

Metoda binarnih dijagrama odlučivanja za vrednovanje stabla kvara u nuklearnoj elektrani.

Banov, Reni

Doctoral thesis / Disertacija

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:272546>

Rights / Prava: [In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)





Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Reni Banov

**METODA BINARNIH DIJAGRAMA
ODLUČIVANJA ZA VREDNOVANJE
STABLA KVARA U NUKLEARNOJ
ELEKTRANI**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2020.



Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Reni Banov

**METODA BINARNIH DIJAGRAMA
ODLUČIVANJA ZA VREDNOVANJE
STABLA KVARA U NUKLEARNOJ
ELEKTRANI**

DOKTORSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Zdenko Šimić

Zagreb, 2020.



University of Zagreb

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMPUTING

Reni Banov

**BINARY DECISION DIAGRAM METHOD
FOR FAULT TREE EVALUATION IN
NUCLEAR POWER PLANT**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Associate Professor Zdenko Šimić, PhD

Zagreb, 2020

Doktorski rad izrađen je na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva,
na Zavodu za visoki napon i energetiku

Mentor: izv. prof. dr. sc. Zdenko Šimić

Doktorski rad ima: 197 stranica

Doktorski rad br.: _____

O mentoru

Zdenko Šimić rođen je u Osijeku 1964. godine. Diplomirao je, magistrirao i doktorirao u polju elektrotehnike na Sveučilištu u Zagrebu, Fakultetu elektrotehnike i računarstva (FER), 1988., 1994. odnosno 2001. godine, redom.

Od veljače 1989. do kolovoza 2015. godine radi na Zavodu za visoki napon i energetiku pri FER-u. Višegodišnju specijalizaciju stječe u SAD-u (od 1995. i 2001. godine). Izabran je 2010. godine u zvanje izvanrednog, a 2017. godine u zvanje redovitog profesora.

Sudjelovao je na pet znanstvenih projekata Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske kao i na pet međunarodnih projekata. Obnašao je dužnost voditelja istraživačkog projekta: “Designing Intelligent, Resilient, Scalable and Secure Next Generation SCADA Infrastructure” financiran unutar NATO programa Science for Peace. U svojstvu gosta znanstvenika, boravi dvije godine (od 2012.g.), u zajedničkom istraživačkom centru EC JRC u Nizozemskoj gdje trenutno radi kao istraživač od 2015. godine. Održao je tri predavanja kao istaknuti IEEE PES predavač. Objavio je više od 100 znanstvenih i stručnih radova u časopisima i zbornicima konferencija iz područja pouzdanosti, rizika, nuklearne energije i obnovljivih izvora energije. Sudjelovao je u izradi i vođenju projekata za HEP, Končar te Krško i nekoliko drugih nuklearnih elektrana. Sudjeluje u radu ESReDA, OECD NEA i IAEA stručnih radnih grupa.

Prof. Šimić član je SRA, IEEE, ENS i CIGRE stručnih udruga. Pridruženi je član HATZ i član je Znanstvenog vijeća za naftno-plinsko gospodarstvo i energetiku pri HAZU. Sudjelovao je u devet međunarodnih programskih odbora znanstvenih konferencija i recenzent je u pet međunarodnih časopisa. Bio je član IEEE NPEC-a i predsjednik Hrvatskog nuklearnog društva. Primio je nagradu za izniman doprinos Hrvatskoj sekciji IEEE za 2010. godinu.

About the Supervisor

Zdenko Šimić was born in Osijek in 1964. He received B.Sc., M.Sc. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER), Zagreb, Croatia, in 1988, 1994 and 2001, respectively.

From February 1989 till August 2015 he was employed at the Department of Power and Energy Systems at FER. He was specializing in the USA (from 1995 and 2001). In 2010 he was promoted to Associate and in 2017 to Full Professor.

He has participated in five scientific projects financed by the Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia as well as in five international projects. He was project leader of the research project: “Designing Intelligent, Resilient, Scalable and Secure Next Generation SCADA Infrastructure” financed by the NATO Science for Peace. He was a visiting scientist for two years (from 2012) at the European Commission Joint Research Centre (EC JRC) in the Netherlands, where he has been working as senior scientist since 2015. He has presented three international lectures as IEEE distinguished lecturer in Norway, Bosnia and Herzegovina and Turkey. He published more than 100 scientific and professional papers in journals and conference proceedings in the area of reliability, risk, nuclear and renewable energy sources. He participated and lead a number of projects for HEP, Končar, Krško and several other nuclear power plants. He regularly participates as expert in various working groups with several international organizations (ESReDA, OECD NEA and IAEA).

Prof. Šimić is a member of SRA, IEEE, ENS and CIGRE societies. He is an associated member of HATZ and member of the HAZU Scientific council for oil, gas and energy. He has participated in nine conferences international programs committees. He is engaged as reviewer for five international journals. He was a member of IEEE NPEC and president of the Croatian Nuclear Society. In 2010 he obtained the Croatian IEEE PES award for an outstanding contribution.

Ova disertacija nastala je kao rezultat mog istraživačkog i znanstvenog rada, kojemu sam posvetio dugi niz godina. Na tom putu, sam imao priliku upoznati i komunicirati s brojnim stručnjacima i znanjcima, te se ovim putem zahvaljujem na njihovom poticajnom doprinosu. Osobito zahvaljujem svom mentoru prof. dr. Zdenku Šimiću na brojnim sugestijama kao i prijateljskoj podršci tijekom izrade i obrane ove doktorske disertacije. Zahvaljujem prof. dr. Davoru Grgiću na potpori i poticaju mojem znanstvenom radu u izabranom području. Mojim voljenj supruzi i djeci zahvaljujem na strpljenju i neizmjernoj podršci u svakom pogledu.

Sažetak

U radu se istražuje način vrednovanja stabla kvara te stabla događaja u nuklearnoj energetici primjenom metode binarnih dijagrama odlučivanja. Polazište istraživanja predstavlja model stabla kvara za analizu neželjenih događaja tijekom eksploatacije nuklearne elektrane. Primjenom modela stabla kvara opisuje se korelacija između osnovnih događaja koja uzrokuje pojavu neželjenog događaja. Hijerarhijski uspostavljeni odnosi između osnovnih i izvedenih događaja u sustavu predstavljaju logičke veze između događaja te se mogu predstaviti pomoću binarnih dijagrama odlučivanja (skr. BDD¹). Postupak vrednovanja stabla kvara ostvaruje se provođenjem kvalitativne i kvantitativne analize modela na BDD zapisu stabla kvara. Međutim, kompleksnost algoritama primijenjenih na BDD zapise proizlazi iz problema izbora redoslijeda osnovnih događaja za formiranje BDD zapisa Boole-Shannonovim razvojem. Složenost problema zahtijeva heuristički pristup, te je shodno tome razvijen algoritam za određivanje redoslijeda varijabli pomoću kojega je moguće vrednovati model stabla kvara s više od 1000 osnovnih događaja u modelu.

Osim navedenog problema redoslijeda, u radu je unaprijeđen postupak vrednovanja primjenom kompletnog proračuna pomoću BDD zapisa. Budući, BDD zapis omogućava formiranje potpunog skupa minimalnih presjeka modela otvara se mogućnost povećanja točnosti određivanja parametara pouzdanosti te unapređenja kvalitativne analize. Primjerice, otvara se mogućnost određivanja funkcionalne zavisnosti neželjenog vršnog događaja u odnosu na pojavu pojedinačnih osnovnih događaja u modelu stabla kvara. Također, točno određivanje parametara pouzdanosti umanjuje važnost izbora metode za ocjenu gornje ograde za vjerojatnost pojave vršnog (ili drugog) događaja. Neovisno o tome, u radu su izložena dva nova algoritma za određivanje gornjih ograda iz skupa minimalnih presjeka, te za određivanje uvjetne vjerojatnosti na BDD zapisu modela stabla kvara. Za unapređenje kvalitativne analize u postupku vrednovanja razvijen je algoritam za odabir podskupa MCS skupa navođenjem predikata za izbor željenih minimalnih presjeka. Na taj način omogućen je fleksibilniji izbor minimalnih presjeka usporedbi s konvencionalnim pristupom gdje se selekcija obično provodi prema broju osnovnih događaja ili prema vjerojatnosti iz minimalnog presjeka.

Verifikacija te potvrda postupka vrednovanja pomoću BDD zapisa modela stabla kvara ostvarena je implementacijom programskog rješenja za sve prezentirane algoritme. Također, dobiveni rezultati vrednovanja potvrđeni su usporedbom s implementacijom konvencionalnog pristupa iz priznatih programskih rješenja.

Ključne riječi: binarni dijagram odlučivanja, redoslijed varijabli, stablo kvara, vjerojatnosna procjena pouzdanosti, pouzdanost nuklearne elektrane

¹eng. **B**inary **D**ecision **D**igram

Abstract

A nuclear power plant sets the example of a most complex technical system in which nuclear technology is applied to generate electricity. The complexity of the nuclear power plant system reflects not only during its construction, but also during the operation in functional maintenance processes, as in accordance with the highest safety requirements. Complex nuclear power plant systems are usually perceived as a regulated whole of elements divided into smaller subsystems and separate components. Commonly, the structural organization is hierarchically complex due to numerous functional bonds between the subsystems and components. The hierarchical sequence of elements of the nuclear power plant system is observed at a functional level for the purpose of performing the intended functions during operation, which we call the holistic approach.

An elimination of errors in the design or during the exploitation of a complex technical system, such as a nuclear power plant, requires large human and financial resources. The emergence of incidents in a complex nuclear power plant system often demands significant financial funds, human resources as well as time duration in order to find the causes and remove consequences. Therefore, prediction, early detection as well as prevention of incidents are extremely important throughout the life cycle of a nuclear power plant. Activities performed throughout the lifecycle are closely linked to the reliability analysis of the system and are most often carried out by assessing the risks in the nuclear power plant's system and its subsystems.

One of the questions, raised during the exploitation of a nuclear power plant is the reliability of system elements to meet the highest safety requirements. Meaning, that at the level of the hierarchical organisation it is necessary to determine the probability of operation within time-frames, in the expected manner and under strictly defined operating conditions for all elements of the nuclear power plant system. The problem of determining the probability of system operation is addressed by the reliability theory, and the aim of this work is, by applying the law of the reliability theory, to improve the fault tree method for qualitative and quantitative reliability assessment of the nuclear power plant system. In order for the law of the reliability theory to be applied, the nuclear power plant system must be formally described at the abstract level of the model and it is necessary to provide an unambiguous mapping between the records.

The description of the nuclear power plant system is based on the determination of the

structural function of the system indicating a functional connection between the constituent elements (subsystems, components). By observing the simple status {*work, does not work*} on structural function elements of the system and by associating probability with these events, we introduce an elementary link to the theory of reliability, in other words, we define a probabilistic model of the functioning of the nuclear power plant system. It should be noted that this approach is not restricted to the nuclear power plant system, but is applicable on other technical systems as well.

The main task of the reliability analysis of a nuclear power plant system is the risk assessment of the entire system and of its most significant subsystems. One most relevant approach for accomplishing this task is to build a fault tree model to describe undesirable events in the system and subsystems. A fundamental activity in the application of the fault tree method is the decomposition of the top event into simpler events to a selected level, where no further analysis is required. Terminating events that are considered indivisible are called basic events and are usually associated with failures of the basic system components.

The fault state of a basic component is described with a simple logical variable. The possibility of one component to transit from an operational state to a fault state is measured by assigning the transition probability. On such a defined, meanwhile, probabilistic model two types of analysis are carried out:

Quantitative analysis - calculation of the probability of a top event by defining a function on probabilities of basic events and determining probabilistic parameters (measures of importance) for system components,

Qualitative analysis - determining the minimum sets of basic events and their properties leading to a top event.

It is namely known, that for the success of the application of software solutions on a complex fault tree model, it is necessary, either to reduce accuracy, which can be unacceptable for critical systems, or to significantly simplify the model to the level of detail, which allows to carry out more precise calculations. The complexity of the fault tree model basically stems from the complexity of the representation of the logical model represented by the fault tree. Different conventional techniques of representation of logical functions do not necessarily meet the requirements for the presentation of the fault tree model.

More recently, binary decision diagrams (BDDs) have gained more popularity in various engineering disciplines. The structure of binary decision diagrams proves to be extremely effective in presenting logical functions that contain sub-function sharing, i.e. sub-functions used multiple times in the logical function definition. However, the usability of BDD-based tools in reliability analysis is directly related to the size of the BDD representation. Determining the optimal size of BDD representations falls into the category of the most difficult problems and has intensively been approached with approximate procedures that do not have to provide opti-

mal solutions. Since the size of the BDD representation for the fault tree model is determined by the order of the basic events from which the model is formed, the problem is attempted to be solved suboptimally by applying heuristic methods. Thereby, this doctoral dissertation brings a new heuristic method for determining the order of basic events, while its purposefulness and applicability have been verified on realistic examples of the fault tree from the model of the nuclear power plant Krško. In simple words, the main thesis herein leans in finding an effective BDD representation for the fault tree model by which we can carry out exact analyses without diminishing accuracy and without reducing the model on realistic examples from the nuclear power plant.

Due to the complexity of the problem, results from different fields of applied sciences have been used. For the purpose of verifying and confirming the applicability of the developed algorithms, it is necessary to use results of the mathematical apparatus from several branches:

- Complexity theory for analyzing the complexities of developed or used algorithms
- Mathematical logic for connecting logical functions with fault tree models
- Probability theory for establishing basic relationships in the evaluation process of the fault tree

Beside the mathematical apparatus, the results from the theory of reliability establish a connection with formal models of complex systems. Mostly important is the linking of the system model to results from the probability theory on reliability models of complex systems. Further, the concept of logical function and its interpretation on the system model in form of minimal path and cut sets represents an important role.

The basic tool for evaluating the system model in nuclear power plants is the fault tree, and the question of the complexity of its analysis (qualitative and/or quantitative) is associated with the complexity of the representation of logical functions using the BDD. In the chapter dedicated to the BDD representation, basic features of BDD representations were introduced by structure of the directed graph with two terminal nodes. The uniqueness property of BDD representation (canonical forms) for logical functions has been shown herein, as well as, in respect of the canonical forms, how the complexity of logical operations on a BDD representation depends on the number of nodes in the graph structure. Further to the basic logical operations of BDD representations, the ZDD modification has been introduced, which enables a unique record of sets, allowing easy operation with combinations of sets, especially for the purpose of presentation and operation over numerous sets of minimal cut sets.

In addition, by using simple characterization of minimal cut sets for coherent fault trees, the application of BDD representations to determine their complete MCS set has been implemented and demonstrated. Definitions of importance measures have been derived and the algorithm to calculate conditional probability on the MCS set has been developed, the latter enabling a determination of values of all importance measures for basic events from the fault tree. Beside

the importance measures, an algorithm for selecting minimal cut sets according to the given criterion (in form of predicates), as well as algorithms for the assessment of the two bounds for the top event probability have been developed to compare with the conventional quantitative fault tree analysis approach. The developed algorithms and their implementation on the fault tree BDD representation enables the conduct of the evaluation process on the complete MCS set, neither needing any reduction of the set nor any application of approximative approaches to the problem.

The thesis shows that BDD representation properties can be used to efficiently solve problems in the process of evaluating the fault tree. However, a key precondition in the application of BDD representation in the evaluation process is the determination of the basic events order. This problem has been predominantly addressed in the dissertation, showing that by applying the newly developed heuristic algorithm the evaluation process can be performed for the even most complex fault tree models. The basis of the new heuristics represents the algorithm for combining existing orders for inputs to gates. This algorithm forms a new order of basic events for the gate, taking into consideration their position and the possibility of the same event appearing in different orders from inputs to these gates. Where there is no overlapping of basic events between the orders for inputs to gates, a simple situation is solved by an algorithm for functions with a single occurrence of variables. A more complex situation is solved, in case of an overlap between orders, by comparing the number of basic events tops in a BDD representation. Since the formation of the order by means of the new heuristic is carried out sequentially in some input order, being sensitive to the choice of this order, the heuristics shall be applied multiple times (limited number of times) to inputs to gates. The best order obtained by this procedure is further improved by the Rudell's sifting method, which proved effective for the largest fault tree models. The entire procedure for the fault tree is carried out in the order of gates that follows from the depth-first traversal of the model.

The verification of the approach has been carried out by evaluating examples of the fault tree from the literature and on realistic examples from the model for the Krško nuclear power plant. The thesis reveals, that with the order obtained, it is possible to fully carry out a quantitative and qualitative evaluation without any approximate calculations. Moreover, the results achieved (accuracy, completeness) show the applicability of the approach on realistic examples with a run time comparable to the conventional approach.

The scientific contributions of the thesis can be divided into three basic units:

1. The development of an algorithm to determine the order of variables to find BDD representations of a complete fault tree or event tree in probabilistic reliability analyses of power systems. Starting from a model of logical function with a single occurrence of variables, an algorithm was developed, finding the order of basic events in the Boole-Shannon's development of logical functions represented by the fault tree. The principal

idea of the new heuristics is based on the application of a recursive relation from the paper [1] for the gate in the fault tree, containing a record of the logical function with a single occurrence of variables, while on other gates the technique of searching for the best permutation of the input based on the assessment of the size of the BDD gate record is applied. To reduce the search space, different fault tree simplification techniques are applied with the aim of increasing the part of the fault tree that has a logical function structure with a single occurrence of variables. During the formation of BDD representations for gates in more complex fault tree models, the dynamic reordering technique is additionally applied by swapping of adjacent logical variables. The new heuristics is applied successively to the gates in the order specified by depth traversing of the fault tree model. The order for top events is optionally dynamically improved for the most complex models.

2. The improvement of the qualitative and quantitative fault tree analysis on complex nuclear power systems by applying a complete calculation of the BDD model record, using the order of basic events specified by the new heuristics. The qualitative analysis of the fault tree has been improved in the domain of selecting a part of the MCS set from a complete set of minimal cut sets while meeting adjusted selection criteria. The difference to the conventional approach is reflected in the approach, since the choice is carried out on the entire MCS set, while in conventional approaches the choice of one part of the MCS set is carried out by discarding the elements during the calculation. For a quantitative analysis of the fault tree, the following algorithms have been developed:
 - algorithm for determining the top (or other) event probability from a complete MCS set in a BDD representation with a default interpretation of the logical function represented by the fault tree,
 - algorithm for determining the upper bound for the probability of a top (or other) event from a complete set of minimal cut sets,
 - algorithm for determining the upper bound for the probability of a top (or other) event from rare events using a complete set of minimal cut sets.
3. The development of the application and the confirmation of the results obtained were achieved by comparison with the conventional approach. All algorithms in the thesis have been fully implemented in the software solution, and the correctness and accuracy of the algorithms has been verified by comparison with the results obtained by conventional approach. For comparison with the conventional approach, the KIRAP software solution was used, since the choice of a conventional solution is invariant for the results. In other words, a comparison with another conventional solution will give similar (most often the same) results using the same approximate methods.

This thesis raises questions related to further research work. Undoubtly, the developed

heuristic algorithm does not represent the final solution to the problem of the order of basic events in the fault tree model, but it represents a step forward towards the application of the BDD method on real nuclear power plant models and in other technological fields. In this sense, modifications to the existing or the development of new heuristic algorithms are possible, which can exploit the specifics of the fault tree model from the selected scope. In addition, it is possible to extend the scope of application of the BDD method to other problems relating to logical functions and to problems of their efficient representation. It should also be noted, that the possibility of implementing functional analysis over the record of the MCS set arises, since the evaluation of the BDD approach is carried out on a complete set of minimal cut sets. In other words, from a complete set of minimal cut sets it is possible to determine a logical function that shows the model's dependency on the change in probability of a basic event, or on changing the probability of a performed event (gate) and their combinations. In addition to the sensitivity analysis, functional dependency between components can be obtained from the complete MCS set, for example, failures that depend on the function they establish, or sequences of defects with components.

Additionally, an interesting area for further research may be the application of BDD representations to dynamic fault trees. The application to dynamic fault trees requires expansion in implementation, especially in the domain of determining the order for priority gates and their implementation by means of binary decision diagrams. An interesting area of research is the problem of finding minimal formats of arbitrary logical functions. In particular, such a problem is the one of determining the minimum record of a noncoherent fault tree. Some progress has already been made in this direction, but there is still room for research, especially in logical functions with hundreds (or thousands) of logical variables.

Apart from a practical application of the BDD method, theoretical questions of the properties of BDD representations are also open, particularly the properties of BDD representations for certain categories of logical functions, such as logical functions applied in cryptography (e.g. Bent functions), or in error detection and correction codes.

Keywords: binary decision diagram, variable ordering, fault tree, probabilistic reliability analysis, nuclear power plant reliability

Sadržaj

Sadržaj	xi
1. Uvod	1
1.1. Motivacija	2
1.2. Pouzdanost tehničkih sustava	3
1.3. Kompleksnost modela	3
2. Osnovni pojmovi	5
2.1. Matematički aparat	5
2.1.1. Kompleksnost	6
2.1.2. Logičke formule	8
2.1.3. Događaji i vjerojatnost	12
2.1.4. Slučajne varijable i vektori	19
2.2. Teorija pouzdanosti	24
2.2.1. Model sustava	24
2.2.2. Minimalne putanje i presjeci	28
2.2.3. Pouzdanost sustava	33
2.3. Stablo kvara	38
2.3.1. Struktura stabla	39
2.3.2. Analiza stablom kvara	42
2.3.3. Kompleksnost analize	45
3. Binarni dijagrami odlučivanja	47
3.1. Definicija i svojstva	47
3.2. ZDD modifikacija	53
3.3. Minimizacija logičke funkcije	55
3.4. Primjena u analizi pouzdanosti	63
3.5. Problem redoslijeda varijabli	70

4. Određivanje redoslijeda osnovnih događaja	79
4.1. Redukcija stabla kvara	79
4.2. Heuristika za određivanje redoslijeda	83
4.2.1. Logičke formule s jednostrukim pojavljivanjem varijabli	83
4.2.2. Nova heuristika za redoslijed osnovnih događaja	84
4.3. Provjera ispravnosti novog algoritma	90
4.4. Postupak kvantitativnog i kvalitativnog vrednovanja stabla kvara	94
4.4.1. Vrednovanje testnih modela stabla kvara	95
5. Doprinos i daljnje istraživanje	98
5.1. Pregled rada	99
5.2. Doprinos	100
5.3. Daljnje istraživanje	101
Dodatci	103
A. Svojstva i rezultati testiranih modela	104
A1. Svojstva modela stabla kvara	105
A2. Statistika izvođenja nove heuristike	109
B. Rezultati vrednovanja - BDD pristup	111
B1. ACPOWER	114
B2. CHRGR	119
B3. DCPOWER	124
B4. EFW	126
B5. HPSI	131
B6. LPSI	136
B7. SW	141
C. Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup	146
C1. ACPOWER – KIRAP	148
C2. CHRGR – KIRAP	152
C3. DCPOWER – KIRAP	156
C4. EFW – KIRAP	157
C5. HPSI – KIRAP	161
C6. LPSI – KIRAP	165
C7. SW – KIRAP	169
Literatura	173

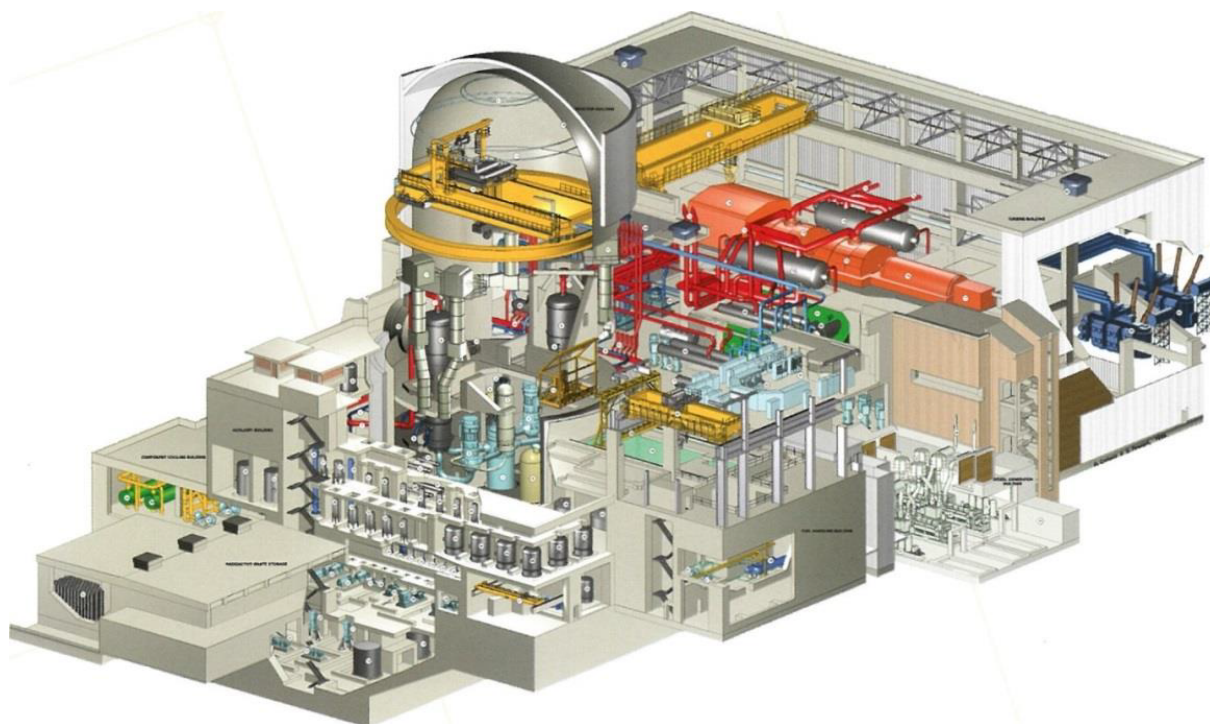
Popis slika	180
Popis tablica	181
Životopis	183
Biography	186
Članak	187

Poglavlje 1

Uvod

Nuklearna elektrana primjer je najsloženijeg tehničkog sustava u kojem se primjenjuje nuklearna tehnologija za proizvodnju električne energije. Složenost sustava nuklearne elektrane ne očituje se samo tijekom izgradnje već i pri eksploataciji u procesima funkcionalnog održavanja, usklađenim s najvišim sigurnosnim zahtjevima. Složene sustave nuklearne elektrane obično promatramo kao uređenu cjelinu elemenata podijeljenih na manje podsustave i zasebne komponente. Ustroj je najčešće hijerarhijski strukturno kompleksan zbog brojnih funkcionalnih veza između podsustava i komponenata. Hijerarhijsku organizaciju elemenata sustava nuklearne elektrane promatramo na funkcionalnoj razini u svrhu izvršavanja predviđenih funkcija tijekom rada, što nazivamo *holističkim* pristupom. Jedno od pitanja, koje se postavlja tijekom eksploatacije nuklearne elektrane jest pouzdanost elemenata sustava u svrhu ispunjavanja najviših sigurnosnih zahtjeva. Na razini hijerarhijske organizacije to znači da je nužno odrediti vjerojatnost rada u vremenskim okvirima, na predviđeni način te u strogo određenim radnim uvjetima za sve elemente sustava nuklearne elektrane. Problemom određivanja vjerojatnosti rada sustava bavi se *teorija pouzdanosti*, a cilj ove disertacije je, primjenom zakona teorije pouzdanosti unaprijediti metodu stabla kvara za kvalitativnu i kvantitativnu ocjenu pouzdanosti sustava nuklearne elektrane.

