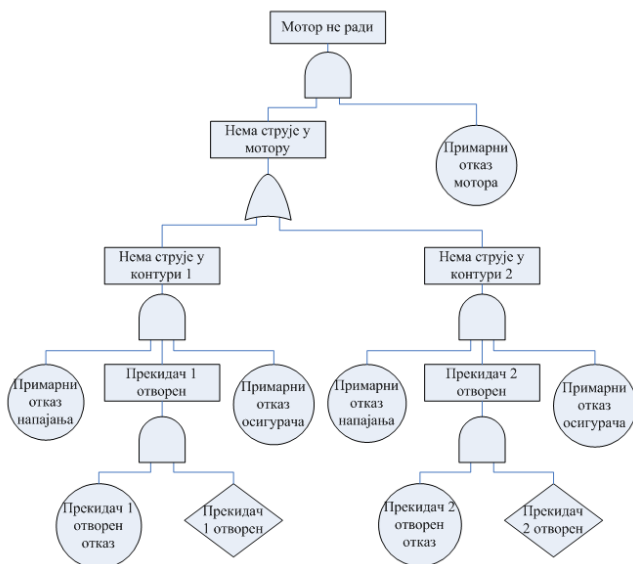


Слика 1. Стабло неисправности за вршни догађај “Мотор не ради”

Уколико СН садржи само И и ИЛИ кола и примарне догађаје без њихових негација, назива се кохерентно СН. Кохерентним СН се моделирају кохерентни системи. То су системи у којима не постоје компоненте чије стање не утиче на стање система и у којима је структурна функција неопадајућа.

СН са вишеструким догађајима је оно у коме се поједини догађаји вишеструко појављују (*Multiple Occurring Event* – МОЕ). Овакви догађаји се називају још и редувантни или поновљени. У СН са слике 1, догађаји “Примарни отказ напајања” и “Примарни отказ осигурача” су вишеструки.

Кохерентном СН (прималном СН – ПСН) се може придружити дуално СН (ДСН). Дуално СН има исте догађаје као почетно СН а свако логичко коло И је замењено логичким колом ИЛИ и обрнуто. На слици 2 приказано је ДСН за СН са слике 1.



Слика 2. Дуално СН стабла неисправности са слике 1

### 1.3. Квалитативна анализа стабла неисправности.

Квалитативна анализа СН је широк појам који подразумева одређивање минималних скупова пресека, минималних скупова путева и различите врсте њиховог рангирања и анализа.

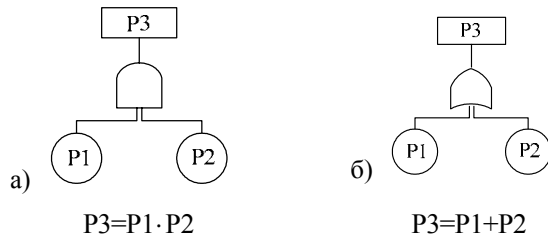
Први задатак квалитативне анализе СН је добијање минималних скупова пресека (минипресека, МСП) (*Minimum cut sets*). Скуп пресека је скуп примарних догађаја чије (истовремено) појављивање доводи до вршног догађаја. Минимални скуп пресека МСП је скуп пресека који се не може редукovati без губљења статуса скупа

пресека. Уколико се било који од догађаја, из минималног скупа пресека, не догоди, тада се неће десити вршни догађај.

МСП представљају основу за квалитативну и квантитативну анализу СН. Постоји велики број алгоритама за њихово одређивање за различите врсте СН. Најпознатији алгоритми за кохерентна СН су: алгоритам заснован на Буловој алгебри (који се још назива и Булова редукција) и MOCUS алгоритам.

- Булова редукција

Овај алгоритам се може применити и за одређивање МСП некохерентних СН а ослања се на аксиоме и законе Булове алгебре. Сваком логичком колу се може придружити једна Булова једначина. С обзиром да разматрамо само кохерентна СН, овде ће бити приказане Булове једначине за И и ИЛИ коло (слика 3. а и б).