Da bi se zakon teorije pouzdanosti mogao primijeniti, sustav nuklearne elektrane treba formalno opisati na apstraktnoj razini modela te osigurati nedvosmisleno mapiranje (preslikavanje) između zapisa. Opis sustava nuklearne elektrane zasniva se na određivanju *strukturne funkcije sustava* koja ukazuje na funkcionalnu vezu između sastavnih elemenata (podsustava, komponenata). Promatranjem jednostavnog statusa $\{radi, ne\ radi\}$ na elementima strukturne funkcije sustava te pridruživanjem vjerojatnosti tim događajima uvodimo osnovnu vezu s teorijom pouzdanosti, drugim riječima definiramo probabilistički model funkcioniranja sustava nuklearne elektrane. Dobiveni probabilistički model možemo primjenom analize stabla kvara vrednovati kvantitativno i kvalitativno, opisivanjem neželjenih događaja u sustavu. Jedan od pristupa vrednovanja stabla kvara u nuklearnoj elektrani čini primjena binarnih dijagrama odlučivanja [2] na



Slika 1.1: Simplificirani prikaz nuklearne elektrane Krško (izvor: NEK i Elektroprojekt Zagreb)

strukтури stabla kvara. Svakako treba napomenuti kako ovakav pristup nije ograničen samo na sustav nuklearne elektrane već je primjenjiv i na drugim tehničkim sustavima.

1.1 Motivacija

Otklon grešaka u dizajnu ili tijekom eksploatacije kompleksnog tehničkog sustava, poput nuklearne elektrane, zahtjeva velike ljudske i financijske kapacitete. Primjer kompleksnog tehničkog sustava je nuklearna elektrana Krško (skr. **NEK**). Simplificirani² prikaz osnovnih NEK pod-sustava sadržan je na slici 1.1. Pojava incidenata u kompleksnom sustavu nuklearne elektrane nerijetko iziskuje značajna financijska sredstva, ljudske kapacitete kao i vremensko trajanje za pronalaženje uzroka te otklanjanje posljedica, vidi npr. [3]. Stoga su predviđanje, rana detekcija kao i prevencija incidenata od osobite važnosti tijekom cijelog životnog ciklusa nuklearne elektrane. Aktivnosti koje provodimo tijekom životnog ciklusa usko su povezane s analizom pouzdanosti sustava te se najčešće provode procjenom rizika u sustavu i podsustavima nuklearne elektrane.

²**simplifikacija** (franc. simplification, prema srednjovj. lat. simplificare: pojednostavniti), pojednostavnjenje, pojednostavnjivanje (izvor. Hrvatska enciklopedija)

1.2 Pouzdanost tehničkih sustava

Glavna zadaća analize pouzdanosti sustava nuklearne elektrane usmjerena je na procjenu rizika na cjelovitom sustavu i njenim važnijim podsustavima. Prikladno je prisjetiti se opće definicije pouzdanosti (ISO 8402)³ koja navodi

Pouzdanost je sposobnost sustava za obavljanje predviđene funkcije u radnim uvjetima unutar okruženja u određenom vremenskom okviru.

Jedan od važnijih pristupa za izvršavanje te zadaće jest izgradnja modela stabla kvara za opisivanje neželjenih događaja u sustavu i podsustavima. Osnovna aktivnost u primjeni metode stabla kvara čini dekompozicija vršnog događaja u jednostavnije događaje do odabrane razine na kojoj nije potrebna daljnja analiza. Krajnje događaje koje smatramo nedjeljivima nazivamo osnovnim događajima i uobičajeno ih pridružujemo kvarovima na osnovnim komponentama sustava. Stanje kvara osnovne komponente opisujemo jednostavnom logičkom varijablom. Mogućnost prelaska komponente iz operativnog stanja u stanje kvara mjerimo dodjelom vjerojatnosti prelaska. Na tako definiranom, sada probabilističkom modelu provodimo dva tipa analize:

1. *Kvantitativna analiza* – izračun vjerojatnosti pojave vršnog događaja definiranjem funkcije na vjerojatnostima osnovnih događaja te određivanje probabilističkih parametara (mjera važnosti) za sastavnice sustava
2. *Kvalitativna analiza* – određivanje minimalnih skupova osnovnih događaja i njihovih svojstava koji dovode do vršnog događaja

U sljedećim poglavljima prikazana je kompleksnost izračuna prilikom provođenja oba tipa analiza na računalu. Poznato je, naime, da je za uspješnost primjene programskih rješenja na modelu stabla kvara potrebno ili smanjiti točnost, što može biti neprihvatljivo za kritične sustave, ili znatno pojednostaviti model do razine detalja, koja omogućuje provedbu preciznijih izračuna.

1.3 Kompleksnost modela

“Kompleksni sustav je skup različitih elemenata povezanih na način da mogu obavljati jedinstvenu funkciju koju isti ne mogu samostalno obavljati,” vidi [4]. Pažljivom interpretacijom autori dolaze do zaključka o potrebi raznovrsnih tehnika rješavanja problema na različitim razinama apstrakcije sustava. Kompleksnost modela stabla kvara u osnovi proizlazi iz kompleksnosti reprezentacije logičkog modela predstavljenog stablom kvara. Različite konvencionalne tehnike reprezentacije logičkih funkcija ne zadovoljavaju zahtjeve potrebne za predstavljanje modela stabla kvara. U novije vrijeme ([5],[6],[7],[8]) veću popularnost ostvaruju binarni dijagrami odlučivanja (**BDD**) u različitim inženjerskim disciplinama. Struktura binarnih dijagrama

³International Organization for Standardization 8402 : 1994 Quality management and quality assurance

odlučivanja pokazuje se iznimno učinkovito u predstavljanju logičkih funkcija koje sadrže dijeljenje podfunkcije, tj. podfunkcije koje se višestruko koriste u definiciji logičke funkcije. U poglavlju 3 opisana je njihova struktura te primjena u analizi pouzdanosti [2]. Upotrebljivost BDD zasnovanih alata u analizi pouzdanosti neposredno je povezana s veličinom BDD zapisa. Određivanje optimalne veličine BDD zapisa spada u kategoriju najtežih problema te se intenzivno pokušava riješiti približnim postupcima koji ne moraju davati optimalna rješenja. Budući je veličina BDD zapisa za model stabla kvara određena redoslijedom osnovnih događaja iz kojih je formiran model problem se pokušava suboptimalno riješiti primjenom heurističkih metoda. Iz tog razloga u četvrtom poglavlju prezentirana je nova heuristička metoda za određivanje redoslijeda osnovnih događaja te je njena svrhovitost i primjenjivost verificirana na realnim primjerima stabla kvara iz modela za nuklearnu elektranu Krško. Pojednostavljeno možemo reći, glavna tema disertacije je nalaženje učinkovitog BDD zapisa za model stabla kvara pomoću kojega možemo provesti egzaktne analize bez smanjivanja točnosti i bez redukcije modela na realnim primjerima iz nuklearne elektrane.

Poglavlje 2

Osnovni pojmovi

Analiza pouzdanosti tehničkih sustava važna je u brojnim industrijskim granama. Za njeno opisivanje i razumijevanje nužan je odgovarajući formalizam pomoću kojeg definiramo važne pojmove na apstraktnoj razini. Primjenom apstraktnih modela na konkretnim tehničkim sustavima postignuti su zapaženi rezultati u pristupu realnim problemima. Zamjećujemo da primjenom teorije pouzdanosti osiguravamo teorijske i praktične osnovne za analizu pouzdanosti tehničkih sustava. U ovom poglavlju obuhvaćeni su osnovni pojmovi neophodni za razumijevanje teorije pouzdanosti te izradu inženjerskih alata (programskih rješenja), koji nalaze primjenu na konkretnim problemima. U prvom dijelu, postavljen je osnovni matematički aparat potreban za opisivanje formalizma teorije pouzdanosti. Uvoden je formalizam za pojmove kompleksnost, logičke formule te osnovni formalizam teorije vjerojatnosti. U drugom dijelu, upoznajemo se s osnovama teorije pouzdanosti koju usvajamo kroz apstraktne pojmove sustava te primjene teorije na analizi pouzdanosti složenih tehničkih sustava. Treći dio, donosi osnovne rezultate teorije primijenjene na stablu kvara, što predstavlja uvod u primjenu binarnih dijagrama odlučivanja na analizi stabla kvara. Primarni cilj ovog poglavlja je pripremanje matematičkog aparata za opisivanje i selekciju algoritama za analizu stabla kvara, bez obzira radi li se o konvencionalnim približnim rješenjima ili egzaktnim rješenjima pomoću binarnih dijagrama odlučivanja.

2.1 Matematički aparat

Gotovo je nemoguće razumijevanje teorije pouzdanosti bez odgovarajućeg matematičkog aparata. Kod primjene algoritamskih rješenja koja proizlaze iz teorije, nužno je ocijeniti kvalitetu primijenjenog rješenja, za što je neophodno uspostaviti sustav procjene zasnovan na analizi kompleksnosti algoritama. U podpoglavlju o kompleksnosti uvedeni su osnovni pojmovi iz teorije pomoću kojih su opisani vremenski i prostorni zahtjevi algoritama. Kao primarni alat za izgradnju modela stabla kvara te njegovih osnovnih dijelove koristi se teorija logičkih formula i funkcija, što čini sadržaj drugog podpoglavlja. Nakon izgradnje stabla kvara, u analizi se ko-

riste zakoni vjerojatnosti na strukturi stabla. Za ispravnu primjenu zakona vjerojatnosti nužno je razumijevanje pojma osnovnog događaja i prostora vjerojatnosti na kojima se razmatraju situacije tijekom upotrebe tehničkog sustava. Slučajni događaji u sustavima rijetko su izolirani već se učestalo javljaju u kombinacijama koje imaju utjecaja na rad čitavog sustava. Iz tog je razloga bitan pojam slučajne varijable i slučajnog vektora pomoću kojih povezujemo skupne događaje iz sustava sa zakonima vjerojatnosti.

2.1.1 Kompleksnost

Osnovna namjera disertacije usmjerena je na razvoj algoritam za primjenu binarnih dijagrama odlučivanja na analizu stabla kvara te usporedbu njihove kvalitete s postojećim konvencionalnim rješenjima. Prije svega možemo se zapitati što je to algoritam? Riječ algoritam⁴ uveden je u Europu za arapski sustav decimalnih oznaka u IX-om stoljeću, a kasnije se proširio na vještinu računanja. Primjerice, algoritam možemo definirati na ovaj način

Definicija 2.1 (Algoritam). Algoritam je konačan niz dobro definiranih naredbi sa sljedećim svojstvima

- značenje svake naredbe je nedvosmisleno
- nakon svake naredbe nedvosmisleno slijedi nova naredba
- naredba zaustavljanja se dostiže nakon izvođenja konačnog broja naredbi

Ponekad za algoritam koristimo naziv *efektivni postupak*, budući su sve naredbe algoritma dovoljno osnovne da se mogu točno izvesti u konačnom vremenu i na konačnom papiru. Složenosti algoritama bavi se teorija kompleksnosti, za koju se osnovni pregled može naći u knjizi [9] ili malo napredniji u [10], iz kojih su ovdje prezentirane samo osnovne definicije.

Za nepristranu ocjenu kvalitete razvijenih algoritama potreban nam je teorijski okvir unutar kojeg se može nedvojbeno uspoređivati algoritme. Teorijski okvir pomoću kojeg se može postaviti kriterije za usporedbu algoritama, te odrediti njihove klase složenosti dan je *Turingovim* strojem (TM). U biti, TM apstraktno definira opis stroja za izvođenje algoritama.

Definicija 2.2 (Turingov stroj). Standardni Turingov stroj s k -traka uređena je sedmorka $TM = (Q, T, S, \square, q_0, F, \delta)$, gdje su

1. $Q = \{q_0, q_1, \dots, q_N\}$ je konačan skup internih stanja stroja
2. T je konačan skup simbola s kojima stroj radi (abeceda trake)
3. $S \subset T$ je konačan skup ulaznih znakova (ulazna abeceda)
4. $\square \in T \setminus S$ je prazan simbol na traci
5. $q_0 \in Q$ je početno stanje stroja
6. $F \subseteq Q$ je skup završnih stanja stroja

⁴**algoritam** ili (etimološki ispravnije) **algorizam**, skup je simbola i općeniti postupak za sustavno rješavanje pojedinačnih zadataka iz neke određene klase matematičkih problema. (izvor: Hrvatska enciklopedija)

7. δ je funkcija prijelaza definirana

- za *deterministički Turingov stroj (DTM)*

$$\delta: Q \times T^k \rightarrow Q \times T^k \times \{L, D\}^k$$

- za *nedeterministički Turingov stroj (NDTM)*

$$\delta: Q \times T^k \rightarrow 2^{Q \times T^k \times \{L, D\}^k}$$

gdje $\{L, D\}$ označava pomak trake $\{Li\text{jevo}, Desno\}$

Budući Turingov stroj predstavlja najjednostavniji apstraktni model pomoću kojega se može izvesti svaki *efektivni postupak*, TM možemo primijeniti za klasifikaciju funkcija. Za funkciju f kažemo da je *izračunljiva* (ekvivalentno *problem je rješiv*) ako postoji efektivni postupak (algoritam) koji daje ispravan rezultat za sve ulazne parametre funkcije. Klasifikacija izračunljivih funkcija naprosto je provjera postoji li Turingov stroj za zadanu funkciju (problem), tj. funkcija je izračunljiva ako se može izračunati Turingovim strojem.

Church-Turing teza – izračunljivost je Turingova izračunljivost.

Za preciznu ocjenu kvalitete algoritma nije dovoljno samo poznavanje stroja koji izvodi efektivni postupak, već je potrebno ocijeniti potrebne resurse za izvođenje. Tipično se zahtjevi za resursima ocjenjuju prema potrebnom vremenu i prostoru za izvođenje algoritma primjenom takozvane “big” notacije⁵. Zbog kompletnosti u slijedećoj definiciji su definirane “big-O,” “big – Ω ,” i “big – Θ ” notacije.

Definicija 2.3 (big-O notacija). Neka su $f, g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ dvije pozitivne realne funkcije. Za dovoljno velik $n \in \mathbb{N}$ pišemo,

1. $f(n) = \mathcal{O}(g(n)) \implies \exists c \in \mathbb{R} \mid c > 0 \wedge f(n) \leq c \cdot g(n)$
2. $f(n) = \Omega(g(n)) \implies \exists c \in \mathbb{R} \mid c > 0 \wedge f(n) \geq c \cdot g(n)$
3. $f(n) = \Theta(g(n)) \implies f(n) = \mathcal{O}(g(n)) \wedge f(n) = \Omega(g(n))$

Intuitivno, “big-O” pokazuje asimptotsku gornju granicu za funkciju f , drugim riječima, pokazuje asimptotsko ponašanje funkcije $f(n)$ koja je ograničena s gornje strane funkcijom $g(n)$. Druga oznaka “big – Ω ,” pokazuje asimptotski donju granicu, tj. asimptotsko ponašanje funkcije $f(n)$ koja je ograničena s donje strane asimptotskim ponašanjem funkcije $g(n)$. Treći oznaka iz definicije pokazuje jednakost u asimptotskom ponašanju obje funkcije f, g . Sada se mogu definirati dvije važne klase algoritama (problema) prema vremenskim zahtjevima za izvođenje na Turingovom stroju.

⁵**notacija** (*lat. notatio*). Bilježenje, konvencionalan način koji služi za prikazivanje pojmova, veličina i odnosa u različitim disciplinama, kao i sustav znakova i simbola koji se za takav prikaz rabe. (izvor: Hrvatska enciklopedija)

Definicija 2.4 (P i NP problemi). Neka je dan polinom $q(n) \in \mathcal{O}(n^k) \mid k \in \mathbb{N}$. Kažemo i pišemo da je problem (algoritam) P

- $P \in \mathbf{P}$ ako postoji DTM , takav da vrijedi $t_{DTM}(n) \leq q(n)$
- $P \in \mathbf{NP}$ ako postoji $NDTM$, takav da vrijedi $t_{NDTM}(n) \leq q(n)$

gdje je $n \in \mathbb{N}$ duljina ulaznih podataka i $t(n)$ vrijeme izvođenja algoritma na Turingovu stroju.

Pojednostavljeno može se reći da su $\mathbf{P}$ problemi rješivi algoritmima u polinomijalnom vremenu na TM , dok za $\mathbf{NP}$ probleme, rješenje se može verificirati u polinomijalnom vremenu, ali za nalaženje rješenja je potreban $NDTM$. Točan odnos između klasa nije poznat i predstavlja poznati problem iz teorije kompleksnosti

$$\boxed{\mathbf{P} = \mathbf{NP} ?}$$

Unutar klase $\mathbf{NP}$ problema moguća je dodatna podjela na dvije podklase

- **NP-težak** ako postojanje polinomijalnog algoritma za njegovo rješavanje povlači $\mathbf{P} = \mathbf{NP}$
- **NP-potpun** ako se svaki $\mathbf{NP}$ problem može svesti na njega

uz napomenu da za neke probleme još uvijek nije poznato u koju podklasu spadaju.

2.1.2 Logičke formule

Stablo kvara (skr. **FT**⁶) predstavlja model logičkih veza između osnovnih događaja koji dovode do modeliranog događaja. Za opisivanje logičkih veza između osnovnih događaja potreban je matematički alat logičkih funkcija. U ovom odlomku uvedeni su osnovni pojmovi neophodni za razumijevanje i korištenje matematičkog alata logičkih funkcija u kontekstu modela stabla kvara.

Osnovni pojam je skup logičkih vrijednosti $\{\text{istina}, \text{laž}\}$, koji se u tehničkoj primjeni zamjenjuje sa skupom $\mathbb{B} = \{\mathbf{1}, \mathbf{0}\}$ koji nazivamo *Booleov skup*. Varijable koje poprimaju vrijednosti iz Booleovog skupa nazivaju se logičke ili *Booleove varijable*, te ih označavamo malim latiničnim slovima x, y, z . Velikim latiničnim slovima označavamo skupove s više ($n > 1$) logičkih varijabli, npr. $X = \{x_1, \dots, x_n\}$.

Logičku varijablu x ili njenu negaciju $\neg x$ nazivamo *literal*, s time da negaciju logičke varijable često označavamo s $\bar{x}$. Očigledno vrijedi, $\neg \bar{x} = \neg \neg x = x$. Literal za negaciju logičke varijable nazivamo *negativan literal*, a literal za logičku varijablu nazivamo *pozitivan literal*. Logičke formule su definirane rekursivno korištenjem *logičkih konstanti*, *logičkih varijabli*, te osnovnih logičkih operatora $\{i, \text{ili}, \text{negacija}\}$.

Definicija 2.5 (Logička formula). *Logička formula* definirana je rekursivno:

- Logičke konstante su *logičke formule*
- Logička varijabla je *logička formula*

⁶eng. Fault Tree – Stablo kvara

- Ako su F i G logičke formule, tada su $\neg F, F \vee G, F \wedge G$ također *logičke formule*

Formule koje se sastoje samo od jedne logičke konstante ili jedne logičke varijable nazivamo *atomarnim* formulama. Za logičke formule vrijedi desna asocijativnost prema pravilu:

$$F \vee G \vee H = F \vee (G \vee H)$$

Logičke formule oblika $\vee F_i$ nazivamo *disjunkcija*, a formule oblika $\wedge F_i$ nazivamo *konjunkcija* gdje je $\{F_i : i = 1, \dots, n\}$ proizvoljan konačan skup logičkih formula. Ako su F_i literali tada disjunkciju nazivamo *elementarna disjunkcija*, a konjunkciju *elementarna konjunkcija*. Za formulu F kažemo da je u *disjunktivnoj normalnoj formi* (skr. **DNF**⁷) ako je F disjunkcija elementarnih konjunkcija, slično kažemo da je u *konjunktivnoj normalnoj formi* (skr. **CNF**⁸) ako je F konjunkcija elementarnih disjunkcija. Za pretvaranje disjunkcije u konjunkciju (i obrnuto) u formulama koristimo *De Morganova* pravila.

Propozicija 2.1 (De Morganova pravila). Neka su F, G logičke formule. Vrijede sljedeće jednakosti:

- $\neg(F \wedge G) \equiv \neg F \vee \neg G$
- $\neg(F \vee G) \equiv \neg F \wedge \neg G$

Dokaz. Neposredno uvrštenjem logičkih konstanti za vrijednosti F, G .

Q.E.D.

Korisno je pravilo *dvostruke negacije* $\neg\neg F \equiv F$, koje vrijedi za svaku logičku formulu. Određivanje istinitosti neke logičke formule (semantiku) provjerava se računanjem vrijednosti formule za sve moguće vrijednosti logičkih varijabli kojima je formirana.

Definicija 2.6 (Totalna interpretacija). Svako preslikavanje sa skupa logičkih varijabli u Booleov skup $\sigma : \{x_1, \dots, x_n\} \rightarrow \mathbb{B}$ nazivamo *interpretacija*.

Iz sljedeće propozicije dobivamo pravilo za određivanje interpretacije logičke formule.

Propozicija 2.2 (Interpretacija logičke formule). Neka je F logička formula definirana na skupu $\{x_1, \dots, x_n\}$ logičkih varijabli. Interpretacija logičke formule $\sigma(F)$ određena je rekurzivno:

- $\sigma(\neg F) = 1 - \sigma(F)$
- $F = G \wedge H \implies \sigma(G \wedge H) = \min\{\sigma(G), \sigma(H)\}$
- $F = G \vee H \implies \sigma(G \vee H) = \max\{\sigma(G), \sigma(H)\}$

Za logičku formulu F kažemo da je *ispunjiva* ako postoji interpretacija σ takva da vrijedi $\sigma(F) = 1$.

⁷eng. Disjunctive Normal Form

⁸eng. Conjunctive Normal Form

Definicija 2.7 (Tautologija). Logička formula za koju vrijedi

$$\sigma(F) = 1, \forall \sigma$$

kažemo da je *valjana* te je nazivamo *tautologija*.

Slično, za dvije logičke formule F, G kažemo da su ekvivalentne i pišemo $F \equiv G$ ako vrijedi

$$\sigma(F) = \sigma(G), \forall \sigma$$

Uočimo da skup svih interpretacija logičke formule definira preslikavanje sa skupa $\mathbb{B}^n$ na Booleov skup $\mathbb{B}$, drugim riječima, skup svih interpretacija logičke formule određuje jednu logičku funkciju. Vrijedi,

Propozicija 2.3 (Jednakost logičke funkcije i formule). Neka je $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$ logička funkcija. Logička formula F ekvivalentna je logičkoj funkciji f ako i samo ako vrijedi

$$f(\sigma(x_1), \dots, \sigma(x_n)) = \sigma(F), \forall \sigma$$

Skup svih logičkih funkcija od n – varijabli označavamo s $\mathcal{B}_n$, i jasno je kako vrijedi $|\mathcal{B}_n| = 2^{2^n}$

Broj varijabli o kojima ovisi logička funkcija naziva se *arnost* logičke funkcije.

Primjer 2.1.1 (Primjeri logičkih funkcija). Uobičajeno je logičke funkcije zapisati u obliku *semantičke* tablice, čime se slikovito prikazuje interpretacija logičke formule koja definira funkciju:

- *unarna* $f: \mathbb{B} \rightarrow \mathbb{B}$ definirana **negacijom**, $f(x) = \neg x$
- *binarne* $f: \mathbb{B}^2 \rightarrow \mathbb{B}$ definirane formulama
 - **konjunkcija**, $f(x, y) = x \wedge y$
 - **disjunkcija**, $f(x, y) = x \vee y$
 - **ekskluzivna disjunkcija**, $f(x, y) = x \oplus y$
 - **implikacija**, $f(x, y) = (x \implies y)$
 - **ekvivalencija**, $f(x, y) = (x \equiv y)$

Uočimo da zapis u obliku semantičke tablice za funkciju $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$ ima 2^n redaka. Disjunktivnu normalnu formu za funkciju f dobijemo formiranjem disjunkcije elementarnih konjunkcija literala u redcima za koje je vrijednost funkcije 1.

Primjer 2.1.2 (DNF zapis). Neka je logička funkcija $f: \mathbb{B}^3 \rightarrow \mathbb{B}$ zadana sljedećom semantičkom tablicom: Disjunktivnu normalnu formu za funkciju zadanu tablicom 2.2 dobijemo for-

Tablica 2.1: Binarne logičke funkcije

x	y	$x \vee y$	$x \wedge y$	$x \oplus y$	$x \implies y$	$x \equiv y$
0	0	0	0	0	1	1
0	1	1	0	1	1	0
1	0	1	0	1	0	0
1	1	1	1	0	1	1

Tablica 2.2: Primjer logičke funkcije

x_1	x_2	x_3	$f(x_1, x_2, x_3)$
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

miranjem elementarnih konjunkcija s literalima u semantičkoj tablici gdje je funkcija istinita. Dakle, iz trećeg, petog i sedmog retka proizlazi

$$f(x_1, x_2, x_3) = (\overline{x_1} \wedge x_2 \wedge \overline{x_3}) \vee (x_1 \wedge \overline{x_2} \wedge \overline{x_3}) \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge \overline{x_3})$$

Za skup logičkih funkcija $\mathcal{F} = \{f_1, \dots, f_s\}$ kažemo da je *kompletan* [11] za klasu $\mathcal{B}_n$, ako se svaka funkcija iz $\mathcal{B}_n$ može prikazati kompozicijom funkcija iz $\mathcal{F}$. Ukoliko je skup $\mathcal{F}$ *minimalan* tada se naziva *baza*, preciznije, kompletan skup $\mathcal{F}$ je baza ako ne postoji podskup $\mathcal{S} \subset \mathcal{F}$ koji je kompletan. Primjeri nekih kompletnih skupova:

- $\{\vee, \wedge, \neg, 0, 1\}$ – *De Morganov* skup
- $\{\vee, \neg, 0, 1\}$
- $\{\wedge, \neg, 0, 1\}$
- $\{\wedge, \oplus, 0, 1\}$
- $\{\wedge, 0, 1\}$ – **nor** funkcija $f(x, y) = x \wedge y = \neg(x \vee y)$

Uočavamo kako *De Morganov* skup nije minimalan, dok su ostali skupovi minimalni te su prema tome baze iako nisu istog kardinaliteta⁹.

⁹**kardinalni broj (glavni broj)** (*kasnolat. numerus cardinalis*), osnovni pojam u funkciji brojenja koliko čega

Za logičke funkcije od n – varijabli možemo definirati pojam jednostavne derivacije [12].

Definicija 2.8 (Jednostavna derivacija logičke funkcije). *Jednostavnom derivacijom* logičke funkcije $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$ u odnosu na varijablu $x_i \in \mathbb{B}$, nazivamo logičku funkciju $D_i f: \mathbb{B}^{n-1} \rightarrow \mathbb{B}$ za koju vrijedi

$$\begin{aligned} D_i f &= \frac{\partial f}{\partial x_i} = f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \vee f(x_1, \dots, \bar{x}_i, \dots, x_n) \\ &= f(x_1, \dots, 1_i, \dots, x_n) \vee f(x_1, \dots, 0_i, \dots, x_n) \end{aligned}$$

Iz definicije je vidljivo da logička funkcija $D_i f$ ne sadrži varijablu x_i . Jasno je također da $D_i f$ možemo ponovno derivirati po nekoj drugoj varijabli, čime dobivamo miješanu drugu jednostavnu derivaciju logičke funkcije, drugim riječima vrijedi

$$D_{ji} f = \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)$$

Na isti način možemo definirati jednostavne derivacije višeg reda, uz napomenu da svaka sljedeća derivacija smanjuje broj varijabli u definiciji logičke funkcije. Jednostavne derivacije logičke funkcije pokazuju se korisnim za definiranje nekih mjera važnosti u teoriji pouzdanosti.

2.1.3 Događaji i vjerojatnost

U tehničkim se sustavima redovito susrećemo s eksperimentima (mjerenjima) za koje ne možemo predvidjeti rezultate, ali znamo koje vrijednosti rezultat može poprimiti bilo da se radi, primjerice, o diskretnim ($r \in \mathbb{Z}$) vrijednostima, ili kontinuiranim ($r \in \mathbb{R}$) vrijednostima iz intervala. U takvim situacijama smatramo rezultat eksperimenta (mjerenja) slučajnim i njegovu vrijednost nazivamo elementarnim događajem. Uobičajeno skup svih vrijednosti koje rezultat može poprimiti označavamo grčkim slovom Ω , i nazivamo ga prostom elementarnih događaja, a rezultat eksperimenta nazivamo *ishodom*. Pojam eksperimenta (mjerenja) se ovdje koristi u najširem mogućem kontekstu bez posebne specifikacije.

Primjer 2.1.3 (Prostor elementarnih događaja). Neki od primjera prostora elementarnih događaja

- bacanje “fer” novčića – $\Omega = \{pismo, glava\}$
- bacanje “fer” kockice – $\Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
- funkcionalno stanje komponente – $\Omega = \{radi, ne radi\}$

ima prirodni broj kojim se odgovara na pitanje *koliko*. – Kardinalni broj skupa broj je elemenata skupa, što je intuitivno jasno za konačne skupove a za beskonačne skupove određuje se prebrojivost. (izvor: Hrvatska enciklopedija)

- realan broj iz intervala $r \in [0, 1]$ – kontinuirani skup $\Omega = [0, 1]$
- temperatura medija – kontinuirani skup $\Omega = <-273.16, \infty>$

Osim elementarnih događaja uglavnom nas zanimaju složeni događaji, tj. zanimaju nas događaji koji se sastoje od više elementarnih događaja. Složene događaje predstavljamo familijom podskupova prostora elementarnih događaja.

Definicija 2.9 (σ –algebra događaja). Neka je $\Omega = \{E_i\}$ prostor elementarnih događaja. Skup podskupova $\mathcal{A} = \{A : A \subseteq \Omega\}$ za koji vrijedi

- $\emptyset \in \mathcal{A}$
- $A \in \mathcal{A} \implies A^C \in \mathcal{A}$, gdje je $A^C = \Omega \setminus A$ komplement od A
- $A_{i \in \mathbb{N}} \in \mathcal{A} \implies \bigcup A_i \in \mathcal{A}$

nazivamo σ –algebra skupova iz Ω .

Valja napomenuti, kada promatramo diskretne skupove elementarnih događaja možemo upotrijebiti definiciju algebre skupova. Za potrebe analize stablom kvara zadržat ćemo se na diskretnim skupovima elementarnih događaja.

Primjer 2.1.4 (Primjeri σ –algebre događaja). σ – algebre događaja za diskretne prostore Ω elementarnih događaja

- bacanje “fer” novčića – $\Omega = \{P, G\} \implies \mathcal{A} = \{\emptyset, \{P\}, \{G\}, \Omega\}$
- bacanje “fer” kockice – $\Omega = \{1, \dots, 6\} \implies \mathcal{A} = \{\text{svi podskupovi od } \Omega\}$
- funkcionalno stanje komponente – $\Omega = \{0, 1\} \implies \mathcal{A} = \{\emptyset, \{0\}, \{1\}, \Omega\}$

Primijetimo da su navedene σ –algebre konačne te su ustvari algebre definirane na konačnim skupovima Ω .

Poznavanje σ –algebre događaja za skup elementarnih događaja prirodno vodi na ideju *vjerojatnosti* pojavljivanja pojedinih rezultata nakon višestrukog ponavljanja eksperimenta (mjerenja). Jedan od načina određivanja vjerojatnosti oslanja se na prebrojavanje pojavljivanja elementarnog događaja E nakon n ponavljanja eksperimenta te određivanja *relativne frekvencije* za elementarni događaj. Ukoliko eksperiment ponavljamo u serijama tada definiramo relativnu frekvenciju omjerom $r_i^E = \frac{n_i^E}{n_i}$ između broja pojavljivanja (n_i^E) elementarnog događaja E u i –toj seriji i broja ponavljanja eksperimenta (n_i) u toj seriji. Uz uvjet statističke stabilnosti relativnih frekvencija r_i^E u nizu ponavljanja eksperimenta, vjerojatnost se definira realnim brojem $p_E \in [0, 1]$ oko kojeg se grupiraju relativne frekvencije. Vjerojatnost definirana na ovaj način naziva se **vjerojatnost a posteriori**, i osnovni nedostatak ovakvog pristupa je hipoteza statističke stabilnosti relativnih frekvencija te kako provjeriti njenu valjanost za serije ponavljanja eksperimenta. Drugi način definiranja vjerojatnosti događaja A oslanja se pak na prebrojavanje elementarnih događaja povoljnih za događaj (n_A) i definiranjem kvocijenta $p_A = \frac{n_A}{n}$ (n je ukupan broj elementarnih događaja) za **vjerojatnost a priori**. Definicija vjerojatnosti a priori

ima osnovni nedostatak u pretpostavci da su svi elementarni događaji jednako vjerojatni te da je prostor događaja konačan. Striktno aksiomatsko uvođenje vjerojatnosti zasnovano na teoriji izmjerivih skupova i izmjerivih funkcija opisano je u literaturi [13],[14], te rješava nedostatke “a priori” i “a posteriori” pristupa.

Definicija 2.10 (Vjerojatnost). Funkcija $P: \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$ je **vjerojatnost** ako vrijedi

- $0 \leq P(A) \leq 1, \forall A \in \mathcal{A}$
- $P(\Omega) = 1$
- $A_i \in \mathcal{A} \mid A_i \cap A_j = \emptyset \implies P(\bigcup_i A_i) = \sum_i P(A_i)$

Sada je moguće definirati vjerojatnosni prostor koji predstavlja osnovni objekt teorije vjerojatnosti.

Definicija 2.11 (Vjerojatnosni prostor). *Vjerojatnosni prostor* je uređena trojka $(\Omega, \mathcal{A}, P)$

- Ω je prostor elementarnih događaja
- $\mathcal{A}$ je σ – algebra događaja od Ω
- P je vjerojatnost iz definicije 2.10

Primjer 2.1.5 (Bacanje novčića). U primjeru 2.1.3 promatramo Ω prostor elementarnih događaja za bacanje “fer” novčića. Odgovarajuća σ – algebra događaja $\mathcal{A}$ definirana je u primjeru 2.1.4. Vjerojatnost za “fer” novčić definiramo na sljedeći način: $P(pismo) = P(glava) = \frac{1}{2}$. Na taj način smo definirali vjerojatnosni prostor za eksperiment bacanja novčića.

Na sličan način možemo odrediti vjerojatnosni prostor za različite eksperimente. Iz definicije vjerojatnosti možemo jednostavno postići sljedeći koristan teorem.

Teorem 2.1 (Osnovna svojstva). Neka je dan vjerojatnosni prostor $(\Omega, \mathcal{A}, P)$, za svaki događaj $A, B \in \mathcal{A}$ vrijedi:

- $P(A^C) = 1 - P(A)$
- $A \subseteq B \implies P(A) \leq P(B)$
- $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$

Dokaz. Neposredno iz definicije 2.10 i relacija za skupove imamo:

1. Vrijedi $A \cap A^C = \emptyset, A \cup A^C = \Omega$.

$$1 = P(\Omega) = P(A \cup A^C) = P(A) + P(A^C) - P(A \cap A^C) = P(A) + P(A^C)$$

odakle neposredno proizlazi prva tvrdnja.

2. Za skup B možemo pisati

$$B = (B \cap A) \cup (B \cap A^C) = A \cup (B \cap A^C)$$

čime je B prikazan unijom disjunktih skupova. Odatle proizlazi

$$P(B) = P(A) + P(B \cap A^C)$$

te tvrdnja slijedi zbog svojstva $P(A) \in [0, 1], \forall A \in \mathcal{A}$.

3. Vrijedi jednakost $A \cup B = A \cup (B \cap A^C)$, čime je $A \cup B$ određena unijom disjunktih skupova. Iz definicije vjerojatnosti imamo

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B \cap A^C)$$

Istovremeno, $B = (B \cap A) \cup (B \cap A^C)$ je također unija disjunktih skupova, te vrijedi

$$P(B) = P(B \cap A) + P(B \cap A^C)$$

Oduzimanjem dobijemo treću tvrdnju

$$P(A \cup B) - P(B) = P(A) - P(B \cap A)$$

Q.E.D.

Važna posljedica teorema jest formula za određivanje vjerojatnosti unije događaja, koja će biti korištena u kvantitativnoj analizi stabla kvara.

Korolar 2.1 (Vjerojatnost unije događaja). Neka je $(\Omega, \mathcal{A}, P)$ vjerojatnosni prostor, za $A_i \in \mathcal{A}$ vrijedi

$$P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i < j} P(A_i \cap A_j) + \sum_{i < j < k} P(A_i \cap A_j \cap A_k) - \dots + (-1)^{n+1} P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right)$$

Dokaz. Dokaz provodimo indukcijom po broju skupova iz unije. Za $n = 2$ tvrdnja proizlazi neposredno iz teorema 2.1. Pretpostavimo da tvrdnja vrijedi za $n = N$ skupova, tj. vrijedi

$$P\left(\bigcup_{i=1}^N A_i\right) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i < j} P(A_i \cap A_j) + \sum_{i < j < k} P(A_i \cap A_j \cap A_k) - \dots + (-1)^{N+1} P\left(\bigcap_{i=1}^N A_i\right)$$

Uniju $N + 1$ skupova možemo zapisati

$$\bigcup_{i=1}^{N+1} A_i = \left(\bigcup_{i=1}^N A_i\right) \cup A_{N+1}$$

Primjenom teorema 2.1 dobijemo

$$P\left(\bigcup_{i=1}^{N+1} A_i\right) = P\left(\bigcup_{i=1}^N A_i\right) + P(A_{N+1}) - P\left(\left(\bigcup_{i=1}^N A_i\right) \cap A_{N+1}\right)$$

Budući vrijedi

$$\left(\bigcup_{i=1}^N A_i\right) \cap A_{N+1} = \bigcup_{i=1}^N (A_i \cap A_{N+1})$$

te pretpostavke indukcije da hipoteza vrijedi za $n = N$, proizlazi

$$\begin{aligned} P\left(\bigcup_{i=1}^{N+1} A_i\right) &= \sum_i^N P(A_i) - \sum_{i < j}^N P(A_i \cap A_j) + \sum_{i < j < k}^N P(A_i \cap A_j \cap A_k) - \dots + (-1)^{N+1} P\left(\bigcap_{i=1}^N A_i\right) \\ &\quad + P(A_{N+1}) \\ &\quad - \left(\sum_i^N P(A_i \cap A_{N+1}) - \sum_{i < j}^N P((A_i \cap A_j) \cap A_{N+1}) + \dots + (-1)^{N+1} P\left(\bigcap_{i=1}^{N+1} A_i\right) \right) \\ &= \sum_i^{N+1} P(A_i) - \sum_{i < j}^{N+1} P(A_i \cap A_j) + \dots + (-1)^{(N+1)+1} P\left(\bigcap_{i=1}^{N+1} A_i\right) \end{aligned}$$

Čime je ustanovljeno da tvrdnja vrijedi za $n = N + 1$.

Q.E.D.

Važnu ulogu u analizi pouzdanosti sustava ima pojam *uvjetne vjerojatnosti*, koji definiramo na sljedeći način.

Definicija 2.12 (Uvjetna vjerojatnost). Neka je $(\Omega, \mathcal{A}, P)$ vjerojatnosni prostor, i neka su $A, B \in \mathcal{A}$ proizvoljni događaji. Ako vrijedi $P(B) \neq 0$, tada definiramo *vjerojatnost* događaja A uz uvjet da se dogodio B ,

$$P(A | B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

Neposredno iz definicije postavljena je jednakost

$$P(A \cap B) = P(A | B)P(B) \quad (2.1)$$

iz koje nam proizlazi važno pravilo o umnošku vjerojatnosti za presjek događaja.

Teorem 2.2 (Pravilo umnoška). Neka su $\{A_i: i = 1, \dots, n\}$ događaji iz istog vjerojatnosnog

prostora $(\Omega, \mathcal{A}, P)$. Ako vrijedi $P(\bigcap_i A_i) > 0$, tada vrijedi *pravilo umnoška*

$$P(\bigcap_i A_i) = P(A_1)P(A_2 | A_1)P(A_3 | A_1 \cap A_2) \cdots P(A_n | A_1 \cap \cdots \cap A_{n-1})$$

Dokaz. Neposredno, iterativnom primjenom jednakosti 2.1 na desnoj strani jednadžbe dobijemo

$$\begin{aligned} P(\bigcap_i A_i) &= P(A_1)P(A_2 | A_1)P(A_3 | A_1 \cap A_2) \cdots P(A_n | A_1 \cap \cdots \cap A_{n-1}) \\ &= P(A_1 \cap A_2)P(A_3 | A_1 \cap A_2) \cdots P(A_n | A_1 \cap \cdots \cap A_{n-1}) \\ &= P(A_1 \cap A_2 \cap A_3) \cdots P(A_n | A_1 \cap \cdots \cap A_{n-1}) \\ &= \dots = \\ &= P(\bigcap_i A_i) \end{aligned}$$

Q.E.D.

Definicija uvjetne vjerojatnosti nam otvara mogućnost pojednostavljenja izračuna vjerojatnosti za složene prostore događaja. Osnovna ideja je pojednostavniti kompleksne kalkulacije nalaženjem particije¹⁰ prostora elementarnih događaja s manjim brojem disjunktih podskupova.

Definicija 2.13 (Particija). Za skup događaja $\{B_1, B_2, \dots\}$ kažemo da je **particija** skupa Ω ako vrijedi

- $B_i \cap B_j = \emptyset$
 $i \neq j$
- $\bigcup_i B_i = \Omega$

Ukoliko u definiciji još vrijedi $P(B_i) > 0, \forall i$ tada kažemo da se radi o *potpunom prostoru događaja*. Za potpun prostor, u statistici događaje iz skupa $\{B_1, B_2, \dots\}$ nazivamo hipotezama te ih obično označavamo s $H_i = B_i$. Iz definicije proizlazi teorem 2.3 koji omogućava pojednostavljenje izračuna.

Teorem 2.3 (Formula potpune vjerojatnosti). Neka je A događaj iz vjerojatnosnog prostora $(\Omega, \mathcal{A}, P)$. Ako je $\{B_1, B_2, \dots\} \subset \mathcal{A}$ potpun prostor događaja, tada vrijedi

$$P(A) = \sum_i P(A \cap B_i) = \sum_i P(A | B_i)P(B_i)$$

¹⁰**particija** (*latinski partitio*), dijeljenje, dioba, razdioba. – U logici, postupak kojim se raščlanjuje sadržaj nekoga pojma na njegove dijelove po pojedinim oznakama. (izvor: Hrvatska enciklopedija)

Dokaz. Prema definiciji particije, događaji B_i su međusobno disjunktni, odakle proizlazi $A \cap B_i$ su također disjunktni. Primjenom formule za uvjetnu vjerojatnost na $A \cap B_i$, imamo

$$P(A) = P(A \cap \Omega) = P(A \cap (\cup_i B_i)) = P(\cup_i (A \cap B_i)) = \sum_i P(A \cap B_i) = \sum_i P(A | B_i)P(B_i)$$

Q.E.D.

Vidjeli smo kako poznavanjem particije $\{B_1, B_2, \dots\}$ prostora događaja možemo odrediti vjerojatnost nekog događaja A , ako poznajemo uvjetne vjerojatnosti $P(A | B_i)$. Međutim, poznavanjem vjerojatnosti događaja $P(A) > 0$, možemo odrediti vjerojatnosti događaja iz particije uz uvjet pojavljivanja događaja A , tj. možemo odrediti vjerojatnosti $P(B_j | A)$. Vrijedi sljedeći teorem

Teorem 2.4 (Bayesova formula). Neka je A događaj iz vjerojatnosnog prostora $(\Omega, \mathcal{A}, P)$, i neka je $\{B_1, B_2, \dots\}$ particija skupa Ω . Tada vrijedi

$$P(B_j | A) = \frac{P(A | B_j)P(B_j)}{P(A)} = \frac{P(A | B_j)P(B_j)}{\sum_i P(A | B_i)P(B_i)}$$

Dokaz. Prvi dio formule proizlazi iz definicije uvjetne vjerojatnosti 2.12

$$P(B_j | A) = \frac{P(B_j \cap A)}{P(A)} = \frac{P(A \cap B_j)}{P(A)} = \frac{P(A | B_j)P(B_j)}{P(A)}$$

Uvrštenjem $P(A)$ iz teorema 2.3 proizlazi drugi dio formule.

Q.E.D.

Iz uvjetne vjerojatnosti možemo na jednostavan način definirati *nezavisnost* događaja A, B iz istog vjerojatnosnog prostora $(\Omega, \mathcal{A}, P)$. Pretpostavimo da vrijedi $P(A | B) = P(A)$, drugim riječima, nije se promijenila vjerojatnost događaja A bez obzira što se *dogodio* B . Iz jednakosti

$$P(A) = P(A | B)P(B) + P(A | B^C)P(B^C)$$

proizlazi

$$P(A | B^C) = \frac{P(A) - P(A)P(B)}{1 - P(B)} = P(A)$$

dakle, činjenica da se B nije dogodio također ne mijenja vjerojatnost A događaja. Na sličan način, dobijemo $P(B | A) = P(B)$, $P(B | A^C) = P(B)$. Intuitivno smo pokazali da se ideja *nezavisnosti* može jednostavno definirati putem uvjetne vjerojatnosti događaja.

Definicija 2.14 (Nezavisnost događaja). Neka su A, B događaji iz istog vjerojatnosnog prostora $(\Omega, \mathcal{A}, P)$. Kažemo da su događaji A, B **nezavisni** ako vrijedi $P(A \cap B) = P(A)P(B)$.

2.1.4 Slučajne varijable i vektori

Važan pojam u teoriji vjerojatnosti je pojam *slučajne varijable*. Naime, često puta za interpretaciju rezultata nije važan samo ishod pokusa, već nas zanimaju ostali događaji koji su uključeni dobivenom vrijednosti. Primjerice, bacanjem kockice dobili smo ishod 2. Iz tog rezultata znamo, da je ishod bacanja

- broj 2, dakle događaj $\{2\} \in \mathcal{A}$
- broj manji od 3, događaj $\{1, 2\} \in \mathcal{A}$
- *paran* broj, događaj $\{2, 4, 6\} \in \mathcal{A}$
- *prosti* broj, događaj $\{2, 3, 5\} \in \mathcal{A}$
- broj veći od 1, događaj $\{2, 3, 4, 5, 6\} \in \mathcal{A}$

Uočavamo da smo relativno jednostavno napisali nekoliko *događaja* iz σ –algebre $\mathcal{A}$ koji su rezultat ishoda jednog pokusa (bacanja kockice). Pojam koji uvodimo obuhvaća događaje iz σ –algebre uključene ishodom jednog pokusa.

Definicija 2.15 (Slučajna varijabla). Neka je $(\Omega, \mathcal{A}, P)$ vjerojatnosni prostor. **Slučajna varijabla** X je realna funkcija $X: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ za koju vrijedi

$$\{E_i \in \Omega \mid X(E_i) \leq r\} \in \mathcal{A}, \quad \forall r \in \mathbb{R}$$

Budući su slučajne varijable realne funkcije, njihova svojstva možemo analizirati poznatim metodama matematičke analize. Iz tog razloga za slučajne varijable definiramo dvije funkcije koje u potpunosti opisuju “ponašanje” slučajne varijable. Prva funkcija nam pokazuje intervale (događaje) u kojima imamo veću ili manju gustoću vjerojatnosti.

Definicija 2.16 (Funkcija gustoće). Neka je X slučajna varijabla definirana na vjerojatnosnom prostoru $(\Omega, \mathcal{A}, P)$. Realnu funkciju $f(x)$ koja zadovoljava uvjete

- $f(x) \geq 0$
- $\int_{\Omega} f(x) dx = 1$
- $P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx, \forall a, b \in \mathbb{R}$

nazivamo *funkcija gustoće vjerojatnosti* slučajne varijable X , skraćeno *funkcija gustoće*.

Za diskretne slučajne varijable funkcija gustoće je diskretna i definirana je za konačan skup elementarnih događaja

$$f(x) = P(X = x) = \begin{cases} p_i, & x = E_i \in \Omega \\ 0, & x \notin \Omega \end{cases}$$

Treći uvjet iz definicije funkcije gustoće daje vjerojatnost događaja iz Ω određenog slučajnom varijablom X na intervala $[a, b]$. Točnije, $P(a \leq X \leq B)$ definira vjerojatnost događaja

$$A = \{E_i \mid E_i \in \Omega, a \leq X(E_i) \leq b\}$$

Primijetimo da za svaki realan broj $r \in \mathbb{R}$ vrijedi $P(r) = \int_r^r f(x)dx = 0$, što je jedan od razloga korištenja funkcije distribucije.

Definicija 2.17 (Funkcija distribucije). Neka je $f(x)$ funkcija gustoće slučajne varijable X definirane na vjerojatnosnom prostoru $(\Omega, \mathcal{A}, P)$. Realnu funkciju

$$F(s) = \int_{-\infty}^s f(x)dx$$

nazivamo **funkcija distribucije** slučajne varijable X , skraćeno **razdioba** slučajne varijable.

Općenito je jednostavnije koristiti funkciju distribucije, primjerice:

- $P(X \leq a) = F(a)$
- $P(X > a) = 1 - F(a)$
- $P(a \leq X \leq b) = F(b) - F(a)$

Za diskretne slučajne varijable X funkciju distribucije definiramo pomoću zbroja

$$F(s) = \sum_{x < s} P(X = x)$$

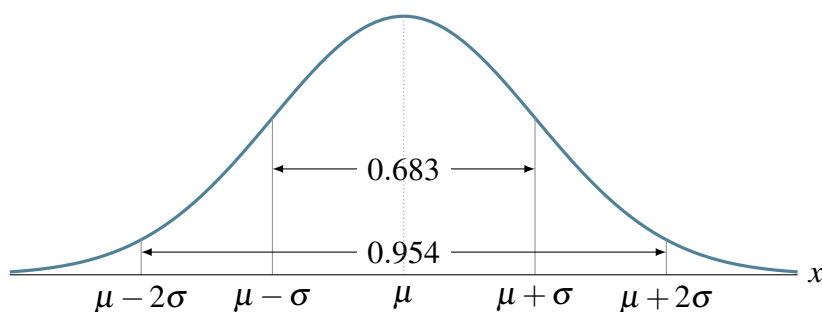
Za opisivanje učestalosti kvarova kod komponenata u tehničkim sustavima upotrebljavaju se brojne diskretne i kontinuirane razdiobe. Primjerice, od diskretnih često se upotrebljava: binomna, polinomijalna, Poissonova, te geometrijska razdioba. Znatno brojnije su kontinuirane razdiobe u upotrebi: eksponencijalna, normalna, lognormalna, Weibullova, Rayleighova, gama, razdiobe ekstremnih vrijednosti (Gumbelova, Fréchetova). Opsežniji popis razdioba može se naći u literaturi, primjerice [15] te [16] za njihovu primjenu u pouzdanosti.

Definicija 2.18 (Binomna razdioba). Slučajna varijabla X na skupu $\{0, 1, \dots, n\}$ ima **binomnu razdiobu** određenu parametrima n, p , ako vrijedi

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k}$$

gdje je $q = 1 - p$. Skraćeno pišemo $X \sim B(n, p)$.

Poseban slučaj binomne razdiobe imamo za $X \sim B(1, p)$ koju nazivamo **indikatorska** ili **Bernoullijeva** slučajna varijabla. Indikatorska slučajna varijabla pokazuje nam ishod pokusa s



Slika 2.1: Normalna razdioba za slučajnu varijablu $X \sim N(\mu, \sigma^2)$

dva moguća događaja $\{0, 1\}$. Slikovito ju možemo predstaviti u formi matrice

$$X \sim B(1, p) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 - p & p \end{pmatrix}$$

Druga važna razdioba je normalna razdioba definirana na sljedeći način

Definicija 2.19 (Normalna razdioba). Neprekidna slučajna varijabla X ima **normalnu razdiobu** s parametrima $\mu, \sigma^2 \in \mathbb{R}$ ako njena funkcija gustoće glasi

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Skraćeno pišemo $X \sim N(\mu, \sigma^2)$.