Слика 3. И и ИЛИ логичко коло

У општем случају, када логичко коло И има  $n$  улазних грана из чворова  $P_1 + P_2 + \dots + P_n$ , посредни догађај  $P$  који је излаз из тог логичког кола се може изразити као:

$$P = \prod_{i=1}^n P_i . \tag{1}$$

Ако логичко коло ИЛИ има  $n$  улазних грана из чворова  $P_1 + P_2 + \dots + P_n$ , посредни догађај  $P$  који је излаз из тог логичког кола се може изразити као:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i . \tag{2}$$

Када се Булова редукција користи за одређивање кохерентних СН довољне су следеће Булове аксиоме и закони:

- а) Комутативност:
  - $P \cdot Q = Q \cdot P$
  - $P + Q = Q + P$
- б) Асоцијативност:
  - $P \cdot (Q \cdot R) = (P \cdot Q) \cdot R$
  - $P + (Q + R) = (P + Q) + R$
- в) Дистрибутивност:
  - $P \cdot (Q + R) = (P \cdot Q) + (P \cdot R)$
  - $P + (Q \cdot R) = (P + Q) \cdot (P + R)$
- г) Закон идемпотенције:
  - $P \cdot P = P$
  - $P + P = P$
- д) Закон апсорпције:
  - $P + (P \cdot Q) = P$
  - $P \cdot (P + Q) = P$

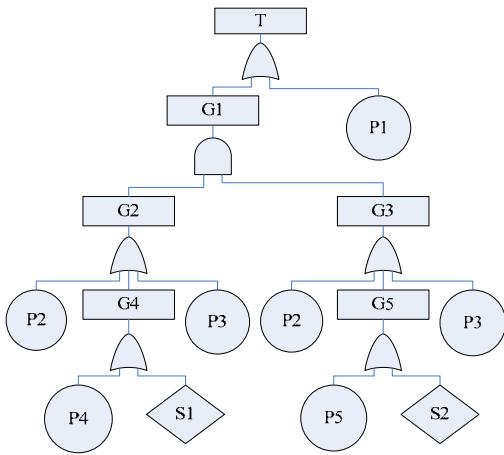
Уобичајено је да се, пре примене алгоритма, догађаји у СН се обележе Буловим променљивама:

- $T$  - вршни догађај (*top event*),
- $G_i$  - посредни догађаји (*gates*),
- $P_n$  и  $S_m$  - примарни догађаји (*primary and secondary events*).

Алгоритам Булове редукције:

1. Написати Булове једначине за свако логичко коло. Сваком колу одговара једна једначина типа (1) или (2).
2. Вршити замену променљивих њиховим изразима док се не добије вршни догађај као функција само базичних догађаја. Притом се користе комутативни, асоцијативни и дистрибутивни закони Булове алгебре.
3. Извршити редукцију применом закона Булове алгебре. За кохерентна СН довољно је користити закон идемпотенције и закон апсорпције.

На слици 4 је приказано СН са слике 1 са догађајима означеним Буловим променљивама. У наставку ће бити илустрована Булова редукција за дато СН



Слика 4. СН са слике 1 означено Буловим променљивама

1.  $T = P_1 + G_1$   
 $G_1 = G_2 \cdot G_3$   
 $G_2 = P_2 + G_4 + P_3$   
 $G_3 = P_2 + G_5 + P_3$   
 $G_4 = P_4 + S_1$   
 $G_5 = P_5 + S_2$
2.  $G_3 = P_2 + G_5 + P_3 \Rightarrow G_3 = P_2 + (P_5 + S_2) + P_3$   
 $G_5 = P_5 + S_2$   
 $G_2 = P_2 + G_4 + P_3 \Rightarrow G_2 = P_2 + (P_4 + S_1) + P_3$   
 $G_4 = P_4 + S_1$   
 $G_1 = G_2 \cdot G_3 \Rightarrow G_1 = (P_2 + P_5 + S_2 + P_3) \cdot (P_2 + P_4 + S_1 + P_3)$   
 $T = P_1 + G_1 \Rightarrow T = P_1 + P_2 \cdot P_2 + P_2 \cdot P_4 + P_2 \cdot S_1 + P_2 \cdot P_3 + P_5 \cdot P_2 + P_5 \cdot P_4 + P_5 \cdot S_1 + P_5 \cdot P_3$   
 $+ S_2 \cdot P_2 + S_2 \cdot P_4 + S_2 \cdot S_1 + S_2 \cdot P_3 + P_3 \cdot P_2 + P_3 \cdot P_4 + P_3 \cdot S_1 + P_3 \cdot P_3$
3.  $T = P_1 + P_2 + P_3 + P_5 \cdot P_4 + P_5 \cdot S_1 + S_2 \cdot P_4 + S_2 \cdot S_1$

Код кохерентних СН са вишеструким догађајима, резултат корака 2 су сви скупови пресека а корака 3 сви МСП датог СН. Уколико у СН нема вишеструких догађаја, МСП се добијају већ након корака 2.