Posebno slučajnu varijablu s razdiobom $X \sim N(0, 1)$, nazivamo **jedinična normalna razdioba**. Graf funkcije gustoće normalne razdiobe ima karakterističan “zvonoliki” oblik s istaknutim dimenzijama. Primjerice, za normalno distribuiranu slučajnu varijablu znamo koliki postotak vrijednosti očekujemo u intervalu:

- 68,3% u intervalu $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$,
- 95,4% u intervalu $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$,
- 99,7% u intervalu $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$,

Za vjerojatnost osnovnih događaja u FT modelima popularna je eksponencijalna razdioba definirana na sljedeći način.

Definicija 2.20 (Eksponencijalna razdioba). Neprekidna slučajna varijabla X ima **eksponencijalnu razdiobu** određenu parametrom $\lambda > 0$ ako njena funkcija gustoće glasi

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

Skraćeno pišemo $X \sim E(\lambda)$.

Uz slučajne varijable definiramo dva važna pojma

Definicija 2.21 (Očekivanje i varijanca). Neka je X kontinuirana slučajna varijabla s funkcijom gustoće $f(x)$. **Očekivanje** u oznaci $E(X)$ definirano je s

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x) dx,$$

a **varijanca** u oznaci $Var(X)$ s

$$Var(X) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - E(X))^2 f(x) dx$$

ako nepravi integrali konvergiraju.

Varijancu često puta zapisujemo u alternativnom obliku koji je pogodniji za računanje

$$Var(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - (E(X))^2 = E(X^2) - (E(X))^2$$

Za diskretne slučajne varijable izraz za očekivanje je nešto jednostavniji

$$E(X) = \sum_x xP(X=x) = \sum_i x_i P(X=x_i) = \sum_i x_i p_i,$$

na sličan način definicija varijance $Var(X) = E(X^2) - (E(X))^2$ vrijedi u nepromijenjenom obliku i za diskretne slučajne varijable. Potrebno je napomenuti da očekivanje **ne** predstavlja najvjerojatniju vrijednost za slučajnu varijablu X , štoviše, očekivanje čak ne mora biti događaj iz vjerojatnosnog prostora gdje je X definirana. Najbolje to možemo vidjeti na primjeru bacanja “fer” kockice.

Primjer 2.1.6 (Bacanje kockice). Slučajna varijabla koja opisuje bacanje kockice definirana je na skupu $\Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$. Vjerojatnost svakog ishoda iz Ω je jednaka te iznosi $P(X=x) = \frac{1}{6}, x \in \Omega$. Očekivanje od X iznosi

$$E(X) = \sum_{i=1}^6 iP(X=i) = \sum_{i=1}^6 i \frac{1}{6} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 i = \frac{1}{6} 21 = 3,5$$

gdje vidimo da očekivanje nije događaj iz Ω .

Međutim, vrijednost očekivanja je važna za određivanje zbroja ishoda u ponovljenim pokusima. Naime, zbroj ishoda za n ponavljanja pokusa kod slučajne varijable biti će približno

jednak $nE(X)$, što je posljedica linearnosti očekivanja.

Teorem 2.5 (Linearnost očekivanja). Neka su X, Y slučajne varijable s konačnim očekivanjem definirane na istom vjerojatnosnom prostoru, te neka su $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ realni brojevi. Slučajna varijabla $\alpha X + \beta Y$ također ima konačno očekivanje i vrijedi

$$E(\alpha X + \beta Y) = \alpha E(X) + \beta E(Y)$$

Dokaz. Dokaz proizlazi iz apsolutne konvergencije očekivanja za slučajne varijable, pogledati primjerice, [13]. Q.E.D.

Neposredna posljedica linearnosti očekivanja je sljedeći korolar, koji je važan za izgradnju strukturne funkcije sustava u teoriji pouzdanosti.

Korolar 2.2 (Očekivanje zbroja slučajnih varijabli). Neka su $X_1, \dots, X_n$ slučajne varijable s konačnim očekivanjem definirane na istom vjerojatnosnom prostoru. Tada vrijedi

$$E\left(\sum_{i=1}^n X_i\right) = \sum_{i=1}^n E(X_i)$$

Dokaz. Dokaz provodimo indukcijom. Za $n = 2$ tvrdnja vrijedi prema teoremu 2.5. Pretpostavimo da tvrdnja vrijedi za $n = N$, tj. vrijedi

$$E\left(\sum_{i=1}^N X_i\right) = \sum_{i=1}^N E(X_i)$$

Sada za $n = N + 1$ imamo

$$\begin{aligned} E\left(\sum_{i=1}^{N+1} X_i\right) &= E\left(X_{N+1} + \sum_{i=1}^N X_i\right) = \text{teorem 2.5} = \\ &= E(X_{N+1}) + E\left(\sum_{i=1}^N X_i\right) = \text{pretpostavka indukcije} = \\ &= E(X_{N+1}) + \sum_{i=1}^N E(X_i) = \sum_{i=1}^{N+1} E(X_i) \end{aligned}$$

Q.E.D.

Očekivanje zadovoljava svojstvo linearnosti za bilo koji skup slučajnih varijabli, međutim za varijancu linearnost vrijedi samo ako su slučajne varijable nezavisne. Intuitivno, varijancu smatramo mjerom disperzije slučajne varijable u okolini očekivanja.

2.2 Teorija pouzdanosti

2.2.1 Model sustava

Osnovna zadaća određivanja strukturne funkcije sustava sastoji se u određivanju veza između osnovnih elemenata, koji čine sastavne dijelove sustava. Smatramo da je *komponenta* dio sustava za koju ne razmatramo sastavne dijelove već podrazumijevamo obavljanje elementarne funkcije unutar sustava. Drugim riječima, osnovne komponente u sustavu promatramo s funkcionalne točke gledišta, važna nam je njena funkcija za sustav a ne sastavni dijelovi. Osnovni elementi teorije pouzdanosti sadržani su u knjigama [16],[17] te ih ovdje primjenjujemo na sustave u kojima promatramo radni status komponenti. Za formiranje modela stabla kvara dovoljno je poznavanje funkcionalnog stanja komponente $\{radi, ne\ radi\}$ koji možemo opisati jednostavnom binarnom varijablom za svaku komponentu.

Definicija 2.22 (*Indikatorska varijabla*). Indikatorska varijabla za stanje i -te komponente K_i definirana je:

$$x_i = \begin{cases} 1, & i\text{-ta komponenta radi} \\ 0, & i\text{-ta komponenta ne radi} \end{cases}$$

Adekvatno, stanje nekog sustava možemo predstaviti vektorom od n indikatorskih varijabli za stanje svake komponente.

Definicija 2.23 (*Vektor stanja*). Neka su $\{x_i: i = 1, \dots, n\}$ indikatorske varijable za komponente sustava. Stanje sustava definirano je vektorom

$$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$$

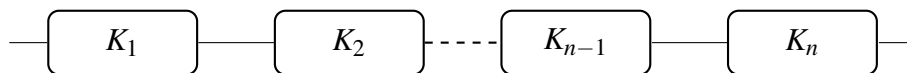
koji nazivamo **vektor stanja** sustava.

U daljnjim razmatranjima korisna je sljedeća standardna definicija za usporedbu dvaju vektora.

Definicija 2.24 (*Usporedba vektora*). Neka su $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ i $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)$ dva vektor stanja istog sustava. Za vektore $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ vrijedi:

- $\mathbf{x} = \mathbf{y}$ ako vrijedi $x_i = y_i, \forall i = 1, \dots, n$
- $\mathbf{x} < \mathbf{y}$ ako vrijedi $x_i \leq y_i, \forall i = 1, \dots, n$, i barem za jedan i vrijedi $x_i < y_i$

Nadalje, pretpostavljamo da je funkcionalno stanje sustava u potpunosti određeno vektorom stanja. Sada možemo definirati funkciju na vektoru stanja koja nam pokazuje funkcionalno stanje sustava.



Slika 2.2: Model serijskog sustava

Definicija 2.25 (*Strukturna funkcija*). Neka je $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ vektor stanja sustava od n komponenti. Funkciju $\Phi: \mathbf{B}^n \rightarrow \mathbf{B}$ nazivamo *strukturna funkcija* sustava ako vrijedi

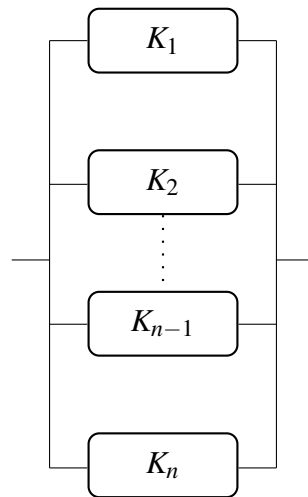
$$\Phi(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \text{sustav radi} \\ 0, & \text{sustav ne radi} \end{cases}$$

Za primjer možemo definirati funkciju strukture za različite oblike veza između komponenti u sustavu, npr. serijska, paralelna, mješovita serijsko-paralelna veza, itd. Slika 2.2 nam pokazuje primjer sustava s komponentama sa serijskim modelom povezivanja.

Primjer 2.2.1 (*Serijski sustav*). Neka je $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ vektor stanja sustava od n komponenti koje su vezane u seriji. Tada je funkcija strukture takvog sustava dana izrazom

$$\Phi(\mathbf{x}) = \min(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n x_i$$

Možemo reći, tvrdnja sustav serijski vezanih komponenti *radi* ekvivalentna je tvrdnji rade *sve* komponente serijskog sustava.



Slika 2.3: Model paralelnog sustava

Paralelno povezanim komponentama u sustavu osiguravamo redundanciju u radu, tj. imamo sustav koji *radi* ako barem *jedna* komponenta u sustavu radi. Na slici 2.3 vidimo model paralelnog sustava. Takav tip veze možemo predstaviti sljedećom funkcijom strukture.

Primjer 2.2.2 (Paralelni sustav). Neka je $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ vektor stanja sustava od n paralelno vezanih komponenti. Tada je funkcija strukture takvog sustava dana izrazom

$$\Phi(\mathbf{x}) = \max(x_1, \dots, x_n)$$

Primijetimo da korištenjem jednakosti

$$\max(x_1, \dots, x_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i)$$

strukturnu funkciju za paralelni sustav možemo zapisati u sljedećem obliku

$$\Phi(\mathbf{x}) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i)$$

Generalizacija serijskog i paralelnog povezivanja komponenti dana je sustavom od n komponenti koji radi ako barem k komponenti sustava radi. Takve sustave nazivamo k/n sustavima, pri čemu vrijedi $1 \leq k \leq n$.

Primjer 2.2.3 (k/n sustav). Neka je $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ vektor stanja sustava. Funkcija strukture k/n sustava je dana izrazom

$$\Phi(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \text{ako vrijedi } \sum_{i=1}^n x_i \geq k \\ 0, & \text{ako vrijedi } \sum_{i=1}^n x_i < k \end{cases}$$

Uočimo da serijski i paralelni sustav predstavljaju rubne slučajeve za model k/n sustava. Naime, serijski sustav je primjer n/n modela, a paralelni je primjer $1/n$ modela.

Klasifikacija sustava

Pomoću svojstava strukturne funkcije možemo dodatno klasificirati sustave. Primjerice, rast strukturne funkcije nam određuje klasu sustava koju nazivamo *monotonim* sustavima.

Definicija 2.26 (*Monotoni sustav*). Neka je $\Phi(\mathbf{x})$ strukturna funkcija sustava S , i neka su $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ vektori stanja za sustav S . Kažemo, sustav S je *monoton* ako vrijedi:

- sustav ne radi, ako sve komponente ne rade

$$\Phi(0, \dots, 0) = 0,$$

- sustav radi, ako sve komponente rade

$$\Phi(1, \dots, 1) = 1,$$

- strukturna funkcija je rastuća funkcija

$$\mathbf{x} \leq \mathbf{y} \implies \Phi(\mathbf{x}) \leq \Phi(\mathbf{y})$$

Iz strukturne funkcije možemo jednostavno odrediti komponente koje utječu i one koje ne utječu na rad sustava. Komponente koje utječu na rad sustava nazivamo *važnim* komponentama, odnosno *nevažnim* komponentama ako ne utječu na rad sustava.

Definicija 2.27 (*Važne komponente*). Neka je $\mathbf{x}$ vektor stanja, te neka je $\Phi(\mathbf{x})$ strukturna funkcija za sustav S . Za komponentu $K_i \in S$ kažemo da je *važna* ako vrijedi

$$\Phi(\mathbf{x}; 1_i) - \Phi(\mathbf{x}; 0_i) = 1,$$

uz konvenciju $(\mathbf{x}; 0_i) = (x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$, te analogno za $(\mathbf{x}; 1_i)$.

Za određivanje važnih i nevažnih komponenti možemo koristiti jednostavan test promjene vrijednosti strukturne funkcije kod promjene statusa komponente. Naime, za nevažne komponente $K_i \in S$ vrijedi

$$\Phi(\mathbf{x}; 1_i) = \Phi(\mathbf{x}; 0_i) \quad \forall \mathbf{x}$$

Propozicija 2.4. Neka je S sustav od n nezavisnih komponenata, tada je S monoton sustav.

Dokaz. Budući se radi o nezavisnim komponentama, možemo bez smanjenja općenitosti reći da su sve komponente važne. Dakle vrijedi

$$\Phi(\mathbf{x}; 1_i) - \Phi(\mathbf{x}; 0_i) = 1$$

tj. $\Phi(\mathbf{x})$ je rastuća funkcija za svaku komponentu. Iz ovoga neposredno proizlazi da je strukturna funkcija rastuća, čime je propozicija dokazana. Q.E.D.

Sustavi koji sadrže samo važne komponente nazivaju se koherentnim¹¹ sustavima.

Definicija 2.28 (*Koherentni sustav*). Za monoton sustav S kažemo da je *koherentan* ako sadrži samo važne komponente.

Koherentni sustavi su nam važni za modeliranje pomoću stabla kvara, budući se kod njih u istom modelu ne pojavljuje osnovni događaj i njegova negacija.

2.2.2 Minimalne putanje i presjeci

Često puta nas zanima uz koje kombinacije stanja komponenti sustav radi ili ne radi, primjerice, koje komponente moraju raditi da bi cijeli sustav funkcionirao. Uz vektor stanja sustava blisko je vezan pojam *vektora putanje* i *vektora presjeka* sustava pomoću kojih možemo odgovoriti na takva ili slična pitanja. Naime, vektor putanje nam pokazuje komponente čije funkcioniranje osigurava rad cjelokupnog sustava. Analogno, vektor presjeka nam pokazuje uz koju kombinaciju komponenti koje ne rade, sustav prestaje funkcionirati. Karakterizaciju vektora putanje i vektora presjeka donosimo u sljedećoj definiciji

Definicija 2.29. Neka je $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ vektor stanja sustava. Kažemo da je vektor $\mathbf{x}$

- *vektor putanje* ako vrijedi $\Phi(\mathbf{x}) = 1$,
- *vektor presjeka* ako vrijedi $\Phi(\mathbf{x}) = 0$

Prema definiciji 2.24 vektore stanja jednog sustava možemo uspoređivati primjenom standardne definicije za usporedbu dvaju vektora. Definicija 2.24 nam određuje kriterij pomoću kojega možemo odrediti *minimalne* vektore putanje i presjeka. Naime, vrijedi

Definicija 2.30. Neka su $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ i $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)$ dva vektor stanja istog sustava. Za vektor $\mathbf{x}$ kažemo da je:

- *minimalni vektor putanje*, ako je $\mathbf{x}$ vektor putanje te vrijedi $\Phi(\mathbf{y}) = 0, \forall \mathbf{y} < \mathbf{x}$
- *minimalni vektor presjeka*, ako je $\mathbf{x}$ vektor presjeka te vrijedi $\Phi(\mathbf{y}) = 1, \forall \mathbf{y} > \mathbf{x}$

¹¹**koherentan** (*lat. cohaerens, genitiv cohaerentis*: povezan, spojen), međusobno usklađen, suvisao; logički povezan, jasno izrečen. (izvor: Hrvatska enciklopedija)

Iz vektora stanja sustava prirodno dobivamo skupove koji sadrže komponente karakterizirane njihovim indikatorskim varijablama. Posebno se ističu skupovi nastali iz vektora putanje ili vektora presjeka.

Definicija 2.31 (*Minimalna putanja*). Neka je $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ vektor putanje za neki sustav S od n komponenti. Skup

$$P^S = \{K_i : x_i = 1\}$$

nazivamo *putanja* za sustav S . Ukoliko je vektor putanje $\mathbf{x}$ minimalan, skup P^S nazivamo *minimalna putanja* i označavamo s MP^S . Kada je jasno o kojem sustavu S se radi za minimalnu putanju koristimo oznaku MP .

Analogno, imamo definiciju za skupove presjeka i minimalnog presjeka.

Definicija 2.32 (*Minimalni presjek*). Neka je $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ vektor presjek za neki sustav S od n komponenti. Skup

$$C^S = \{K_i : x_i = 0\}$$

nazivamo *presjek* za sustav S . Ukoliko je vektor presjeka $\mathbf{x}$ minimalan, skup C^S nazivamo *minimalni presjek* i označavamo s MC^S . Slično definiciji minimalne putanje kada sustav S bude jednoznačno određen za minimalni presjek upotrebljavamo oznaku MC .

Za prethodne primjere sustava (serijski, paralelni, k/n) možemo odrediti skupove putanja i presjeka iz njihovih vektora stanja.

Primjer 2.2.4 (*Serijski sustav*). Iz uvjeta da sustav serijski vezanih komponenti radi ako i samo ako sve komponente sustava rade, direktno dobivamo njegov vektor putanje koji glasi:

$$\mathbf{x} = (1, \dots, 1)$$

Uočimo da je to minimalni vektor putanje za sustav serijski vezanih komponenti, budući nefunkcioniranje bilo koje komponente dovodi do nefunkcioniranja cijelog sustava. Jasno je također da je minimalni vektor putanje jedinstven odakle proizlazi da su putanja i minimalna putanja za serijski sustav jedinstveni skupovi te sadrže sve komponente sustava:

$$MP^S = P^S = \{K_i : i = 1, \dots, n\}$$

Svi ostali vektori stanja u serijskom sustavu su vektori presjeka budući barem za jednu indikatorsku varijablu vrijedi $x_i = 0$. Odavde proizlazi da imamo ukupno $2^n - 1$ različitih presjeka, od kojih je $n = \binom{n}{1}$ minimalnih u kojima je samo jedna indikatorska varijabla jednaka nuli $x_i = 0$, tj. ne radi samo jedna komponenta u sustavu.

Analognim razmatranjem dobijemo sljedeće rezultate za sustav s paralelno povezanim komponentama.

Primjer 2.2.5 (*Paralelni sustav*). Za sustav paralelno povezanih komponenti imamo sljedeće skupove putanja i presjeka:

- presjek je jedinstven skup te odgovara vektoru stanja $\mathbf{x} = (0, \dots, 0)$
- zbog jedinstvenosti presjeka određenog s $\mathbf{x}$ to je ujedno minimalni presjek
- putanje su svi ostali skupovi određeni vektorima stanja

$$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n) \mid \exists i \in \{1, \dots, n\} : x_i = 1$$

- minimalnih putanja ima n , jer su to sve putanje u kojima radi točno jedna komponenta

Sustav k/n povezanih komponenti možemo zamijeniti sustavom u kojem su paralelno povezani podsustavi formirani od točno k različitih komponenti povezanih u seriji. Shodno tome, sličnim razmatranjima u prethodnim primjerima imamo:

Primjer 2.2.6 (k/n sustav). Putanje i presjeka za k/n sustava možemo odrediti na sljedeći način:

- putanje su skupovi svih kombinacija komponenti od kojih barem k radi
- minimalne putanje su skupovi svih kombinacija komponenti od kojih točno k radi, takvih skupova ima točno $\binom{n}{k}$ različitih kombinacija
- presjeci su skupovi svih kombinacija komponenti od kojih najviše $k - 1$ radi
- minimalni presjeci su skupovi svih kombinacija komponenti od kojih $n - k + 1$ ne radi, takvih skupova ima točno $\binom{n}{n-k+1}$

Budući su minimalne putanje i minimalni presjeci skupovi određeni minimalnim vektorima putanje i presjeka, za njih možemo definirati indikatorske funkcije koje nam pokazuju status pomoću statusa svih komponenti iz minimalne putanje ili minimalnog presjeka.

Definicija 2.33 (*Indikatorska funkcija*). Neka je $\{MP_1^S, \dots, MP_k^S\}$ skup svih minimalnih putanja, te $\{MC_1^S, \dots, MC_l^S\}$ skup svih minimalnih presjeka za neki sustav S . Za njih možemo definirati indikatorsku funkciju na sljedeći način:

- Indikatorska funkcija za j -tu minimalnu putanju glasi

$$\alpha_j(\mathbf{x}) = \min_{i \in MP_j^S} x_i = \prod_{i \in MP_j^S} x_i$$

- Indikatorska funkcija za j -ti minimalni presjek glasi

$$\beta_j(\mathbf{x}) = \max_{i \in MC_j^S} x_i = 1 - \prod_{i \in MC_j^S} (1 - x_i)$$

Očekivano iz definicije imamo, za indikatorsku funkciju minimalnih putanja vrijedi $\alpha_j(\mathbf{x}) = 1$ ako sve komponente iz j -te minimalne putanje rade, inače je njena vrijednost 0. Također imamo za indikatorsku funkciju minimalnih presjeka $\beta_j(\mathbf{x}) = 0$ ako sve komponente iz j -tog minimalnog presjeka ne rade, inače je njena vrijednost 1. Sada možemo pomoću indikatorskih funkcija za minimalne putanje ili presjeke izračunati vrijednost funkcije strukture sustava.

Propozicija 2.5. Neka je $\{MP_1^S, \dots, MP_k^S\}$ skup svih minimalnih putanja za sustav S koji se sastoji od n komponenti. Strukturna funkcija sustava dana je izrazom

$$\Phi(\mathbf{x}) = \max_j \alpha_j(\mathbf{x}) = \max_j \prod_{i \in MP_j^S} x_i$$

Analogno, pomoću skupa svih minimalnih presjeka $\{MC_1^S, \dots, MC_l^S\}$ strukturnu funkciju sustava možemo zapisati u obliku

$$\Phi(\mathbf{x}) = \prod_{j=1}^k \beta_j(\mathbf{x}) = \prod_{j=1}^k \max_{i \in MC_j^S} x_i$$

Dokaz. Pretpostavimo da sustav radi, tada postoji vektor stanja za koji vrijedi $\Phi(\mathbf{x}) = 1$, odakle prema definiciji 2.29 proizlazi da je $\mathbf{x}$ vektor putanje. Prema definiciji 2.32 vektor putanje definira jednu putanju $P^S = \{i : x_i = 1\}$. Iz skupa $\{MP_1^S, \dots, MP_k^S\}$ odaberimo minimalnu putanju MP_j^S za koju vrijedi $P^S \cap MP_j^S = MP_j^S$. Sada imamo

$$\prod_{i \in P_j^S} x_i = 1 \implies \max_j \prod_{i \in MP_j^S} x_i = \max_j \prod_{i \in P_j^S} x_i = 1$$

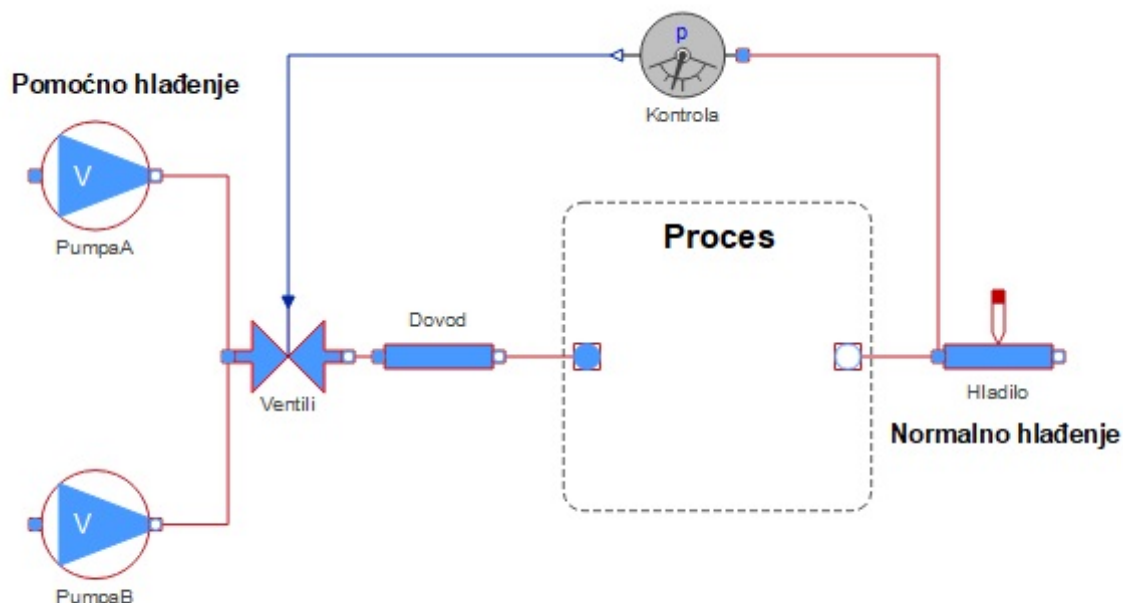
Suprotni smjer je nešto jednostavniji. Naime, pretpostavimo da postoji barem jedna minimalna putanja gdje su sve komponente koje rade, primjerice MP_j^S . Za tu minimalnu putanju prema definiciji 2.30 određen je vektor putanje $\mathbf{x}_j$ za koji vrijedi

$$\Phi(\mathbf{x}_j) = 1$$

Analognim razmatranjem možemo dokazati drugi dio propozicije za oblik strukturne funkcije kod minimalnih presjeka. Q.E.D.

Iz propozicije 2.5 vidimo da sustav radi ako i samo ako rade sve komponente iz barem jedne minimalne putanje, tj. imamo:

$$\Phi(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & \forall j: \alpha_j(\mathbf{x}) = 0 \\ 1, & \exists j: \alpha_j(\mathbf{x}) = 1 \end{cases}$$



Slika 2.4: Pojednostavljena shema sustava hlađenja u NEK

Analogno proizlazi iz propozicije 2.5, sustav ne radi ako i samo ako ne rade sve komponente iz barem jednog minimalnog presjeka, pa imamo:

$$\Phi(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & \exists j: \beta_j(\mathbf{x}) = 0 \\ 1, & \forall j: \beta_j(\mathbf{x}) = 1 \end{cases}$$

Za primjer definiranja strukturne funkcije sustava iz nuklearne elektrane možemo uzeti značajno pojednostavljen sustav hlađenja vodom reaktora nuklearne elektrane, primjerice Krško 1.1 ima sličan sustav hlađenja koji se sastoji od normalnog i pomoćnog sustava hlađenja.

Primjer 2.2.7 (Sustav hlađenja NEK). Pojednostavljeni sustav hlađenja u NEK elektrani možemo predstaviti sa sljedećim komponentama: pumpe, ventili, dovod normalnog hlađenja, kontrolna i upravljačka logika te brojni drugi elementi. Shematski prikaz pojednostavljenog sustava bez ulaženja u detalje pojedinih elemenata vidimo na slici 2.4. Uvedimo indikatorske varijable za dijelove sustava prema nazivima elemenata na slici:

- “PumpaA” – pumpa za pomoćno hlađenje (x_1)
- “PumpaB” – pumpa za pomoćno hlađenje (x_2)
- “Ventil” – ventil za puštanje barem jedne pumpe iz pomoćnog hlađenja (x_3)
- “Dovod” – dovod iz pomoćnog hlađenja (x_4)
- “Kontrola” – kontrolna logika (x_5)
- “Hladilo” – normalno hlađenje (x_6)

Tada funkciju strukture sustava možemo zapisati u ovom obliku

$$\Phi(\mathbf{x}) = \min \{x_5, \max \{x_6, \min \{x_3, x_4, \max \{x_1, x_2\}\}\}\}$$

Za ispravan rad sustava hlađenja iz strukturne funkcije vidimo da su potrebni kontrolna logika, te normalno hlađenje ili pomoćni sustav hlađenja. Naime, iz analize strukturne funkcije proizlazi

1. ako nije ispravna kontrolna logika, tada vrijedi

$$x_5 = 0 \implies \min \{0, \dots\} = 0 \implies \Phi(\mathbf{x}) = 0$$

2. ako je ispravna kontrolna logika, tada vrijedi

$$x_5 = 1 \implies \Phi(\mathbf{x}) = \max \{x_6, \min \{\dots\}\}$$

zaključujemo da mora raditi barem jedan sustav hlađenja. Drugim riječima, x_6 određuje stanje normalnog hlađenja dok $\min \{x_3, x_4, \max \{x_1, x_2\}\}$ predstavlja stanje pomoćnog sustava hlađenja

3. sličnim razmatranjima iz $\min \{x_3, x_4, \max \{x_1, x_2\}\}$ proizlazi da je za ispravnost pomoćnog sustava hlađenja potreban ispravan dovod, ispravan ventil za puštanje pumpi, te barem jedna pomoćna pumpa

Pomoću strukturne funkcije sustava možemo analizirati pouzdanost tehničkog sustava, te druge sigurnosne pokazatelje, što će biti pokazano u ostatku rada.

2.2.3 Pouzdanost sustava

Prilikom formiranja strukturne funkcije sustava, za komponente nam je važno funkcionalno stanje $\{radi, ne\ radi\}$. Međutim, nismo u mogućnosti predvidjeti prelazak komponente iz stanja *radi* u stanje *ne radi*, jer se može dogoditi u bilo kojem trenutku. Iz tog razloga možemo funkcionalno stanje proizvoljne komponente K_i smatrati slučajnom varijablom X_i koja je određena nekom funkcijom distribucije. U najjednostavnijem slučaju kada nas zanima samo funkcionalno stanje komponente, slučajna varijabla odgovara Bernoulijevoj slučajnoj varijabli. Shodno tome imamo

Definicija 2.34 (*Pouzdanost komponente*). Funkcionalno stanje komponente $K_i \in S$ nekog sustava S , određeno je Bernoulijevom 2.18 slučajnom varijablom $X_i \sim B(1, p_i)$ za koju vrijedi:

- $P(X_i = 1) = p_i$, gdje je p_i vjerojatnost da komponenta *radi*
- $P(X_i = 0) = 1 - p_i$, vjerojatnost da komponenta *ne radi*

Vjerojatnost p_i da komponenta radi nazivamo *pouzdanost* K_i komponente, te ju ponekad nazivamo pouzdanost i -te komponente kada nam nije bitan naziv same komponente a njezina pozicija u nekom redosljedu je određena i poznata.

Potrebno je napomenuti, kako je poznavanje pouzdanosti neke komponente zahtjevan zadatak, koji u većini slučajeva ne možemo precizno riješiti. U takvim slučajevima pristupa se procjeni zasnovanoj na statističkim pokazateljima za serije istovrsnih komponentenata. Drugim riječima, pristupamo “a posteriori” procjeni vjerojatnosti određenoj relativnim frekvencijama događaja $\{radi, ne\ radi\}$, uz uvjet statističke stabilnosti relativnih frekvencija. Svojstvo statističke stabilnosti jest to što se prilikom višestrukog ponavljanja pokusa, relativne frekvencije događaja grupiraju u okolini nekog broja iz segmenta $[0, 1]$.

Pojam pouzdanosti komponente možemo proširiti na pouzdanost sustava. Prirodno proširenje pojma slučajne varijable za jednu komponentu je pojam slučajnog vektora za sustav. Prema definiciji 2.25 funkcionalno stanje sustava možemo odrediti pomoću strukturne funkcije sustava izračunate na vektoru stanja. U vektoru stanja $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ za svaku komponentu K_i imamo odgovarajuće stanje varijable x_i koje je određeno vrijednošću Bernoulijeve slučajne varijable X_i . Slučajni vektor

$$\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_n)$$

opisuje sve moguće vektore stanja $\mathbf{x} \in \mathbf{B}^n$ što nam pokazuje da je strukturna funkcija zapravo definirana na slučajnom vektoru $\mathbf{X}$. Odavde proizlazi definicija

Definicija 2.35 (*Pouzdanost sustava*). Neka je sustav S određen strukturnom funkcijom $\Phi : \mathbf{B}^n \rightarrow \mathbf{B}$. Realan broj

$$r = P\{\Phi(\mathbf{X}) = 1\}, r \in [0, 1]$$

definiran na slučajnom vektoru $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_n)$ gdje su X_i Bernoulijeve slučajne varijable, nazivamo *pouzdanost sustava*.

U praktičnoj primjeni pretpostavljamo nezavisnost komponenti sustava, iz koje proizlazi nezavisnost slučajnih varijabli X_i . Uobičajeno je pouzdanost sustava odrediti pomoću funkcije definirane na pouzdanostima komponentenata.

Definicija 2.36 (*Funkcija pouzdanosti*). Neka je funkcionalno stanje sustava S određeno slučajnim vektorom $\mathbf{X}(X_1, \dots, X_n)$, gdje su X_i Bernoulijeve slučajne varijable. Funkciju

$$r: [0, 1]^n \rightarrow [0, 1]$$

nazivamo *funkcija pouzdanosti sustava*.

Skraćeno pišemo za sustav s n nezavisnih komponentenata

$$r = r(\mathbf{p}), \mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n)$$

gdje je $p_i, i = 1, \dots, n$ pouzdanost i -te komponente. Budući strukturna funkcija poprima vrijednosti iz skupa $\{0, 1\}$, te se računa iz slučajnog vektora zaključujemo da je $\Phi(\mathbf{X})$ također Bernoulijeva slučajna varijabla. Odatle proizlazi, funkciju pouzdanosti možemo izračunati pomoću očekivane vrijednosti strukturne funkcije.

$$r(\mathbf{p}) = P\{\Phi(\mathbf{X}) = 1\} = E[\Phi(\mathbf{X})]$$

Primjer 2.2.8 (Serijski sustav). Funkciju pouzdanosti za serijski sustav od n nezavisnih komponenata možemo odrediti iz strukturne funkcije na sljedeći način

$$\begin{aligned} r(\mathbf{p}) &= P\{\Phi(\mathbf{X}) = 1\} = E[\Phi(\mathbf{X})] \\ &= E\left[\prod_{i=1}^n X_i\right] = (X_i \text{ su nezavisne}) \\ &= \prod_{i=1}^n E[X_i] \\ &= \prod_{i=1}^n p_i \end{aligned}$$

Primjer 2.2.9 (Paralelni sustav). Na sličan način možemo odrediti funkciju pouzdanosti za paralelni sustav od n nezavisnih komponenti

$$\begin{aligned} r(\mathbf{p}) &= P\{\Phi(\mathbf{X}) = 1\} = E[\Phi(\mathbf{X})] \\ &= E\left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - X_i)\right] = (X_i \text{ su nezavisne}) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n E[1 - X_i] \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - E[X_i]) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \end{aligned}$$

Za k/n sustav funkciju pouzdanosti možemo pojednostavniti uz pretpostavku da se radi o istovrsnim komponentama s jednakom pouzdanošću. Korištenjem definicije strukturne funkcije k/n sustava iz primjera 2.2.3 imamo

$$\Phi(\mathbf{X}) = \begin{cases} 1, & \text{ako vrijedi } \sum_{i=1}^n X_i \geq k \\ 0, & \text{ako vrijedi } \sum_{i=1}^n X_i < k \end{cases}$$

Budući su X_i Bernoulijeve slučajne varijable za komponente s jednakom pouzdanošću, znamo da je $Y = \sum_{i=1}^n X_i$ slučajna varijabla s binomnom razdiobom, tj. vrijedi $Y \sim B(n, p)$. Odavde dobijemo funkciju pouzdanosti za k/n sustav.

Primjer 2.2.10 (k/n sustav). Funkcija pouzdanosti za takav sustav glasi

$$\begin{aligned} r(\mathbf{p}) &= P\{\Phi(\mathbf{X}) = 1\} \\ &= P\left\{\sum_{i=1}^n X_i \geq k\right\} \\ &= P\{Y \geq k\} = (Y \text{ je binomna slučajna varijabla}) \\ &= \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} p^{n-i} (1-p)^i \end{aligned}$$

Za sustave izgrađene od nezavisnih komponenti funkcija pouzdanosti je rastuća funkcija. Naime, vrijedi

Propozicija 2.6. Neka je $r(\mathbf{p})$ funkcija pouzdanosti sustava S od n nezavisnih komponenti, tada je $r(\mathbf{p})$ rastuća funkcija od $\mathbf{p}$.

Dokaz. Prema propoziciji 2.4 sustav S je monoton, te znamo da je njegova strukturna funkcija rastuća. S druge strane za funkciju pouzdanosti sustava vrijedi

$$\begin{aligned} r(\mathbf{p}) &= E[\Phi(\mathbf{X})] \\ &= p_i E[\Phi(\mathbf{X}) | X_i = 1] + (1 - p_i) E[\Phi(\mathbf{X}) | X_i = 0] \\ &= p_i E[\Phi(\mathbf{X}; 1_i)] + (1 - p_i) E[\Phi(\mathbf{X}; 0_i)] \\ &= p_i (E[\Phi(\mathbf{X}; 1_i)] - E[\Phi(\mathbf{X}; 0_i)]) + E[\Phi(\mathbf{X}; 0_i)] \\ &= p_i E[\Phi(\mathbf{X}; 1_i) - \Phi(\mathbf{X}; 0_i)] + E[\Phi(\mathbf{X}; 0_i)] \end{aligned}$$

Tvrdnja neposredno proizlazi iz pozitivnosti očekivanja za Bernoulijevu slučajnu varijablu i monotonosti strukturne funkcije za svaku komponentu. Q.E.D.

Poznavanje minimalnih putanja ili minimalnih presjeka ili oboje omogućava nam određivanje pouzdanosti sustava te ocjenu granica za njenu vrijednost. Osnovno pravilo koje koristimo za ocjenu granica nam je dano u korolaru 2.1, gdje smo odredili vjerojatnost unije događaja. Korolar 2.1, možemo primijeniti na skupovima minimalnih putanja i presjeka na sljedeći način.

Neka imamo skup

$$MPS = \{MP_1^S, \dots, MP_k^S\}$$

svih minimalnih putanja. Na tom skupu možemo definirati događaja

$$A_i = \{X_j = 1 : K_j \in MP_i^S\}$$

drugim riječima, događaj A_i znači da sve komponente iz MP_i^S rade. Prema definiciji, sustav *radi* ako nastupi barem jedan A_i , drugim riječima, pouzdanost sustava možemo odrediti preko vjerojatnosti unije A_i događaja. Vrijedi,

$$r(\mathbf{p}) = P(\cup_i A_i)$$

Primjenimo li korolar 2.1 na desnoj strani jednakosti dobit ćemo sljedeću formulu

$$r(\mathbf{p}) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i < j} P(A_i \cap A_j) + \sum_{i < j < k} P(A_i \cap A_j \cap A_k) - \dots + (-1)^{n+1} P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) \quad (2.2)$$

Budući je vjerojatnost normirana mjera 2.10, na desnoj strani jednakosti sve su sume pozitivne. To nam pokazuje da na desnoj strani jednakosti 2.2 imamo niz s alterniranim članovima, iz kojeg proizlaze sljedeće nejednakosti za ocjenu pouzdanosti

$$r(\mathbf{p}) \leq \sum_i P(A_i) \quad (\text{I})$$

$$r(\mathbf{p}) \geq \sum_i P(A_i) - \sum_{i < j} P(A_i \cap A_j) \quad (\text{II})$$

$$r(\mathbf{p}) \leq \sum_i P(A_i) - \sum_{i < j} P(A_i \cap A_j) + \sum_{i < j < k} P(A_i \cap A_j \cap A_k) \quad (\text{III})$$

U praktičnoj primjeni često puta se koriste prve tri nejednakosti na djelomičnom skupu minimalnih putanja, tada kažemo da koristimo aproksimaciju I-og, II-og, ili III-eg reda. Primitimo, za ocjenu pouzdanosti iz potpunog skupa minimalnih putanja, aproksimacija prvog reda daje gornju granicu, drugog reda daje donju granicu, trećeg reda daje ponovno gornju granicu.

Na sličan način iz minimalnih presjeka možemo dobiti intervale za ocjenu pouzdanosti. Neka je

$$MCS = \{MC_1^S, \dots, MC_l^S\}$$

skup svih minimalnih presjeka. Na tom skupu možemo definirati događaj

$$B_i = \{X_j = 0: K_j \in MC_i^S\}$$

jednostavnije, definiramo događaj “sve komponente iz MC_i^S ne rade.” Prema definiciji, sustav *ne radi* ako nastupi barem jedan B_i , drugim riječima, vjerojatnost da sustav ne radi možemo odrediti preko vjerojatnosti unije B_i događaja. Vrijedi,

$$1 - r(\mathbf{p}) = P(\cup_i B_i)$$

odakle primjenom korolara 2.1 proizlazi

$$1 - r(\mathbf{p}) = \sum_i P(B_i) - \sum_{i < j} P(B_i \cap B_j) + \sum_{i < j < k} P(B_i \cap B_j \cap B_k) - \dots + (-1)^{n+1} P\left(\bigcap_{i=1}^n B_i\right) \quad (2.3)$$

Budući vrijedi

$$P(B_i) = \prod_{X_l \in B_i} (1 - p_l)$$

dok iz definicije događaja B_i, B_j sljedi

$$B_i \cap B_j = \{X_l = 0 : K_l \in MC_i^S \vee K_l \in MC_j^S\} = \{X_l = 0 : K_l \in MC_i^S \cup MC_j^S\}$$

odakle proizlazi

$$P(B_i \cap B_j) = \prod_{X_l \in B_i \cup B_j} (1 - p_l)$$

te analogni izrazi za ostale članove alternirajućeg reda. Sređivanjem te uvrštenjem u red 2.3 dobijemo sljedeće nejednakosti iz kojih proizlaze aproksimacije prvog, drugog, trećeg ili viših redova za pouzdanost sustava.

$$r(\mathbf{p}) \geq 1 - \sum_i \left(\prod_{X_l \in B_i} (1 - p_l) \right) \quad (I)$$

$$r(\mathbf{p}) \leq 1 - \sum_i \left(\prod_{X_l \in B_i} (1 - p_l) \right) + \sum_{i < j} \left(\prod_{X_l \in B_i \cup B_j} (1 - p_l) \right) \quad (II)$$

$$r(\mathbf{p}) \geq 1 - \sum_i \left(\prod_{X_l \in B_i} (1 - p_l) \right) + \sum_{i < j} \left(\prod_{X_l \in B_i \cup B_j} (1 - p_l) \right) - \sum_{i < j < k} \left(\prod_{X_l \in B_i \cup B_j \cup B_k} (1 - p_l) \right) \quad (III)$$

Varijante navedenih aproksimacija tipično se koriste u konvencionalnim programima [18] na ograničenom skupu minimalnih presjeka stabla kvara.

2.3 Stablo kvara

U prethodnom potpoglavlju definirali smo pouzdanost tehničkog sustava upotrebom jakog aparata teorije vjerojatnosti te smo pokazali da poznavanjem strukturne funkcije sustava možemo izračunati pouzdanost sustava iz pouzdanosti komponenata i obrnuto. Funkcionalno stanje komponenata promatrali smo uz pretpostavku stohastičke nezavisnosti promjene stanja drugih komponenata. U stvarnosti stohastička nezavisnost komponenata je aproksimacija, budući se često susrećemo sa situacijom, da se određeni događaji, koji uzrokuju nefunkcioniranje jedne komponente, propagiraju na druge komponente (npr. požar, potres, ...). Pouzdanost tehničkog sustava najčešće nismo u mogućnosti izmjeriti, zbog čega je potrebno razviti računske pristupe

za određivanje parametara pouzdanosti. Najčešće razlikujemo dva pristupa problemu:

- *negativistički pristup* – tražimo odgovor na pitanje “Kada je sustav u kvaru?”
- *pozitivistički pristup* – tražimo odgovor na pitanje “Kada sustav funkcionira?”

Na oba pitanja možemo odgovoriti upotrebom odgovarajućih računskih tehnika koje proizlaze iz strukturne funkcije sustava korištenjem logičkih formula i zakona vjerojatnosti. Karakteristične tehnike koje se primjenjuju za pozitivistički pristup zasnivaju se na korištenju blok dijagrama pouzdanosti (skr. **RBD**¹²) i mogu se detaljnije proučiti u literaturi [19]. Tipični parametri koje promatramo kod takvog pristupa određeni su dostupnošću komponente i predstavljaju se minimalnim putanjama. Drugi pristup, koji ćemo koristiti u ovom radu, zasniva se na korištenju tehnike stabla kvara za opisivanje događaja koji dovode do nefunkcioniranja sustava. Parametri koje promatramo kod stabla kvara određuju se iz vjerojatnosti kvara (mogu biti različiti) komponente te se uobičajeno predstavljaju minimalnim presjecima.

Moguća je konverzija između modela blok dijagrama i stabla kvara.

2.3.1 Struktura stabla

Polazna pretpostavka za izgradnju stabla kvara je vršni događaj¹³ koji predstavlja nefunkcionalno stanje razmatranog sustava. Formiranje stabla kvara provodi se deduktivnom analizom vršnog događaja te formiranjem prijelaznih događaja¹⁴ do nivoa osnovnih događaja¹⁵. Primjećujemo da se prilikom formiranja stabla kvara postavljaju dva cilja:

- sustavno određivanje uzroka te razrada događaja koji dovode do vršnog događaja,
- kad je moguće, izračun vjerojatnosti vršnog događaja.

Tipičan slijed koraka koji provodimo tijekom izgradnje stabla kvara sastoji se od:

Definiranja vršnog događaja

Kod određivanja vršnog događaja u pravilu razmatramo događaje koji vode prema nefunkcioniranju sustava. Osobito pažnju posvećujemo događajima kao što je manjak funkcionalnosti koji vodi prema kvaru cijelog sustava, primjerice, gubitak hlađenja

Deduktivne analize vršnog događaja

Određivanje kombinacija događaja koji formiraju model stabla kvara korištenjem logičkih pravila. Model stabla kvara formira se pomoću:

- ulaznih događaja za logička vrata¹⁶ – događaji s niže razine ili osnovni događaji,
- logičkih operacija na vratima – postavljanje logičkih pravila za ulazne događaje koji dovode do događaja na višoj razini. Tipično se primjenjuju osnovni logički operatori ($\wedge, \vee, \dots$) s odgovarajućim grafičkim simbolima,

¹²eng. **R**eliability **B**lock **D**iagram

¹³eng. top event

¹⁴eng. intermediate event

¹⁵eng. basic event

¹⁶eng. gate

- izlaznih događaja – rezultati logičkih operacija za vrata. To su ulazni događaji za višu razinu, ili vršni događaj,

Dodjeljivanja vjerojatnosti osnovnim događajima

Vjerojatnost osnovnog događaja tipično se određuje pomoću vjerojatnosti kvara komponente, ili izračunate vjerojatnosti iz drugih modela (prijelazni događaji). Prilikom određivanja vjerojatnosti osnovnih događaja najčešće se susrećemo s problemom nedostatka specifičnih podataka, primjerice statističkih podataka o istim ili sličnim događajima. Podatke obično nalazimo u bazama podataka o prethodnim događajima prikupljenim tijekom eksploatacije sustava, primjerice za eksploatacije nuklearnih elektrana baza od regulatornog tijela SAD (skr. U.S.NRC¹⁷) ili druge baze. Izgradnja vlastite baze obično je zahtjevan zadatak povezan s brojnim teškoćama,

Simplifikacija logičkog modela i određivanje vjerojatnosti

Simplifikacija logičkog modela i određivanje vjerojatnosti provodi se nalaženjem ekvivalentnog jednostavnijeg zapisa uz osnovne pretpostavke

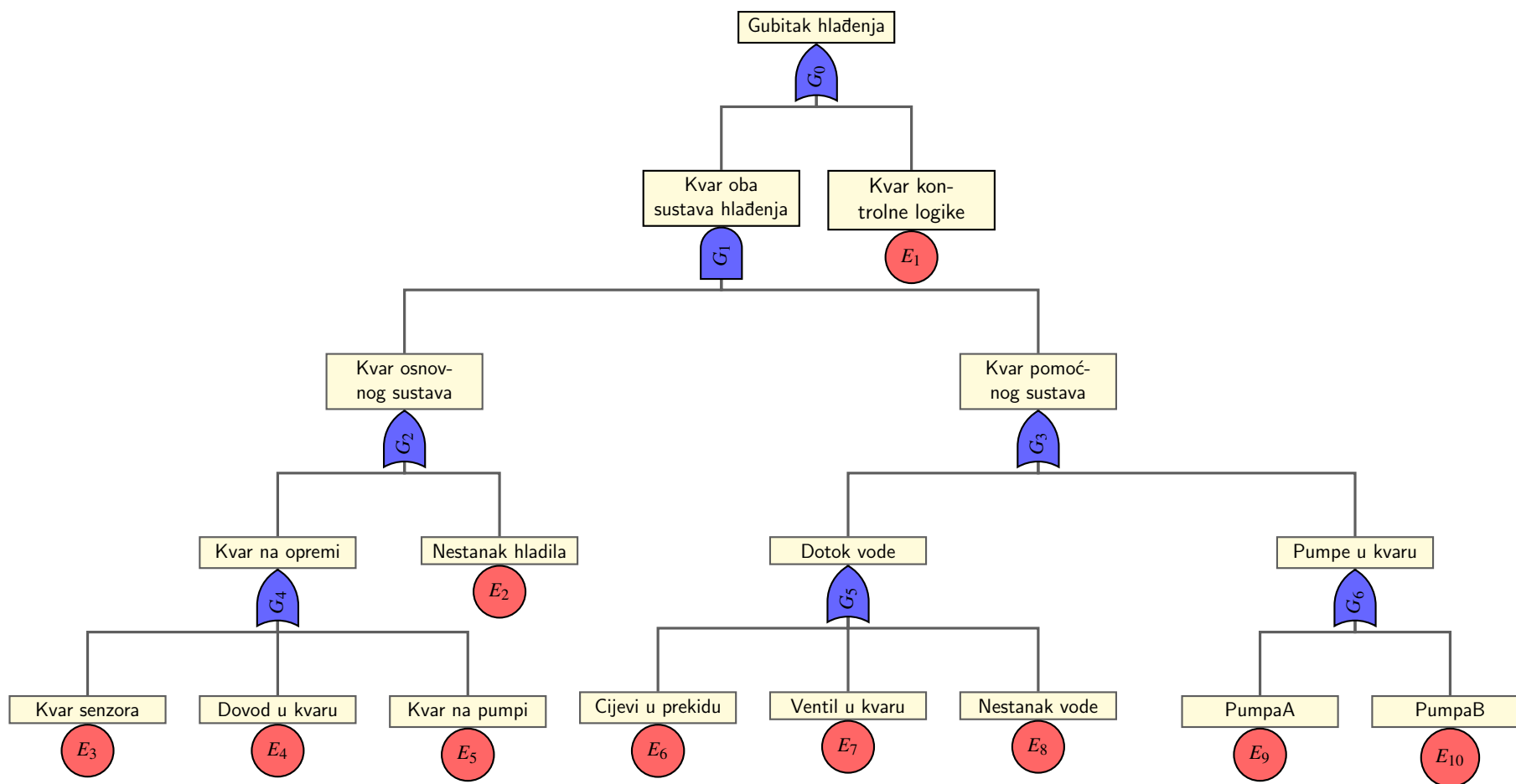
- sustav se sastoji od komponenata,
- komponente su tehnički i logički povezane,
- funkcionalno stanje svake komponente sustava je Bernoulijeva 2.18 slučajna varijabla, $X_i \sim B(1, p_i)$ gdje je p_i vjerojatnost rada i -te komponente,
- primjenjuju se osnovni logički operatori $\{\wedge, \vee\}$,

Kvantitativne i kvalitativne analize

Određivanje dominantnih događaja, te kombinacija osnovnih događaja koje najviše doprinose vršnom događaju. Izrada prijedloga za optimizaciju i poboljšanje (unapređenje) sustava.

Za primjer stabla kvara, možemo odrediti model za događaj nestanka hlađenja u nuklearnoj elektrani uslijed kvara na značajno pojednostavljenom sustavu hlađenja (Slika 2.4). Važno je ovdje napomenuti da u primjeru stabla za analizu nije modeliran utjecaj ljudske greške, koji je važan faktor u sigurnosnim procjenama rizika neželjenih događaja.