- **Рангирање минипресека и примарних догађаја**

Поред одређивања минипресека, квалитативна анализа обухвата и њихово рангирање по значају као и рангирање примарних догађаја. Минипресеци се рангирају на основу броја примарних догађаја из којих се састоје. Ако је  $k$  број примарних догађаја у минипресеку, за минипрсек се каже да је реда  $k$ . С обзиром да су примарни догађаји независни, вероватноћа да ће се десити истовремено једнака је производу њихових вероватноћа. Због тога су минипресеци мањег реда већег значаја (вишег ранга). У табели 1 је дата листа и опис свих МСП СН са слике 1 и 4.

Табела 1. Минипресеци за СН са слике 1

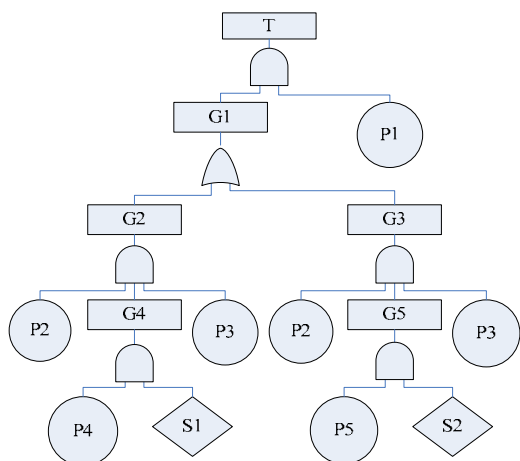
ранг	МСП	Опис
1	$P_1$	Примарни отказ мотора
2	$P_2$	Примарни отказ напајања
3	$P_3$	Примарни отказ осигурача
4	$P_5 P_4$	Отказ оба прекидача
5	$P_5 S_1$	Отворен прекидач 1 и отказ прекидача 2
6	$S_2 P_4$	Отворен прекидач 2 и отказ прекидача 1
7	$S_2 S_1$	Отворена оба прекидача

Значај примарних догађаја се утврђује на основу броја њиховог појављивања у различитим минипресецима.

- **Одређивање минипутева**

Минимални скупови путева (минипутеви, МП) (*Minimum path sets*) су дуални (комплементни) скупови МСП. Скупови путева представљају скуп примарних догађаја чије неодигравање гарантује да се неће десити ни вршни догађај. МП су скупови путева који се не могу редуковати без губљења статуса скупа путева. Ако се ниједан од догађаја из минипута не деси, неће се десити ни вршни догађај.

Један од начина за одређивање МП је преко дуалног СН. Минипресеци ДСН су минипутеви полазног (прималног) СН [Vesely,1982]. На слици 5 је приказано ДСН са слике 2, означено Буловим променљивама.



Слика 5. ДСН стабла неисправности са слике 2

Применом Булове редукције на ДСН, добијају се минипутеви почетног СН (Табела 2):

Табела 2: Минипутеви СН са слике 2

МП	Опис
$P_1 P_2 P_3 P_4 S_1$	Примарни отказ мотора, примарни отказ напајања, примарни отказ осигурача, отказ прекидача 1 и отворен прекидач 1
$P_1 P_2 P_3 P_5 S_2$	Примарни отказ мотора, примарни отказ напајања, примарни отказ осигурача, отказ прекидача 1 и отворен прекидач 1

На основу табеле се може закључити да до нежељеног догађаја “Мотор не ради” неће доћи ако се неди ни један од догађаја из прве врсте или ни један од догађаја из друге врсте.

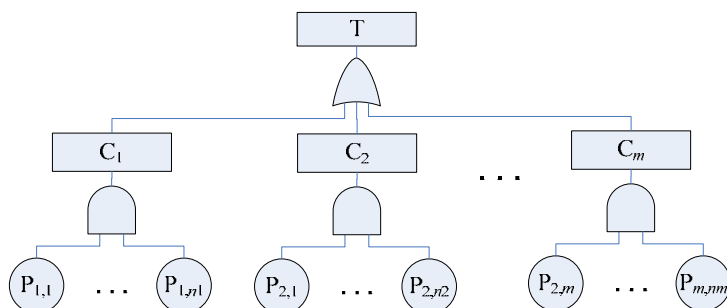
#### 1.4. Квантитативна анализа стабла неисправности.