¹⁷eng. United States Nuclear Regulatory Commission



Slika 2.5: Primjer stabla kvara za pojednostavljeni događaj nestanka hlađenja

Primjer 2.3.1 (Stablo kvara za nestanak hlađenja). Stablo kvara definiramo uz pretpostavke:

- Unutar reaktorske posude se odvija egzotermna reakcija,¹⁸
- Reaktorska posuda je konstruirana za rad uz ispravan sustav hlađenja.

Pretpostavljene vjerojatnosti kvarova u sustavu hlađenja su zadane slijedećim vrijednostima:

- E_1 – kvar kontrolne (upravljačke) logike: $p = 0,0001$
- E_2, E_8 – nestanak sredstva za hlađenje: $p = 0,01$
- E_3 – senzor (temperature, pritiska) u kvaru: $p = 0,0001$
- E_4, E_6 – kvar na dovodnim cijevima: $p = 0,0001$
- E_5, E_9, E_{10} – pumpa u kvaru: $p = 0,001$
- E_7 – ventil za dotok vode: $p = 0,001$

te ćemo ih koristiti u primjerima analize na modelu 2.5.

Model stabla kvara za analizu događaja u sustavu ima svojih prednosti i nedostataka. Iz načina formiranja stabla kvara vidimo da je model primjenjiv na širokom spektru tehničkih sustava i procesa, te je posebno prikladan za elektromehaničke sustave s komponentama za koje možemo odrediti binarna stanja, primjerice {otvoren/zatvoren, uključen/isključen, ...}. Također, možemo događaje na razini komponenata jednostavno predstaviti logičkom kombinacijom jednostavnijih događaja. Sa stanovišta pristupa problemu, stablo kvara kao model potiče metodički¹⁹ pristup razmišljanju te sustavnu analitičku razradu problema. Međutim, sustav koji se razmatra smatra se “statičkim,” drugim riječima, stablom kvara nismo u mogućnosti analizirati dinamičke procese u sustavu. Osim toga, kod složenih sustava s mnoštvom komponenata koje sudjeluju u procesima tijekom formiranja modela stabla kvara pojavljuje se veliki broj osnovnih događaja i logičkih grana. Brojnost kombinacija dovodi do kompleksnih proračuna koje često puta nismo u mogućnosti u potpunosti provesti te se pristupa aproksimacijama modela korištenjem približnih izračuna.

2.3.2 Analiza stablom kvara

Analizu stablom kvara provodimo s ciljem određivanja uzroka koji dovode do utjecaja na pouzdanost razmatranog sustava. Za ostvarenje tog cilja, model stabla kvara se formira do nivoa detaljnosti u ovisnosti o raspoloživosti dostupnih informacija. Tipično za detaljnu razradu modela stabla kvara potrebne su nam informacije o:

1. sustavu koji razmatramo
 - precizan opis (definicija) stanja sustava koje opisujemo,

¹⁸**egzoterman** (*egzo-* + *-terman*), koji oslobađa, razvija toplinu. Egzotermna reakcija, kemijski proces koji se odvija uz oslobađanje topline (npr. gorenje), jer je sadržaj energije reaktanata veći od sadržaja energije produkata. (izvor: Hrvatska enciklopedija)

¹⁹**metodika** (od grč. *μεθοδικη* [*τεχνική*]): umijeće planskog postupanja. (izvor: Hrvatska enciklopedija)

- granice sustava: koje dijelove sustava razmatramo, koje vanjske utjecaje uključujemo u analizu?
- razina preciznosti u analizi: koliko detaljno analiziramo događaje?

2. komponentama sustava

- razlikovanje kvarova na nivou komponente,
- relevantni vanjski faktori: održavanje, utjecaj na okoliš, ... ,
- vjerojatnosti pojedinih kvarova za kvantitativne analize.

Formiranjem stabla kvara u osnovi gradimo logički dijagram veza između kritičnih događaja u sustavu i posljedica na sustav zbog pojave tih događaja. Postupak analize stabla kvara, uistinu je provođenje kvalitativnih i kvantitativnih izračuna na osnovi strukture stabla kvara te se uobičajeno provodi na skupu minimalnih presjeka. U osnovi određivanje skupa minimalnih presjeka (skr. **MCS**²⁰) predstavlja dio kvalitativne analize, budući je vršni događaj (skr. **TOP**) siguran rezultat barem jednog minimalnog presjeka. Drugi tipični aspekti kvalitativne analize uključuju određivanje glavnih uzroka neželjenog događaja, primjerice minimalni presjeci do određenog broja osnovnih događaja (najčešće dva ili tri osnovna događaja) te utvrđivanje njihove nezavisnosti. Kod kvantitativne analize tipično određujemo vjerojatnost vršnog događaja i vjerojatnosti pojavljivanja vršnog događaja uz uvjet pojavljivanja osnovnog događaja ili kombinacija osnovnih događaja. Jasno je kako praktična primjena jednakosti 2.3 ovisi o kardinalitetu skupa **MCS** budući je broj potrebnih aritmetičkih operacija reda $\sim \mathcal{O}(2^n)$. Zbog tog razloga često se upotrebljavaju aproksimacije za ocjenu gornje granice vjerojatnosti vršnog događaja. Naime, ukoliko djelomično (ili čak potpuno) poznajemo skup minimalnih presjeka $MCS = \{MC_i^S, i = 1, \dots, n\}$ tada možemo upotrebljavati sljedeće dvije formule za procjenu gornje granice vjerojatnosti vršnog događaja.

$$P_{RE}(TOP) \approx \sum_{i=1}^n P(MC_i^S) \quad (2.4)$$

$$P_{MC}(TOP) \approx 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(MC_i^S)) \quad (2.5)$$

Formulu 2.4 nazivamo procjenom iz rijetkih događaja,²¹ dok se druga formula 2.5 naziva gornja ograda iz skupa minimalnih presjeka.²² Obje formule možemo jednostavno dobiti iz jednakosti 2.3, te se može pokazati (pogledati [16]) kako vrijede sljedeće nejednakosti

$$P(TOP) \leq P_{MC}(TOP) \leq P_{RE}(TOP)$$

²⁰eng. Minimal Cuts Set

²¹eng. Rare Event Estimation

²²eng. Minimal Cut Set Upper Bound

gdje je $P(TOP)$ točna vrijednost za vjerojatnost vršnog događaja.

Za primjer možemo provesti analizu pojednostavljenog modela stabla kvara 2.5 za događaj kvara na sustavu hlađenja u nuklearnoj elektrani.

Primjer 2.3.2 (Analiza primjera modela stabla kvara). Analizu možemo provesti u tri koraka:

I. Određivanje MCS

Postupak određivanja MCS svodi se na određivanje minimalne disjunktivne normalne forme za logičku funkciju predstavljenu stablom kvara. Za model stabla kvara 2.5 MCS se sastoji od sljedećih minimalnih presjeka:

$$MCS = \left\{ \{E_1\}, \right. \\ \{E_2, E_6\}, \{E_2, E_7\}, \{E_2, E_8\}, \{E_3, E_6\}, \{E_3, E_7\}, \{E_3, E_8\}, \\ \{E_4, E_6\}, \{E_4, E_7\}, \{E_4, E_8\}, \{E_5, E_6\}, \{E_5, E_7\}, \{E_5, E_8\}, \\ \left. \{E_2, E_9, E_{10}\}, \{E_3, E_9, E_{10}\}, \{E_4, E_9, E_{10}\}, \{E_5, E_9, E_{10}\} \right\}$$

II. Kvalitativna analiza na bazi MCS

Kvalitativna analiza se provodi s ciljem otkrivanja i prevencije uzroka vršnog događaja u sustavu, te se tipično provodi na razini modela određivanjem

- pojedinačnih uzroka (“kritične točke”) karakteriziranih jednočlanim minimalnim presjecima,
- latentnih uzroka, tj. kombinacija gdje su potrebna dva ili više uzroka za neželjeni događaj,
- mjera važnosti za pojedine osnovne događaje,
- te brojnih drugih kriterija.

Provođenje kvalitativne analize je zahtjevan korak te je u ovom radu bitno pojednostavljen do elementarne razine određivanja pojedinačnog uzroka, te mjera važnosti u nastavku rada. Vidimo da se MCS skup sastoji od jednog jednočlanog minimalnog presjeka $\{E_1\}$, dvanaest dvočlanih te četiri tročlana minimalna presjeka. Odatle možemo zaključiti da sustav ima barem jednu kritičnu točku, a to je “kontrolna logika.” Nadalje, potencijalni latentni uzroci mogu biti određeni analizom dvočlanih i tročlanih minimalnih presjeka. Primjerice, minimalni presjek $\{E_2, E_8\}$ znači nestanak sredstva za hlađenje (vode ili hladila) te predstavlja značajan latentni uzrok kvara. Mjere važnosti za ovaj primjer su dane u tablici 3.2 u nastavku rada,

III. Kvantitativna analiza na bazi MCS

Stablo kvara formirano je uz pretpostavku nezavisnosti osnovnih događaja 2.14, dakle vrijedi

$$P(E_i \cap E_j) = P(E_i)P(E_j), \forall i, j \in \{1, \dots, 10\}$$

Odatle proizlazi, vjerojatnost minimalnih presjeka možemo računati pomoću formule

$$P(MC_i^S) = \prod_{E_j \in MC_i^S} P(E_j)$$

Primjenom formule na skupu minimalnih presjeka dobit ćemo sljedeću tablicu

i	1	2	3	4	5	6	7
$P(MC_i^S)$	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}
n_i	2	2	4	3	3	1	2

koja prikazuje broj (redak n_i) minimalnih presjeka s pridruženim vjerojatnostima pojavljivanja (redak $P(MC_i^S)$). Tablicu možemo iskoristiti za određivanje gornje granice vjerojatnosti vršnog događaja primjenom formule 2.5

$$\begin{aligned}
 P_{MC}(g_0) &= 1 - \prod_i (1 - P(MC_i^S))^{n_i} \\
 &= 1 - \prod_{i=1}^7 (1 - P(MC_i^S))^{n_i} \\
 &= 1 - (1 - 10^{-4})^2 \dots (1 - 10^{-10})^2 \\
 &\approx 2,2432 \cdot 10^{-4}
 \end{aligned}$$

Budući smo u prvom koraku odredili kompletan skup minimalnih presjeka, možemo zaključiti da vjerojatnost vršnog događaja ne prelazi $2,2432 \cdot 10^{-4}$.

2.3.3 Kompleksnost analize

Kako smo vidjeli u prethodnom podpoglavlju, kompleksnost analize stabla kvara u potpunosti ovisi o veličini skupa minimalnih presjeka. Budući je stablo kvara model koji predstavlja logičku funkciju s indikatorskim varijablama 2.22 za osnovne događaje, veličinu skupa minimalnih presjeka možemo ocijeniti koristeći ograde za logičke funkcije. Pokazali smo 2.28 da je model stabla kvara model događaja u koherentnom sustavu što donekle pojednostavljuje ocjenu veličine skupa minimalnih presjeka. Naime, za koherentne sustave logička funkcija, predstavljena stablom kvara, je monotona, tako da možemo koristiti rezultat iz rada [20]. Prema tom rezultatu zaključujemo da je veličina skupa minimalnih presjeka ograničena odozgo s brojem elemenata partitivnog skupa²³ osnovnih događaja, tj. za skup osnovnih događaja $E = \{E_i: i = 1, \dots, n\}$ vrijedi

$$MCS \subseteq \mathcal{P}(E) \implies |MCS| \leq 2^n$$

²³**partitivni skup** (lat. *partitus*: razdijeljen), oznaka $\mathcal{P}(A)$, nekoga skupa A jest skup svih podskupova toga skupa A. (izvor: Hrvatska enciklopedija)

Svojstvo monotonosti logičke funkcije kod stabla kvara u svojoj biti ne pojednostavljuje problem određivanja skupa minimalnih presjeka čak ni za funkcije s najjednostavnijim elementarnim konjunkcijama [21], [22] što nam pokazuje sljedeći teorem.

Teorem 2.6 (Valiant). Neka je f monotona funkcija u CNF obliku s dvočlanim elementarnim disjunkcijama. Određivanje broja elementarnih konjunkcija u DNF obliku je **NP-potpuni** problem.

Dokaz. Vidi [23].

Q.E.D.

Brojnost skupa minimalnih presjeka predstavlja osnovni problem u implementaciji algoritama za kvalitativnu i kvantitativnu analizu stabla kvara. Prvi algoritam, s kojim se susrećemo, je algoritam za određivanje skupa MCS. Već je Quine [24] pokazao da implementacija tog algoritma zahtjeva eksponencijalno vrijeme izvođenja, zbog toga se često puta koriste aproksimativni algoritmi za određivanje parcijalnog skupa MCS. Tako se primjerice u konvencionalnim pristupima [18] učestalim rezanjem stabla kvara nastoji odrediti najvjerojatniji minimalni presjeci iz skupa MCS. Tipično se broj članova tako dobijenog parcijalnog skupa MCS zadržava do

$$|MCS| \sim \mathcal{O}(10^6)$$

Drugi algoritam, s kojim se susrećemo, je algoritam za određivanje vjerojatnosti vršnog događaja u kvantitativnoj analizi stabla kvara. Ukoliko nam je poznat potpuni skup minimalnih presjeka, tada se vjerojatnost vršnog događaja može izračunati primjenom formule 2.1. Direktna primjena formule nije moguća jer također dovodi do kombinatorne eksplozije s brojem članova. Iz tog razloga se u konvencionalnim pristupima [18] koristimo približnim ocjenama do najviše trećeg reda koristeći formule iz 2.3. No čak i približna ocjena vjerojatnosti vršnog događaja nije lagana kako pokazuje sljedeća definicija i teorem.

Definicija 2.37 (ε -aproksimacija). Neka je $\varepsilon > 1$ realan broj. Kažemo da je realan broj $\tilde{p} \in \mathcal{R}$, ε -aproksimacija broja $p \in \mathcal{R}$ ako vrijedi

$$\frac{\tilde{p}}{\varepsilon} \leq p \leq \varepsilon \cdot \tilde{p}$$

Teorem 2.7 (Rosenthal). ε -aproksimacija vjerojatnosti vršnog događaja je **NP-težak** problem.

Dokaz. Vidi [25]

Q.E.D.

Poglavlje 3

Binarni dijagrami odlučivanja

U narednom poglavlju uvodimo binarne dijagrame odlučivanja (BDD) koji predstavljaju “state-of-the-art” reprezentaciju logičkih funkcija. Najbolju kvalifikaciju BDD strukture dao je D.E. Knuth u svom predavanju [26],

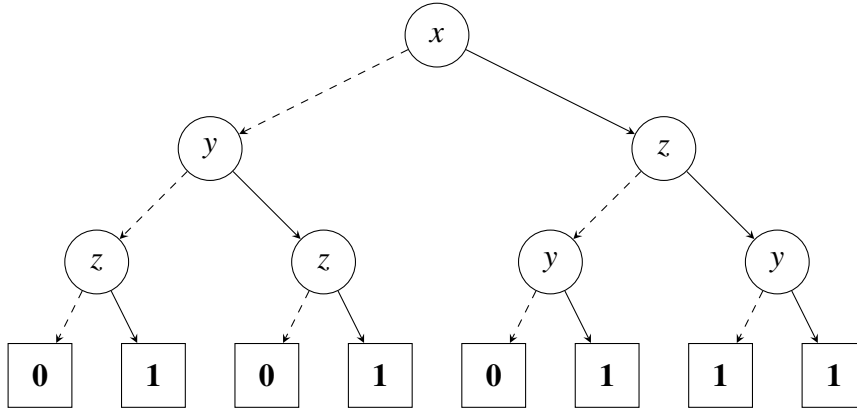
One of the only really fundamental data structures that came out in the last twenty-five years
(D.E. Knuth, 2008)

čime je posebno istaknuo važnost i temeljna svojstva BDD reprezentacije. BDD dijagrami nalaze svoju primjenu u brojnim tehničkim disciplinama te se, primjerice, osim za analizu stabla kvara, primjenjuju za analizu i sintezu logičkih sklopova [27], formalnu verifikaciju VLSI sklopova [5], minimizaciju sklopova [28], te brojnim drugim primjenama. Prvi dio poglavlja posvećen je formalnoj definiciji strukture i osnovnim svojstvima BDD strukture. Zatim uvodimo modifikaciju na BDD strukturi koja omogućava kompaktno zapisivanje kombinacija skupova (ZDD²⁴) te implementaciju osnovnih funkcija za obje strukture (BDD, ZDD). Treći dio poglavlja posvećen je primjeni binarnih dijagrama odlučivanja u teoriji pouzdanosti, posebice na analizu stabla kvara. Zadnji dio usredotočen je problemu određivanja redoslijeda varijabli (osnovnih događaja kod FT), što predstavlja glavni izazov u primjeni binarnih dijagrama odlučivanja.

3.1 Definicija i svojstva

Ideju predstavljanja logičkih funkcija dijagramima odlučivanja uvode Lee [29] i Akers [18], međutim veću popularnost BDD struktura postiže nakon Bryantova rada [30] kada su definirani osnovni algoritmi za upravljanje BDD strukturom. Osnovna ideja je izgradnja BDD strukture za logičku funkciju korištenjem Boole-Shannon razvoja po jednoj varijabli. Formalno, strukturu BDD dijagrama gradimo rekursivnom primijenom sljedećeg teorema.

²⁴eng. Zero-suppressed Decision Diagrams


 Slika 3.1: BDD graf funkcije $f(x, y, z) = (x \vee z) \wedge (y \vee z)$

Teorem 3.1 (Boole-Shannon razvoj). Neka je $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$ logička funkcija, tada vrijedi

$$f(\mathbf{x}) = (x_i \wedge f(\mathbf{x}; 1_i)) \vee (\bar{x}_i \wedge f(\mathbf{x}; 0_i))$$

Dokaz. Vidi [31]

Q.E.D.

Važno je napomenuti da to nije jedini način razvoja logičkih funkcija, koji vodi na dijagrame odlučivanja, više o tome nalazi se u literaturi [6]. Uobičajeno se BDD dijagrami grafički prikazuju u obliku binarnog usmjerenog acikličkog grafa (skr. DAG²⁵) [32] što možemo ilustrirati na jednostavnom primjeru sa slike 3.1. Uobičajeno je isprekidanim strelicama označavati brid u grafu koji odgovara logičkoj vrijednosti 0, te punom strelicom brid za logičku vrijednost 1.

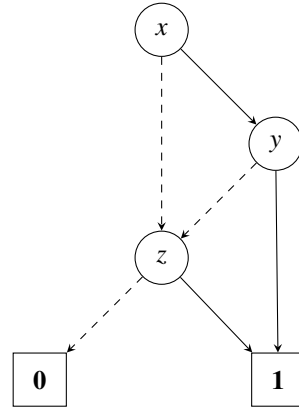
Primjer 3.1.1 (BDD primjer). Neka je dana funkcija $f: \mathbb{B}^3 \rightarrow \mathbb{B}$. Jednostavni BDD dijagram za logičku funkciju $f(x, y, z) = (x \vee z) \wedge (y \vee z)$ izvodimo primjenom teorema 3.1.

$$\begin{aligned} f(x, y, z) &= (x \wedge f(1, y, z)) \vee (\bar{x} \wedge f(0, y, z)) \\ f(1, y, z) &= (z \wedge f(1, y, 1)) \vee (\bar{z} \wedge f(1, y, 0)) \\ f(0, y, z) &= (y \wedge f(0, 1, z)) \vee (\bar{y} \wedge f(0, 0, z)) \\ f(1, y, 1) &= (y \wedge f(1, 1, 1)) \vee (\bar{y} \wedge f(1, 0, 1)) \\ f(1, y, 0) &= (y \wedge f(1, 1, 0)) \vee (\bar{y} \wedge f(1, 0, 0)) \\ f(0, 1, z) &= (z \wedge f(0, 1, 1)) \vee (\bar{z} \wedge f(0, 1, 0)) \\ f(0, 0, z) &= (z \wedge f(0, 0, 1)) \vee (\bar{z} \wedge f(0, 0, 0)) \end{aligned}$$

Dobiveni Boole-Shannon razvoj možemo prikazati usmjerenim acikličkim grafom na slici 3.1

Primijetimo da smo tijekom Boole-Shannon razvoja koristili različite redoslijede za varijable, primjerice razvoj za funkciju $f(1, y, z)$ je napravljen redoslijedom $z < y$, dok je razvoj za

²⁵eng. Directed Acyclic Graph



Slika 3.2: ROBDD graf funkcije $f(x, y, z) = (x \vee z) \wedge (y \vee z)$

funkciju $f(0, y, z)$ napravljen redoslijedom $y < z$. Fiksiranjem redoslijeda varijabli tijekom razvoja ostvaruje se jedinstvenost prikaza funkcije u obliku acikličkog grafa. Binarne dijagrame odlučivanja dobivene fiksiranjem redoslijeda varijabli po svim bridovima razvoja nazivamo uređeni binarni dijagrami odlučivanja (skr. OBDD²⁶). Tako, u prethodnom primjeru fiksiranjem redoslijeda varijabli, recimo $x < y < z$ dobijemo prikaz u kojem su zamijenjene oznake vrhova $y \longleftrightarrow z$ u desnoj polovici grafa.

Analiziranjem OBDD grafa uočavamo ponavljanje dijelova u strukturi. Na primjer, vidimo da lijeva strana grafa koja predstavlja funkciju $f(0, y, z)$ ne ovisi o varijabli y već samo o varijabli z . Istovremeno, desna strana grafa koja predstavlja funkciju $f(1, y, z)$ koja nastaje razvojem za vrijednost $y = 1$ uvijek završava u vrhu **1** neovisno o vrijednosti varijable y . Također, nakon zamjene oznaka vrhova vidimo da se trostruko ponavljaju vrijednosti za varijablu z , t.j. tri puta susrećemo istu strukturu oblika, vrh z je spojen samo s vrhovima **0** i **1**. Uklanjanjem ponavljanja u grafu i korištenjem jednokratnog zapisa vrhova **0** i **1**, dobivamo reducirani uređeni binarni dijagram odlučivanja (skr. ROBDD²⁷). Drugim riječima, iterativnom primjenom dva pravila redukcije

1. stapanjem identičnih vrhova (*pravilo stapanja*),
2. brisanjem vrhova kojima su bridovi jednaki (*pravilo eliminacije*).

dobijemo ROBDD graf. Primjenom redukcijских pravila na OBDD grafu za funkciju f dobijemo graf na slici 3.2.

Formalno BDD graf definiramo preko skupa vektora i bridova upotrebom uobičajenog formalizma teorije grafova, pogledati [32].

Definicija 3.1 (BDD DAG). BDD je usmjereni aciklički graf

$$G = (\mathcal{V}_G, \mathcal{E}_G, \Psi_G)$$

²⁶eng. **Ordered Binary Decision Diagrams**

²⁷eng. **Reduced Ordered Binary Decision Diagram**

čiji su elementi dva tipa vrhova $v \in \mathcal{V}_G$ određena stupnjem $d_G(v)$

1. *vanjski vrh* $v \in \{\mathbf{0}, \mathbf{1}\}$ za koji vrijedi $d_G(\mathbf{0}) = d_G(\mathbf{1}) = 0$,
2. *unutarnji vrh* za koji vrijedi $d_G(v) = 2$.

sa svojstvima

- $index(v)$ – indeks $i \in \{1, \dots, n\}$ logičke varijable $x_i \in \mathbb{B}$,
- $value(v)$ – logička funkcija određena tim vrhom $f_v(\mathbf{x})$,
- $high(v)$ – vrh za logičku funkciju $f_v(\mathbf{x}; 1_i)$,
- $low(v)$ – vrh za logičku funkciju $f_v(\mathbf{x}; 0_i)$.

Uvjet uređenosti redoslijeda varijabli kod BDD grafova (OBDD graf) predstavlja uvjet na *index* svojstvo, dok reduciranost predstavlja uvjet na svojstvo *value*. Primjenom uvjeta uređenosti i reduciranosti na BDD grafu definiramo ROBDD grafove na sljedeći način

Definicija 3.2 (ROBDD DAG). Neka je $G = (\mathcal{V}_G, \mathcal{E}_G, \psi_G)$ BDD graf. Ako

1. za svaki v unutarnji vrh vrijedi

$$(index(v) < index(low(v))) \wedge (index(v) < index(high(v)))$$

2. za svaki par $\{v_i, v_j\}$ unutarnjih vrhova vrijedi

$$value(v_i) \neq value(v_j)$$

tada G nazivamo ROBDD grafom.

Bryant je u svom radu [30] pokazao da se svaki OBDD graf G može reducirati na ROBDD graf u vremenu i prostoru proporcionalnom s $\mathcal{O}(|\mathcal{V}_G|)$.

U daljnjem tekstu se podrazumijeva $|G| = |\mathcal{V}_G|$

Neposredna posljedica ROBDD definicije je sljedeća propozicija koja nam daje vezu između ROBDD grafa i logičke funkcije.

Propozicija 3.1 (Veza ROBDD s logičkom funkcijom). Neka je $G = (\mathcal{V}_G, \mathcal{E}_G, \psi(e_i))$ ROBDD graf s početnim vrhom $v \in \mathcal{V}_G$. Vrh v predstavlja logičku funkciju f_v definiranu rekursivno

1. ako je v vanjski vrh, tada vrijedi

$$f_v \equiv \begin{cases} \mathbf{0}, & value(v) = 0 \\ \mathbf{1}, & value(v) = 1 \end{cases}$$

2. ako je v unutarnji vrh za koji vrijedi $index(v) = i$, tada vrijedi

$$f_v(\mathbf{x}) = (x_i \wedge f_{high(v)}(\mathbf{x}; 1_i)) \vee (\bar{x}_i \wedge f_{low(v)}(\mathbf{x}; 0_i))$$

Primjetimo, funkcije $f_{low(v)}, f_{high(v)}$ su definirane na prostoru dimenzije manjem za jedan od definicije funkcije $f(\mathbf{x})$.

Dokaz. Dokaz slijedi neposredno iz definicije. Primjerice, za vanjski vrh $v \in \mathcal{V}_G$, ako vrijedi

$$value(v) = 0$$

prema definiciji tada znamo da je $f_v = 0$ za svaku interpretaciju $\sigma(f_v)$. To znači da je f_v konstantna logička funkcija jednaka $\mathbf{0}$, odakle slijedi

$$f_v \equiv \mathbf{0}$$

Analogno se dokazuje ostatak leme.

Q.E.D.

Neka svojstva ROBDD grafa proizlaze neposredno iz definicije

Korolar 3.1 (Svojstva ROBDD grafa). Neka je $G = (\mathcal{V}_G, \mathcal{E}_G, \psi_G)$ ROBDD graf. Za G vrijede sljedeća svojstva

1. za vanjski vrh $v \in \{\mathbf{0}, \mathbf{1}\}$ vrijedi
 - $high(v) = low(v) = \emptyset$,
 - $index(v) = \infty$,
 - $value(\mathbf{0}) = \mathbf{0}, value(\mathbf{1}) = \mathbf{1}$.
2. za svaki unutarnji vrh $v \in \mathcal{V}_G$ vrijedi

$$\exists e_i, e_j \in \mathcal{E}_G \mid \psi_G(e_i) = (v, high(v)) \wedge \psi_G(e_j) = (v, low(v))$$

Dokaz. Za vanjske vrhove $v \in \{\mathbf{0}, \mathbf{1}\}$ vrijedi

- iz definicije $d_G(v) = 0 \implies high(v) = low(v) = \emptyset$
- iz uređenosti varijabli ($index(v) > index(u), \forall u \in \mathcal{V}_G \implies index(v) = \infty$)
- slijedi neposredno iz leme 3.1

Drugo svojstvo, za unutarnje vrhove $v \in \mathcal{V}_G$ vrijedi $(high(v) \in \mathcal{V}_G) \wedge (low(v) \in \mathcal{V}_G)$ odakle proizlazi postojanje bridova $e_i = (v, high(v)), e_j = (v, low(v))$. Tvrdnja slijedi iz definicije funkcije $\psi_G(e)$ te činjenice da $\mathcal{E}_G$ sadrži sve bridove od ROBDD grafa G .

Q.E.D.

Uređenost i reduciranost ROBDD grafa za neku logičku funkciju f , osigurava jedinstvenost prikaza funkcije pomoću ROBDD grafa. Vrijedi naime,

Teorem 3.2 (Jedinstvenost ROBDD grafa). Neka je $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$ logička funkcija od n varijabli. Tada postoji jedinstveni (do izomorfizma) ROBDD graf funkcije f .

Dokaz. Dokaz je izveden u [30] indukcijom po $|\sigma(f_v)|$.

Q.E.D.

Jedinstvenost ROBDD zapisa za logičku funkciju f ima za posljedicu sljedeće jednostavne provjere

Korolar 3.2 (Provjere na ROBDD). Neka su $f, g: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$ logičke funkcije. Tada vrijedi,

1. f je *tautologija*, ako i samo ako je njezin ROBDD graf jednak vanjskom vrhu $\mathbf{1}$, analogno za *antitautologiju*,
2. f je *ispunjiva*, ako i samo ako postoji put u ROBDD grafu G između vrhova v_f i $\mathbf{1}$,
3. f i g su *ekvivalentne* $f \equiv g$, ako i samo ako su njihovi ROBDD grafovi izomorfni, drugim riječima, vrijedi $v_f \equiv v_g$.

Dokaz. Tvrdnje proizlaze neposredno iz svojstva jedinstvenosti ROBDD grafa za logičku funkciju. Q.E.D.

Osim jednostavnih provjera iz prethodnog korolara, pomoću ROBDD grafova možemo implementirati binarne i ternarne logičke funkcije. Implementacija binarnih logičkih funkcija u osnovi koristi rekurzivnu strukturu i jedinstvenost vrhova ROBDD grafa. Pomoću algoritma 1 možemo implementirati binarne logičke funkcije na ROBDD grafovima. Vremenska i prostorna kompleksnost algoritma određena je umnoškom broja vrhova u ROBDD grafovima. Rezultat slijedi iz teorema

Teorem 3.3 (Kompleksnost ROBDD binarne logičke operacije). Neka su G_f, G_g dva ROBDD grafa za funkcije $f, g: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$. Za svaku binarnu logičku funkciju $\diamond$ (vidi 2.1) vrijedi

$$G_f \diamond G_g \sim \mathcal{O}(|G_f| |G_g|)$$

Dokaz. Pogledati [7] Q.E.D.

Zapravo, možemo pokazati općenitiji teorem o kompleksnosti osnovnih logičkih operacija

Teorem 3.4 (Kompleksnost osnovnih logičkih operacija na ROBDD). Neka su G_f, G_g dva ROBDD grafa za funkcije $f, g: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$, te neka je $\mathbf{x} \in \mathbb{B}^n$, tada vrijedi

1. *vrednovanje* $(f(\mathbf{x}): \forall \mathbf{x}) \sim \mathcal{O}(n)$
2. *ispunjivost* $(\exists \sigma: \sigma(f) = \mathbf{1}) \sim \mathcal{O}(|G_f|)$
3. *brojnost ispunjivosti* $(|\{\sigma(f): \sigma(f) = \mathbf{1}\}|) \sim \mathcal{O}(|G_f|)$
4. *restrikcija* $(\forall c \in \mathbb{B}, f(\mathbf{x}; c_i)) \sim \mathcal{O}(|G_f|)$
5. *projekcija* $(f(\mathbf{x}; g(\mathbf{x})_i)) \sim \mathcal{O}(|G_f| |G_g|)$
6. *ekvivalencija* $(f(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x}): \forall \mathbf{x}) \sim \mathcal{O}(|G_f| |G_g|)$
7. *binarna operacija* $(\forall \diamond \subset \mathbb{B}^2, f(\mathbf{x}) \diamond g(\mathbf{x})) \sim \mathcal{O}(|G_f| |G_g|)$

8. *univerzalna kvantifikacija* $(\diamond \in \{\exists, \forall\}, (\diamond \mathbf{x}: f(\mathbf{x})) \sim \mathcal{O}(|G_f|^2)$
 9. *uklonjivost varijable* $(f(\mathbf{x}; 1_i) = f(\mathbf{x}; 0_i)) \sim \mathcal{O}(|G_f|^2)$

Dokaz. Primjerice, *ispunjivost* možemo jednostavno dokazati iz činjenice da je ROBDD usmjereni aciklički graf s dva vanjska vrha. Ukoliko funkcija f nije *antitautologija* 3.2 tada postoji barem jedna šetnja od vrha v_f do vanjskog vrha **1**. Šetnju možemo naći algoritmom obilaska grafa po dubini (DFT²⁸), koji ima kompleksnost $\mathcal{O}(|\mathcal{V}_G| + |\mathcal{E}_G|)$, pogledati u [33]. Budući u ROBDD grafu za svaki unutarnji vrh vrijedi $d_G(v) = 2$, odatle slijedi $|\mathcal{E}_G| = 2 \cdot |G_f| - 4$, što daje ocjenu za *ispunjivost* $\mathcal{O}(|G_f| + 2 \cdot |G_f| - 4) \sim \mathcal{O}(|G_f|)$. Analogno se dokazuju ostale tvrdnje, pogledati [7]. Q.E.D.

U daljnjem tekstu se podrazumijeva ROBDD zapis te se upotrebljava samo oznaka BDD

3.2 ZDD modifikacija

BDD grafovi predstavljaju efikasan način reprezentacije logičkih funkcija, međutim u teoriji pouzdanosti osim logičkih funkcija susrećemo se sa skupovima događaja i njihovim kombinacijama, primjerice skupovima minimalnih presjeka 2.31 ili minimalnih putanja 2.32. Za efikasno predstavljanje skupova i njihovih kombinacija, Minato [5] je predložio ZDD graf strukturu sa zatajenom nulom. Ideja je da podskupove $S \subseteq U_n$ fiksnog skupa

$$U_n = \{i \in \mathbb{N} \mid i \leq n \in \mathbb{N}\}$$

opisujemo *karakterističnim vektorom* $\mathbf{s} = (s_1, \dots, s_n) \in \{0, 1\}^n$,

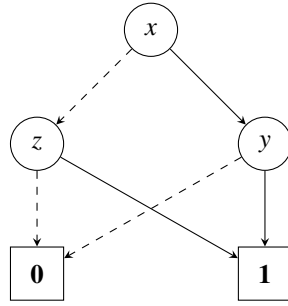
$$s_i = \begin{cases} 1, & i \in S \\ 0, & i \notin S \end{cases}$$

Jasno je da vrijedi $S \in \mathcal{P}(U_n)$, odakle slijedi da svaka kolekcija $\{S_k \mid S_k \in \mathcal{P}(U_n)\}$ podskupova od U_n pripada partitivnom skupu $\mathcal{P}(U_n)$. Dakle, možemo definirati karakterističnu funkciju $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$ na sljedeći način

$$f(\mathbf{s}_i) = \begin{cases} 1, & S_i \in \{S_k\} \\ 0, & S_i \notin \{S_k\} \end{cases}$$

gdje je $\mathbf{s}_i$ karakteristični vektor skupa S_i . Na ovaj način uobičajene skupovne operacije možemo predstaviti logičkim operacijama, primjerice *uniju* ($\cup$) s logičkim *ili* ($\vee$), *presjek* ($\cap$) s logičkim *i* ($\wedge$), *komplement* s logičkim ($\neg$), itd. Karakteristične funkcije su logičke funkcije te

²⁸eng. Depth First Traversal

Slika 3.3: ZDD za skup $\{\{z\}, \{x,y\}\}$

ih možemo predstaviti BDD grafovima. Međutim, BDD graf nije prikladan za reprezentaciju rijetkih skupova iz razloga što je potrebno predstaviti sve karakteristične vektore u kojima su većinom $s_i = 0$. Iz toga razloga Minato predlaže promjenu redukcijskih pravila 3.1 uvođenjem zamjenskog *pravila eliminacije* za ZDD grafove

1. stapanje identičnih vrhova (*pravilo stapanja ostaje isto*)
2. brisanje vrhova za koje vrijedi $high(v) = \mathbf{0}$ (**ново** *pravilo eliminacije*)

Na taj način postizemo osnovno svojstvo ZDD grafa iskazano u sljedećoj lemi, koju navodim bez dokaza

Lema 3.1 (ZDD funkcije bez i -te varijable). Neka je $G = (\mathcal{V}_G, \mathcal{E}_G, \psi_G)$ ZDD graf za funkciju f u kojem vrijedi

$$index(v) \neq i, \forall v \in \mathcal{V}_G$$

tada vrijedi $f(\mathbf{x}; 1_i) = 0$.

Za ilustraciju, možemo formirati ZDD za skup minimalnih disjunktija funkcije sa slike 3.2.

Primjer 3.2.1 (Primjer ZDD za DNF). BDD na slici 3.2 predstavlja zapis originalne funkcije

$$f(x, y, z) = (x \vee z) \wedge (y \vee z)$$

u ekvivalentnom obliku

$$f(x, y, z) = (x \wedge y) \vee (x \wedge z) \vee z$$

koji možemo svesti na minimalan DNF zapis na sljedeći način

$$f(x, y, z) = (x \wedge y) \vee ((x \wedge z) \vee z) = (x \wedge y) \vee (z \wedge (1 \vee x)) = (x \wedge y) \vee z$$

odakle dobijemo minimalni skup disjunktija funkcije $M_f^{DNF} = \{\{z\}, \{x,y\}\}$. Na slici 3.3 je prikazan ZDD graf za M_f^{DNF} skup.

3.3 Minimizacija logičke funkcije

Kako smo vidjeli u primjeru 2.3.2, određivanje skupa minimalnih presjeka (MCS) od presudne je važnosti za provođenje analize stabla kvara. Poznavanjem MCS skupa logičku funkciju predstavljenu stablom kvara možemo zapisati u alternativnom DNF obliku. Naime, primjenom logičkog operatora *ili* na minimalnim presjecima iz MCS skupa dobit ćemo ekvivalentni zapis polazne funkcije u obliku prikladnom za provođenje analize stabla kvara. Iz tog razloga potrebno je odrediti minimalni DNF zapis koji sadržava samo MCS skup te predstavlja ekvivalentan zapis polazne funkcije stabla kvara. Međutim, određivanje minimalnog DNF zapisa za logičku funkciju nije jednostavan problem već spada u klasu najtežih problema (**NP-potpun**) kako je pokazano u radu [21].

Premda je problem određivanja minimalnog DNF zapisa fundamentalan²⁹, prvi algoritmi su razvijeni već 50-ih godina prošlog stoljeća. Primjerice, poznat je algoritam Quine-McClusky [34] za određivanje minimalnog DNF zapisa kompleksnosti $\mathcal{O}(n^2 3^n)$. U novije vrijeme [35], postignut je napredak u određivanju minimalnog DNF zapisa logičke funkcije zasnovan na primjeni Morrealeova algoritma [36] za nalaženje ireducibilne³⁰ disjunktivne normalne forme. Osnovna ideja Morrealeova algoritma sadržana je u činjenici da svaku logičku funkciju možemo rastaviti na disjunkciju tri funkcije

$$f(\mathbf{x}) = (\bar{x}_i \wedge f(\mathbf{x}; 0_i)) \vee (x_i \wedge f(\mathbf{x}; 1_i)) \vee (f(\mathbf{x}; 0_i) \wedge f(\mathbf{x}; 1_i)), \forall \mathbf{x} \in \mathbb{B}^n$$

Odakle neposredno slijedi teorem iz kojeg proizlazi Morrealeov algoritam za nalaženje ireducibilne disjunktivne normalne forme.

Teorem 3.5 (Karakterizacija DNF). Neka je dana logička funkcija $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$, tada je skup elementarnih konjunkcija za funkciju f određen s

$$A_f = P \cup (\{\bar{x}_i\} \times (A_0 \setminus A)) \cup (\{x_i\} \times (A_1 \setminus A)), \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

gdje su skupovi elementarnih konjunkcija

- A za $f(\mathbf{x}; 0_i) \wedge f(\mathbf{x}; 1_i)$
- A_0 za $f(\mathbf{x}; 0_i)$
- A_1 za $f(\mathbf{x}; 1_i)$

Dokaz. Pogledati [36], i [37].

Q.E.D.

²⁹**fundamentalan** (lat. *fundamentalis*), temeljan, osnovan, bitan (npr. pojam, djelo, svojstvo) (izvor: Hrvatska enciklopedija)

³⁰**ireducibilan** (latinski *reducere*: *vratiti natrag*; *svesti*), koji se ne može reducirati, koji se ne može sažeti, pojednostavniti ili svesti na jednostavnije dijelove, nesvodljiv. U matematici, ireducibilni su oni izrazi koji se ne daju skratiti, stegnuti ili pojednostavniti. (izvor: Hrvatska enciklopedija)

Rekurzivnom primjenom teorema dobijemo algoritam za nalaženje ireducibilne disjunktivne normalne forme koji se može implementirati na BDD grafovima.

Logička funkcija definirana koherentnim stablom kvara je monotona što pojednostavljuje problem određivanja minimalnog DNF oblika (ili MCS skupa). Već je Quine [38] pokazao kako je određivanje minimalnog DNF oblika monotone logičke funkcije jednostavnije. Vrijedi sljedeći teorem

Teorem 3.6 (Literali u konjunkcijama monotone funkcije). Neka je $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$ monotona logička funkcija u DNF zapisu $f(\mathbf{x}) = \bigvee_i a_i$, tada elementarne konjunkcije a_i sadrže samo pozitivne literale.

Dokaz. Bez smanjenja općenitosti pretpostavimo da je a_1 elementarna konjunkcija u kojoj je jedan literal 0, primjerice, $\bar{x}_j$. Elementarnu konjunkciju a_1 možemo zapisati $a_1 = 0 \wedge a'_1$, gdje je a'_1 također konjunkcija. Dovoljno je pokazati da je a'_1 elementarna konjunkcija. Napravimo novu konjunkciju $a''_1 = 1 \wedge a'_1$, budući je $a_1 < a''_1$, zbog monotonosti od f slijedi $a''_1 = 1 \implies f = 1$, dakle a''_1 je elementarna konjunkcija. Vrijedi, a_1 i a''_1 su elementarne konjunkcije, prema tome su dio DNF zapisa funkcije f . Dakle vrijedi,

$$\begin{aligned} f(x) &= (a_1 \vee a''_1) \vee \left(\bigvee_{i=2} a_i \right) \\ &= ((\bar{x}_j \vee x_j) \wedge a'_1) \vee \left(\bigvee_{i=2} a_i \right) \\ &= (1 \wedge a'_1) \vee \left(\bigvee_{i=2} a_i \right) \\ &= a'_1 \vee \left(\bigvee_{i=2} a_i \right) \end{aligned}$$

Odakle slijedi $a'_1 = 1 \implies f = 1$, što je protivno tvrdnji da je a_1 elementarna konjunkcija. Q.E.D.

Neposredna posljedica nepostojanja negacije u elementarnim konjunkcijama za monotone funkcije te primjena teorema 3.5 name daje jednostavniju karakterizaciju DNF za monotone funkcije.

Lema 3.2 (Karakterizacija DNF za monotone funkcije). Neka je $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$ monotona logička funkcija. tada je skup elementarnih konjunkcija od funkcije f određen s

$$A_f = A \cup (\{x_i\} \times (A_1 \setminus A)) \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

gdje su skupovi A, A_1 elementarnih konjunkcija definirani na isti način kao u teoremu 3.5.

Dokaz. Lema, neposredno slijedi iz teorema 3.5, budući se sve elementarne konjunkcije monotonih funkcija sastoje samo od pozitivnih literala, tada vrijedi

$$\{\bar{x}_i\} \times (A_0 \setminus A) = \emptyset$$

Detaljan dokaz pogledati u [37].

Q.E.D.

Primjenom karakterizacije DNF zapisa za monotone funkcije iz prethodne leme Rauzy [39] je razvio algoritam za minimizaciju monotonih logičkih funkcija koji je primjenjiv na logičke funkcije stabla kvara. Osnovicu njegovog algoritma predstavlja operator (oznaka $\setminus_m$) koji određuje razliku $A_1 \setminus A$ u karakterizaciji DNF za monotone funkcije. Uočimo da su skupovi A, A_1 predstavljeni BDD grafom te je $\setminus_m$ binarni operator na BDD grafovima. Ideja je implementirati $\setminus_m$ na sličan način kako su implementirane binarne operacije [30] u algoritmu 1.

Algoritam 1: Binarna logička operacija na BDD grafu (Bryant)

Ulaz: $\diamond(v_f, v_g)$
Izlaz: $r \leftarrow v_f \diamond v_g$

```

1   $f, g: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$                                 // Logičke funkcije na istom skupu varijabli
2   $v_f, v_g \in \mathcal{V}_G$                                 // Vrhovi iz BDD grafa  $G$  za funkcije  $f, g$ 
3   $\diamond \in \{\vee, \wedge, \oplus, \dots\}$                 // Binarna logička operacija
4   $\diamond(v_f, v_g) \sim \mathcal{O}(|G|^2)$                     // Kompleksnost algoritma

5  begin
6      if  $(value(v_f) \in \mathbb{B}) \vee (value(v_g) \in \mathbb{B})$  then
9          /* Rezultat je određen iz semantičke tablice za operator  $\diamond$  */
8           $r \leftarrow value(v_f) \diamond value(v_g)$ 
10         return  $r$ 
          /* Rekurzivni pozivi u skladu s redoslijedom logičkih varijabli */

11     else if  $index(v_f) < index(v_g)$  then
13          $x_i \leftarrow index(v_f)$ 
15          $t \leftarrow \diamond(high(v_f), g_v)$ 
17          $e \leftarrow \diamond(low(v_f), g_v)$ 

18     else if  $index(v_f) > index(v_g)$  then
20          $x_i \leftarrow index(v_g)$ 
22          $t \leftarrow \diamond(v_f, high(v_g))$ 
24          $e \leftarrow \diamond(v_f, low(v_g))$ 

          /* Indeks je jednak za logičke varijable iz  $v_f, v_g$  vrhova */

25     else
27          $x_i \leftarrow index(v_f)$ 
29          $t \leftarrow \diamond(high(v_f), high(v_g))$ 
31          $e \leftarrow \diamond(low(v_f), low(v_g))$ 

          /* Rezultat je novi vrh  $r \in \mathcal{V}(G)$  sa svojstvima */

33      $index(r) \leftarrow x_i$ 
35      $high(r) \leftarrow t$ 
37      $low(r) \leftarrow e$ 
39     return  $r$ 

```

Za operatora razlike $(v_f \setminus_m v_g)$, razlikujemo sljedeća tri slučaja:

1. $index(v_f) < index(v_g)$ razliku predstavlja unija elementarnih konjunkcija od $high(f)$ koje sadrže varijablu $index(v_f)$, te elementarnih konjunkcija od $low(f)$ koje ne sadrže varijablu $index(v_f)$, i nijedna nije sadržana u elementarnim konjunkcijama od g
2. $index(v_f) > index(v_g)$ razliku predstavljaju elementarne konjunkcije od f koje nisu sadržane u elementarnim konjunkcijama od $low(v_g)$, budući elementarne konjunkcije od f ne mogu sadržavati varijablu $index(v_g)$ zbog očuvanja redoslijeda varijabli u BDD grafu
3. $index(v_f) = index(v_g)$ razliku mogu predstavljati samo elementarne konjunkcije na nižim razinama BDD grafa, budući obje funkcije f, g imaju DNF zapis s konjunkcijama koje sadrže istu varijablu

Algoritam 2: Operator razlike za minimizaciju DNF zapisa monotone funkcije (Razlika)

Ulaz: $\backslash_m(v_f, v_g)$

Izlaz: $r \leftarrow v_f \backslash_m v_g$

```

1   $f, g: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$                                 // Monotone logičke funkcije na istom skupu varijabli
2   $v_f, v_g \in \mathcal{V}_G$                                 // Vrhovi iz BDD grafa  $G$  za funkcije  $f, g$ 
3   $\backslash_m(v_f, v_g) \sim \mathcal{O}(|G|^n)$                     // Kompleksnost algoritma
4  begin
5      if ( $value(v_f) \in \mathbb{B} \vee value(v_g) \in \mathbb{B}$ ) then
6          /* Rezultat je predefiniran za  $\backslash_m$  operator */
7          if ( $v_f \equiv 0 \vee v_g \equiv 1$ ) then
8              return 0
9          else if  $v_f \equiv 1$  then
10             return 1
11          else
12             return  $v_f$ 
13
14      /* Slučajevi I, II i III za operator  $\backslash_m$  */
15      else if  $index(v_f) < index(v_g)$  then
16           $x_i \leftarrow index(v_f)$ 
17           $t \leftarrow \backslash_m(high(v_f), v_g)$ 
18           $e \leftarrow \backslash_m(low(v_f), v_g)$ 
19
20      else if  $index(v_f) > index(v_g)$  then
21          return  $\backslash_m(v_f, low(v_g))$ 
22
23      else
24           $x_i \leftarrow index(v_f)$ 
25           $t \leftarrow \backslash_m(high(v_f), high(v_g))$ 
26           $e \leftarrow \backslash_m(low(v_f), low(v_g))$ 
27
28      /* Rezultat je novi vrh  $r \in \mathcal{V}(G)$  sa svojstvima */
29       $index(r) \leftarrow x_i$ 
30       $high(r) \leftarrow t$ 
31       $low(r) \leftarrow e$ 
32      return  $r$ 

```

Nakon što je definiran operator $\backslash_m$, implementacija algoritma 3 za minimizaciju monotone logičke funkcije direktna je primjena leme 3.2 na strukturi BDD grafa.

Algoritam 3: Nalaženje minimalnog DNF zapisa monotone logičke funkcije (Rauzy)

```

Ulaz:  $\text{mDNF}(v_f)$ 
Izlaz:  $r \leftarrow \text{mDNF}(v_f)$ 

1  $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$  // Monotona logička funkcija od  $n$  varijabli
2  $v_f \in \mathcal{V}_G$  // Vrh BDD grafa  $G$  za funkciju  $f$ 
3  $\text{mDNF}(v_f) \sim \mathcal{O}(2^n |G|^n)$  // Kompleksnost algoritma

4 begin
5   if  $\text{value}(v_f) \in \mathbb{B}$  then
6     return  $v_f$  // Logičke konstante imaju isti minimalni zapis
7   else
8     /* Neposredna implementacija Leme 3.2 */
9      $x_i \leftarrow \text{index}(v_f)$ 
10     $t \leftarrow \backslash_m(\text{mDNF}(\text{high}(v_f)), \text{low}(v_f))$ 
11     $e \leftarrow \text{mDNF}(\text{low}(v_f))$ 
12     $\text{index}(r) \leftarrow x_i$ 
13     $\text{high}(r) \leftarrow t$ 
14     $\text{low}(r) \leftarrow e$ 
15    return  $r$ 

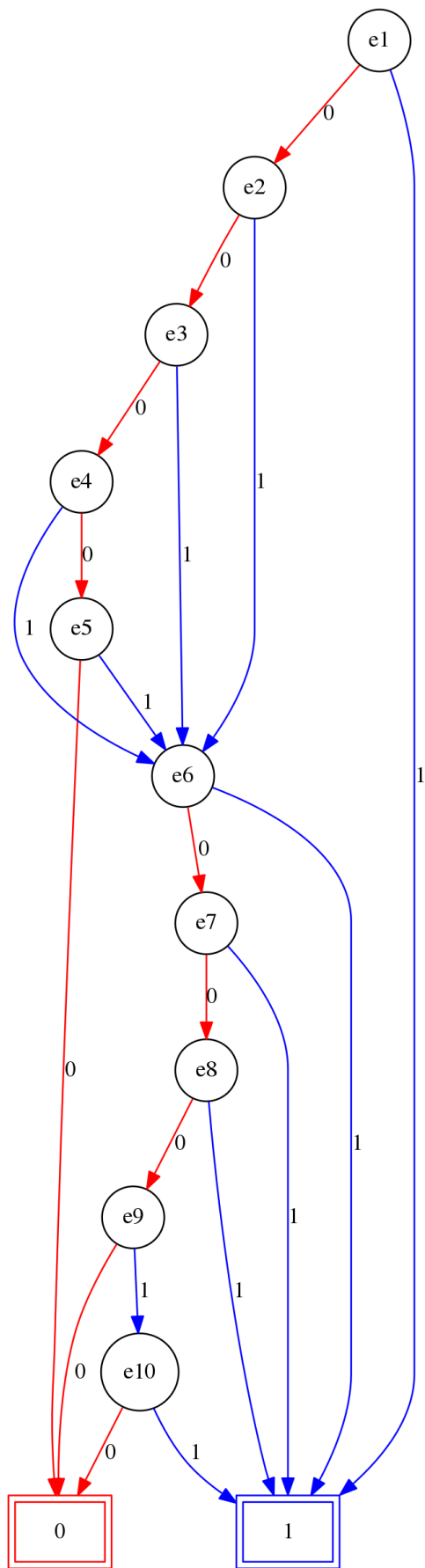
```

Neophodno je napomenuti kako se zbog superpolinomijalne kompleksnosti algoritma 2 i eksponencijalne kompleksnosti algoritma 3 stvarna implementacija na računalu izvodi tehnikom dinamičke optimizacije, spremanjem međurezultata (eng. memoization [40]) uz upotrebu privremenog spremnika uređenog za brzo pretraživanje po ključu (eng. hash [41]).