Квалитативна анализа СН се састоји у одређивању вероватноће нежељеног догађаја на основу минипресека и мера значајности примарних догађаја. За квалитативну анализу великих СН неопходна је примена рачунара а у њеном спровођењу су могућа два приступа: аналитички и симулација [Ericson,2005]. С обзиром да је акценат ове дисертације на одређивању МСП, овде ће бити само укратко изложени основни појмови и методе квантитативне анализе СН. Вероватноћа вршног догађаја се аналитички може одредити на два начина (у оба случаја су неопходне информације о вероватноћама свих примарних догађаја):

1. Одређивање вероватноће вршног догађаја на основу вероватноћа МСП се заснива на представљању вршног догађаја као уније МСП. МСП се могу представити као пресек својих примарних догађаја, односно:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \{P_{1,1}, P_{1,2}, \dots, P_{1,n_1}\} = \left\{ \bigcap_{j=1}^{n_1} P_{1,j} \right\}, \\
 C_2 &= \{P_{2,1}, P_{2,2}, \dots, P_{2,n_2}\} = \left\{ \bigcap_{j=1}^{n_2} P_{2,j} \right\}, \\
 &\vdots \\
 C_m &= \{P_{m,1}, P_{m,2}, \dots, P_{m,n_m}\} = \left\{ \bigcap_{j=1}^{n_m} P_{m,j} \right\},
 \end{aligned} \tag{3}$$

где је  $P_{ij}$   $i$ -ти примарни догађај у  $j$ -том МСП  $C_j$ . Вршни догађај СН може бити приказан као на слици 6.



Слика 6. МСП приказ стабла неисправности

Вршни догађај Т ће се десити ако се деси бар један од МСП, тј.

$$\{T\} = \left\{ \bigcup_{i=1}^m C_i \right\}, \quad (4)$$

Сада се вероватноћа одигравања вршног догађаја може израчунати на следећи начин:

$$P\{T\} = P\left\{ \bigcup_{i=1}^m C_i \right\} = \sum_{i=1}^m P(C_i) - \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m P(C_i \cap C_j) + \sum_{i=1}^{m-2} \sum_{j=i+1}^{m-1} \sum_{k=j+1}^m P(C_i \cap C_j \cap C_k) + \dots + (-1)^{m-1} P\left( \bigcap_{i=1}^m C_i \right) \quad (5)$$

Када су вероватноће примарних догађаја мале, вероватноћа вршног догађаја се може апроксимирати сумом вероватноћа минипресека. Добијена вредност се најчешће користи као горња граница вероватноће вршног догађаја.

- Одређивање вероватноће вршног догађаја на основу структурне функције СН [Dimitri, 2002]. На основу вероватноћа примарних догађаја и логичких кола се идући уз СН одређују вероватноће посредних догађаја све док се не стигне до вршног догађаја. За кохерентна СН користе се само изрази за одређивање вероватноће у случају И и ИЛИ везе између догађаја [Крчевић, 2004].

## Мере значајности

Мере значајности (релативне и апсолутне) су један од најважнијих резултата АСН. Њима се може утврђивати значај свих догађаја у СН (примарних и посредних) и њихов допринос вероватноћи вршног догађаја, као и остелјивост вероватноће вршног догађаја на повећање или смањење вероватноће било ког догађаја у СН. На основу анализе мера значајности могу се доносити одлуке о расподели ресурса за тестирање, одржавање, контролу итд. да би се смањила вероватноћа вршног догађаја. Најчешће коришћене мере значајности су:

*Fussell-Vesely (F-V) Importance* (релативна и апсолутна) - утврђује допринос свих догађаја у СН вероватноћи вршног догађаја, што даље омогућује њихово рангирање. F-V значајност се рачуна сумирањем свих минипресека који садрже посматрани догађај.

*Risk Reduction Worth (RRW)* - утврђује колико се смањује вероватноћа вршног догађаја ако се осигура не одигравање посматраног догађаја на нижем нивоу СН. Ова мера је се обично одређује постављањем да је вероватноћа посматраног догађаја једнака 0 и поновним рачунањем вероватноће вршног догађаја.

*Risk Achievement Worth (RAW)* - утврђује колико се повећава вероватноћа вршног догађаја ако се осигура одигравање посматраног догађаја на нижем нивоу СН. RAW мера указује на догађаје чија је превенција најважнија. Одређује се, слично претходној, постављањем да је вероватноћа посматраног догађаја једнака 1 и поновним рачунањем вероватноће вршног догађаја.

*Birnbaum's Importance Measure (BM)* – утврђује утицај промене вероватноће догађаја на нижем нивоу у СН на промену вероватноће вршног догађаја. Ова мера обједињује претходне две мере а када су све три мере апсолутне, може се израчунати као њихов збир:  $BM = RAW + RRW$ .