Primjenu algoritma 3 možemo ilustrirati na logičkoj funkciji stabla kvara 2.5 za simplificirani sustav hlađenja nuklearne elektrane. Za slučajne događaje $\{E_i: i = 1, \dots, 10\}$, definiramo indikatorske varijable

$$e_i = \begin{cases} 1, & \text{dogodio se } E_i \\ 0, & \text{nije se dogodio } E_i \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, 10$$

Uzmimo da je redoslijed indikatorskih varijabli određen njihovim indeksom događaja, tj. vrijedi $e_1 < e_2 < \dots < e_{10}$, tada BDD graf za minimalni DNF zapis logičke funkcije izgleda prema slici 3.4



Slika 3.4: BDD graf za minimalni DNF zapis stabla kvara 2.5

3.4 Primjena u analizi pouzdanosti

Kvantitativne analize stabla kvara zasnovane na djelomičnom poznavanju MCS skupa same po sebi su aproksimacija te su dobiveni rezultati najčešće samo ocjene za stvarne vrijednosti. Najveći doprinos greški i nesigurnosti u rezultatu svakako potječe iz gledišta na problem koji se rješava stablom kvara. Može se reći da najveći doprinos greški proizlazi iz:

- nedostatka razumijevanja sustava koji se modelira, posebice nepoznavanje mehanizama pojave kvarova (nedostatak iskustva, procjene),
- pogrešne logičke formulacije događaja u stablu kvara,
- nedostatka ili pogrešnog razumijevanja uzroka kvarova.

Navedene greške se djelom rješavaju standardizacijom postupka analize te neovisnim pregledom modela. Otklanjanje takvih grešaka je izvan okvira disertacije te zahtijeva drugačiji pristup problemu. Prilikom izrade stabla kvara model se gradi na više razina uvođenjem osnovnih i prijelaznih događaja. Rezultirajući model stabla tipično se pojednostavljuje određivanjem parcijalnog skupa MCS selekcijom samo onih minimalnih presjeka koji imaju vjerojatnost ishoda iznad granične [18] “cut-off” vrijednosti. Na tako dobivenom MCS skupu dalje se provode izračuni parametara pouzdanosti za osnovne i prijelazne događaje, te za kombinacije događaja. Osnovicu izračuna predstavlja formula iz korolara 2.1, primijenjena na parcijalnom MCS skupu.

Međutim, kako je pokazano u teoremu 3.6 za monotone logičke funkcije možemo odrediti cijeli MCS skup pomoću BDD grafova. Budući, cijeli MCS skup predstavlja čvrstu osnovicu za analizu pouzdanosti [42], ideja je provesti izračune parametara pouzdanosti na cijelom MCS skupu upotrebom BDD grafova. Time bismo anulirali posljedice primjene parcijalnog MCS skupa u izračunima, te bi se povećala točnost i smanjila nesigurnost dobivenih rezultata.

Za implementaciju izračuna potreban nam je osnovni algoritam za određivanje vjerojatnosti na strukturi BDD grafa. Prema definiciji 3.2 BDD grafa, jedno od svojstava vrhova je indeks indikatorske varijable za osnovne događaje kod BDD grafa za logičku funkciju stabla kvara. Osim indeksa indikatorske varijable poznat nam je brid kojim su povezana dva vrha u grafu, što omogućava primjenu jednostavnog obilaska stabla iz bilo kojeg vrha do vanjskog vrha. Za obilazak BDD grafa, u nekom vrhu kojeg smo dosegнули preko *high* brida smatramo da je nastupio osnovni događaj određen indeksom tog vrha, analogno, ako dosegujemo *low* bridom smatramo da nije nastupio osnovni događaj određen indeksom vrha.

Određivanje parametara pouzdanosti zahtijeva algoritam za određivanje uvjetne vjerojatnosti 2.12 nekog događaja, kojeg implementacija je dana u algoritmu 4. Iz tog razloga u algoritam 4 je dodan parametar σ koji sadrži skup događaja s poznatim ishodom. Algoritam 4 omogućava izračun parametara pouzdanosti iz BDD grafa stabla kvara kako je prikazano u tablici 3.1. U tablici 3.1 oznaka *TOP* predstavlja vršni događaj stabla kvara.

Algoritam 4: Uvjetna vjerojatnost uz interpretaciju $\sigma(f)$

```

Ulaz:  $\text{Prob}(v_f, \sigma)$ 
Izlaz:  $p \leftarrow P(\sigma(f) = 1)$ 
Data:  $\sigma(f)$  je skup indikatorskih varijabli za koje znamo ishod događaja

1  $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$  // Logička funkcija od  $n$  varijabli
2  $v_f \in \mathcal{V}_G$  // Vrh BDD grafa  $G$  za funkciju  $f$ 
3  $\text{Prob}(\sigma(f)) \sim \mathcal{O}(|G|^n)$  // Kompleksnost algoritma

4 begin
5   if  $\text{value}(v_f) = 0$  then
7     return 0 // Vanjski vrh 0 predstavlja nije se dogodio ishod
8   else if  $\text{value}(v_f) = 1$  then
10    return 1 // Vanjski vrh 1 predstavlja dogodio se ishod
11  else
12    /* Određivanje uvjetne vjerojatnosti uz interpretaciju  $\sigma(f)$  */
13     $p_i \leftarrow P(E_{\text{index}(v_f)} = 1)$ 
14    if  $\sigma(\text{index}(v_f)) = 0$  then
16      return  $(1 - p_i) \cdot \text{Prob}(\text{low}(v_f), \sigma)$  // Ishod  $E_{\text{index}(v_f)} = 0$ 
17    else if  $\sigma(\text{index}(v_f)) = 1$  then
19      return  $p_i \cdot \text{Prob}(\text{high}(v_f), \sigma)$  // Ishod  $E_{\text{index}(v_f)} = 1$ 
20    else
21      /* Nemamo informaciju o ishodu za događaj  $E_{\text{index}(v_f)}$  */
22      return  $\text{Prob}(\text{low}(v_f), \sigma) + p_i \cdot [\text{Prob}(\text{high}(v_f), \sigma) - \text{Prob}(\text{low}(v_f), \sigma)]$ 

```

Detaljnije objašnjenje za parametre pouzdanosti (mjere važnosti) je navedeno u literaturi [43], uz bitnu pretpostavku nezavisnosti osnovnih događaja. Pretpostavljena nezavisnost osnovnih događaja slijedi iz nezavisnosti komponenata u sustavu što znači da je funkcija distribucije slučajnog vektora $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_n)$ određena pouzdanošću komponenata koje čine odabrani sustav

$$P(X_i = 1) = p_i, P(X_i = 0) = 1 - p_i, \forall i = 1, \dots, n$$

Budući je ovisnost sustava o njegovim sastavnicama (komponentama) određena strukturnom funkcijom $\Phi(\mathbf{X})$, možemo mjere važnosti definirati u odnosu na funkciju $\Phi(\mathbf{X})$. Kako je pokazano u dijelu 2.2 problemu pouzdanosti sustava možemo pristupiti na dva načina: promatranjem minimalnih putanja ili promatranjem minimalnih presjeka sustava. U ovom radu problemu pristupamo promatranjem minimalnih presjeka sustava te u skladu s tim mjere važnosti možemo

izračunati primjenom algoritma 4 za uvjetnu vjerojatnost na potpunom MCS skupu. Dodatno je važno napomenuti da se ostali parametri pouzdanosti mogu izvesti korištenjem izraza za mjere važnosti iz tablice 3.1. Mjere važnosti definirane su u odnosu na definiciju strukturne funkcije za monotone sustave te u skladu s definicijama iz [44] uz slijedeće pretpostavke:

- S je monton sustav prema definiciji 2.26,
- TOP je vršni događaj opisan modelom stabla kvara čije pojavljivanje znači **ne** funkcioniranje sustava S , drugim riječima, pojavljivanje vršnog događaja TOP implicira $\Phi(\mathbf{X}) = 0$,
- pojavljivanje osnovnog događaja e_i uzrokuje **ne** funkcioniranje odgovarajuće komponente iz sustava S , drugim riječima, u strukturnoj funkciji slučajna varijabla X_i poprima vrijednost $X_i = 0$. Sukladno tome vrijedi jednakost $P(e_i) = P(X_i = 0)$, drugim riječima, vjerojatnost pojavljivanja osnovnog događaja jednaka je nepouzdanosti komponente.

Tablica 3.1: Definicija i implementacija mjera važnosti

Oznaka	Definicija	BDD implementacija
$\mathbf{P}(TOP)$	$P(\Phi(\mathbf{X}) = 0)$	$Prob(TOP, \emptyset)$
$\mathbf{RR}(e_i)$	$P(\Phi(\mathbf{X}) = 0) - P(\Phi(\mathbf{X}; 1_i) = 0)$	$\mathbf{P}(TOP) - Prob(TOP, \{\bar{e}_i\})$
$\mathbf{RRW}(e_i)$	$\frac{P(\Phi(\mathbf{X}) = 0)}{P(\Phi(\mathbf{X}; 1_i) = 0)}$	$\frac{\mathbf{P}(TOP)}{Prob(TOP, \{\bar{e}_i\})}$
$\mathbf{RA}(e_i)$	$P(\Phi(\mathbf{X}; 0_i) = 0) - P(\Phi(\mathbf{X}) = 0)$	$Prob(TOP, \{e_i\}) - \mathbf{P}(TOP)$
$\mathbf{RAW}(e_i)$	$\frac{P(\Phi(\mathbf{X}; 0_i) = 0)}{P(\Phi(\mathbf{X}) = 0)}$	$\frac{Prob(TOP, \{e_i\})}{\mathbf{P}(TOP)}$
$\mathbf{FV}(e_i)$	$\frac{P(\Phi(\mathbf{X}) = 0) - P(\Phi(\mathbf{X}; 1_i) = 0)}{P(\Phi(\mathbf{X}) = 0)}$	$\frac{\mathbf{RR}(e_i)}{\mathbf{P}(TOP)}$
$\mathbf{BI}(e_i)$	$P(\Phi(\mathbf{X}; 0_i) = 0) - P(\Phi(\mathbf{X}; 1_i) = 0)$	$\mathbf{RA}(e_i) + \mathbf{RR}(e_i)$
$\mathbf{CR}(e_i)$	$P(X_i = 0) \cdot \frac{P(\Phi(\mathbf{X}; 0_i) = 0) - P(\Phi(\mathbf{X}; 1_i) = 0)}{P(\Phi(\mathbf{X}) = 0)}$	$\frac{P(e_i) \cdot \mathbf{BI}(e_i)}{\mathbf{P}(TOP)}$

$\mathbf{P}(TOP)$ Vjerojatnost vršnog događaja (eng. Top Event Probability)

Vjerojatnost vršnog događaja uz pretpostavku nezavisnosti osnovnih događaja u FT modelu,

$\mathbf{RR}(e_i)$ Mjera smanjenja rizika (eng. Risk Reduction)

Definira mjeru (potencijal) za *smanjenje* nepouzdanosti sustava uz pretpostavku **ne** pojavljivanja događaj e_i , drugim riječima, pretpostavljamo: “*ispravnost* komponente na koju se odnosi događaj e_i ,”

$\mathbf{RRW}(e_i)$ Vrijednost mjere smanjenja rizika (eng. Risk Reduction Worth)

Slično mjeri $\mathbf{RR}(e_i)$ definiramo mjeru za smanjenje nepouzdanosti sustava, ali izraženu relativnim odnosom spram nepouzdanosti sustava. Iz tog razloga mjera se definira omjerom za razliku od prethodne definicije, kada je definirana u apsolutnom iznosu. Za vrijednost smanjenja rizika iskazanu u apsolutnom ili relativnom odnosu možemo reći da pokazuje potencijalnu štetu uzrokovanu ne funkcioniranjem komponente na koju se odnosi događaj e_i ,

RA(e_i) Mjera ostvarenog rizika (eng. Risk Achievement)

Analogno definiramo mjeru (potencijal) *doprinos*a riziku u apsolutnom iznosu uz pretpostavku pojavljivanja događaja e_i , drugim riječima, pretpostavljamo: “komponenta na koju se odnosi događaj e_i je *neispravna*,”

RAW(e_i) Vrijednost ostvarenog rizika (eng. Risk Achievement Worth)

Slično vrijednosti mjere smanjenja rizika, možemo definirati vrijednost mjere ostvarenog rizika uz pretpostavku pojavljivanja događaja e_i , drugim riječima, mjeru **RAW**(e_i) definiramo omjerom vjerojatnosti pojavljivanja događaja e_i spram vjerojatnosti vršnog događaja. Za ovu mjeru možemo reći da pokazuje potencijalno povećanje pouzdanosti sustava uzrokovano funkcioniranjem komponente na koju se odnosi događaj e_i ,

FV(e_i) Fussel-Vesely mjera važnosti za događaj e_i

Definira relativni doprinos komponente za rizik pojave vršnog događaja, te se obično povezuje s mjerom smanjenja rizika budući vrijedi relacija $FV(e_i) = \frac{\mathbf{RR}(e_i)}{\mathbf{P}(TOP)}$. Ponekad se za nju koristi naziv “Diagnostic Importance Factor” (**DIF**(e_i))

BI(e_i) Birnbaum mjera važnosti za događaj (eng. Birnbaum Importance) e_i

Definira vjerojatnost kritičnosti događaja e_i , drugim riječima, vjerojatnost da je sustav u takvom stanju kada je komponenta na koju se odnosi događaj kritična za stanje sustava, ponekad se naziva “Partial derivative” (**PD**(e_i)) ili “Marginal Importance Factor” (**MIF**(e_i)). Za Birnbaum mjeru važnosti možemo reći da pokazuje vjerojatnost podudaranja stanja komponente sa stanjem sustava, što je razlog da Birnbaum mjera važnosti za neku komponentu ovisi o strukturi sustava i pouzdanosti drugih komponenata u sustavu,

CR(e_i) Kritična pouzdanost (eng. Criticality Reliability)

Pokazuje važnost pouzdanosti komponente u sustavu, primjerice, najvažnija komponenta u serijskom sustavu je ona komponenta koja ima najmanju pouzdanost. Štoviše, ima značenje vjerojatnosti da je komponenta uzrok ne funkcioniranja sustava ako znamo da je sustav u tom stanju.

Za primjer primjene algoritma 4 možemo uzeti izračun mjera važnosti BDD pristupom te usporediti s konvencionalnim pristupom primijenjenim u programu *KIRAP* od KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute). Algoritam 4 primijenjen na BDD grafu sa slike 3.4 u usporedbi s konvencionalnim pristupom daje sljedeće rezultate prikazane u tablici 3.2. Usporedbom rezultata uočavamo malu razliku između konvencionalnog i BDD pristupa. Razlika je poslje-

Tablica 3.2: Usporedni prikaz izračuna parametara pouzdanosti na stablu kvara

Događaj	FV		RRW		RAW	
	KIRAP	BDD	KIRAP	BDD	KIRAP	BDD
E_1	0,4458	0,4463	1,80	1,81	4458,25	4463,11
E_2	0,4948	0,4943	1,98	1,98	49,99	49,94
E_3	0,0049	0,0049	1,01	1,00	50,48	49,94
E_4	0,0049	0,0049	1,01	1,00	50,48	49,94
E_5	0,0495	0,0490	1,05	1,05	50,44	49,94
E_6	0,0050	0,0049	1,01	1,00	50,92	50,37
E_7	0,0499	0,0494	1,05	1,05	50,88	50,37
E_8	0,4993	0,4987	2,00	1,99	50,43	50,37
E_9	0,0000	0,0000	1,00	1,00	1,05	1,05
E_{10}	0,0000	0,0000	1,00	1,00	1,05	1,05

dica približnog izračuna konvencionalnim pristupom koji koristi aproksimaciju prvog reda za formulu 2.3, dok BDD pristup daje točan rezultat budući je u potpunosti izračunata vrijednost iz formule 2.3. Posljedica približnog izračuna konvencionalnim pristupom vidi se na vjerojatnosti vršnog događaja, što je ujedno glavni uzrok male razlike u rezultatima za mjere važnosti.

Kako je pokazano na primjeru 2.3.2 konvencionalni pristup za vjerojatnost vršnog događaja daje rezultat $P_{MC}(TOP) = 2,2433 \cdot 10^{-6}$, dok BDD daje rezultat $P(TOP) = 2,2406 \cdot 10^{-6}$. Iako su oba pristupa primijenjena na kompletnom MCS skupu, BDD rezultat je točna vrijednost dok je konvencionalnim pristupom dobivena samo približna ocjena gornje ograde.

Međutim, određivanje minimalnog disjunktog zapisa upotrebom algoritma 3 za monotonu funkciju također omogućava izračun gornje ograde za vjerojatnost vršnog događaja primjenom približnih formula 2.4 i 2.5. Obje formule se mogu jednostavno implementirati na BDD zapisu minimalnog DNF skupa budući za koherentna stabla kvara minimalni se DNF skup podudara sa skupom minimalnih presjeka. Slijedeća dva algoritma su implementacija navedenih formula za gornju ogradu na BDD strukturi minimalnog DNF zapisa.

Algoritam 5: Gornja ograda iz skupa minimalnih presjeka

Ulaz: $P_{MC}(v_m, pmc, mcs)$
Izlaz: $pmc \leftarrow P_{MC}(v_m)$

```

1  $v_m \in \mathcal{V}_{DNF}$  // Vrh BDD grafa za DNF skup
2  $pmc \in [0, 1]$  // Izračunata ocjena gornje ograde za  $P_{MC}(v)$ 
3  $mcs \in [0, 1]$  // Parcijalno izračunata vjerojatnost dijela jednog minimalnog skupa
4  $P_{MC} \sim \mathcal{O}(|DNF|)$  // Kompleksnost algoritma
5 begin
6   if  $value(v_m) = 0$  then
7     return // Vanjski vrh 0 nije završetak minimalnog presjeka
8   else if  $value(v_m) = 1$  then
9      $pmc \leftarrow pmc * (1 - mcs)$ 
10    return // Vanjski vrh 1 završava jedan minimalni presjek
11  else
12    /*  $\epsilon$  strojna točnost,  $p_i$  je vjerojatnost za događaj  $index(v_m)$  */
13     $p_i \leftarrow P(E_{index(v_m)} = 1)$ 
14    if  $mcs * p_i \geq \epsilon$  then
15      return  $P_{MC}(high(v_m), pmc, p_i \cdot mcs)$ 
16    else if  $mcs \geq \epsilon$  then
17      return  $P_{MC}(low(v_m), pmc, mcs)$ 

```

U prvom algoritmu za gornju ogradu iz MCS skupa (algoritam 5) ideja je pratiti (iz vrha BDD zapisa za DNF skup) grane u kojima se pojavljuju osnovni događaji sadržani u minimalnim presjecima iz MCS skupa. Tijekom obilaska BDD strukture nailaskom na vrh s osnovnim događajem možemo ažurirati varijablu mcs , budući svi naredni minimalni presjeci koji slijede iz vrha putem $high$ brida sadrže osnovni događaj određen indeksom varijable iz tog vrha. Slično, za brid low nije potrebno ažurirati mcs varijablu budući minimalni presjeci iz te grane u stablu ne sadrže taj osnovni događaj. Dolaskom u završni vrh **1** varijabla mcs sadrži vjerojatnost jednog minimalnog presjeka određenog putanjom iz vrha v . Za primjenu algoritma potrebno je inicijalizirati varijablu $pmc \leftarrow 1$, te izračunati ocjenu za gornju ogradu iz MCS pomoću izraza

$$pmc \leftarrow 1 - P_{MC}(v_m, pmc, 1)$$

Kada su vjerojatnosti minimalnih presjeka dovoljno malene možemo za ocjenu gornje ograde koristiti zbroj vjerojatnosti minimalnih presjeka iz MCS skupa, drugim riječima, možemo koristiti ocjenu iz 2.4. Algoritam za ocjenu iz rijetkih (malo vjerojatnih) događaja definiran je

algoritmom 6 uz dodatnu napomenu, za efikasnu implementaciju algoritma možemo koristiti tehniku spremanja međurezultata.

Algoritam 6: Gornja ograda iz rijetkih događaja

```

Ulaz:  $P_{RE}(v_m)$ 
Izlaz:  $p \leftarrow P_{RE}(v_m)$ 
1  $v_m \in \mathcal{V}_{DNF}$  // Vrh BDD grafa za DNF skup
2  $P_{RE} \sim \mathcal{O}(|DNF|)$  // Kompleksnost algoritma
3 begin
4   if  $value(v_m) = 0$  then
6     return 0 // Vanjski vrh 0 nije završetak minimalnog presjeka
7   else if  $value(v_m) = 1$  then
9     return 1 // Vanjski vrh 1 završava minimalni presjek
10  else
11    /* Rekurzivni izračun,  $p_i$  je vjerojatnost za događaj  $index(v_m)$  */
12     $p_i \leftarrow P(E_{index(v_m)} = 1)$ 
14    return  $p_i * P_{RE}(high(v_m)) + P_{RE}(low(v_m))$ 

```

Osim izračuna ocjene gornje ograde za vjerojatnost vršnog događaja možemo iz BDD zapisa DNF skupa odabrati podskup MCS skupa (ili čak cijeli MCS) algoritmom sličnim 5. Selekciju minimalnih presjeka kod konvencionalnog pristupa obično zasnivamo na broju osnovnih događaja sadržanih u minimalnom presjeku, ili na vjerojatnosti pojavljivanja minimalnog presjeka, budući su takvi tipični kriteriji potrebni za formiranje parcijalnog MCS skupa kod konvencionalnog pristupa. Budući, kod BDD pristupa imamo potpuni MCS skup možemo kriterij selekcije definirati putem predikata za selekciju. Predikat selekcije je ustvari logička funkcija koja vraća **1** za onaj minimalni presjek koji zadovoljava uvjet definiran predikatom. Primjerice, predikat za izbor minimalnog presjeka MC po vjerojatnosti većoj od granične *CutOff* vjerojatnosti definira se uvjetom

$$P(MC) > \text{CutOff} \equiv \prod_{e_i \in MC} p(e_i) > \text{CutOff}$$

Predikati omogućavaju definiranje različitih uvjeta, te njihovo kombiniranje u složenije kriterije za selekciju. Sada algoritam za selekciju možemo zapisa na slijedeći način

Algoritam 7: Odabir podskupa skupa minimalnih presjeka

Ulaz: $MCS(v_m, mcs, F, mc)$
Izlaz: $mcs \leftarrow MCS(v_m, F)$

```

1   $v_m \in \mathcal{V}_{DNF}$  // Vrh BDD grafa za DNF skup
2   $mcs = \{mc_i\}$  // Skup minimalnih presjeka koji ispunjavaju predikat  $F$ 
3   $F: \{E_i\} \rightarrow \mathbb{B}$  // Predikat za kriterij odabira minimalnih presjeka
4   $mc = \{E_i\}$  // Parcijalni određeni minimalni presjek
5   $MCS \sim \mathcal{O}(|DNF|)$  // Kompleksnost algoritma

6  begin
7      if  $value(v_m) = 0$  then
9          return // Vanjski vrh 0 nije završetak minimalnog presjeka
10     else if  $value(v_m) = 1$  then
11         /* Predikat  $F$  selekcije određuje kriterij odabira minimalnog presjeka */
12         if  $F(mc) = 1$  then
13              $mcs = mcs \cup mc$ 
14         return // Vanjski vrh 1 završava jedan minimalni presjek
15     else
16         /*  $E_{index(v_m)}$  je osnovni događaj za  $index(v_m)$  */
17         if  $F(mc \cup \{E_{index(v_m)}\}) = 1$  then
18             return  $MCS(high(v_m), mcs, F, mc \cup \{E_{index(v_m)}\})$ 
19         return  $MCS(low(v_m), mcs, F, mc)$ 
21 
```

3.5 Problem redoslijeda varijabli

Kako je pokazano u teoremu 3.4 kompleksnost osnovnih logičkih operacija na BDD strukturi određena je veličinom BDD grafa za logičku funkciju. Isto tako smo vidjeli kako kompleksnost nalaženja minimalnog DNF zapisa 3 te izračun vjerojatnosti 4 ne ovise samo o veličini BDD grafa već su eksponencijalno (i superpolinomijalno) povezani s brojem varijabli u logičkoj funkciji. Dakle, postavlja se temeljno pitanje kako smanjiti veličinu BDD grafa za potrebe primjene na vrednovanju stabla kvara u nuklearnoj elektrani. Naravno, najbolji odgovor na to pitanje bio bi nalaženje najmanje veličine BDD grafa za funkciju predstavljenu stablom kvara. Trivijalno je jasno, veličina BDD grafa za neku logičku funkciju ne može biti manja od broja logičkih varijabli na kojima je funkcija definirana. Međutim, gornja ograda nije egzaktno određena; primjerice, jednostavnim razmatranjem zaključujemo: redoslijed n logičkih varijabli u Boole-Shannon razvoju 3.1 možemo urediti na jedan od $n!$ načina. Svakom izboru redoslijeda

odgovara BDD graf koji može imati do 2^n vrhova iz čega možemo zaključiti da kompleksnost određivanja najmanjeg zapisa predstavlja izbor jednog (ili više njih) od $n!$ mogućih redoslijeda, uz vremensku kompleksnost algoritma za izbor $\sim \mathcal{O}(n!2^n)$. Takvo razmatranje jasno pokazuje da problem određivanja minimalnog BDD grafa za neku logičku funkciju spada u klasu najtežih problema (**NP** – *teški* problem). Preciznijim razmatranjem uočava se valjanost sljedećeg teorema, koji nam daje bolju ocjenu gornje ograde za veličinu BDD grafa logičke funkcije.

Teorem 3.7 (BDD gornja ograda). Neka je $G = (\mathcal{V}_G, \mathcal{E}_G, \psi_G)$, BDD graf za logičku funkciju $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$. Tada vrijedi

$$|G| \leq (1 + \mathcal{O}(1)) \frac{2^n}{n}$$

Dokaz. Dokaz za

$$|G| \leq (3 + \mathcal{O}(1)) \frac{2^n}{n}$$

je izveden u [7] na bazi Shannonova rada [31], uz napomenu da je za konstrukciju dokaza korišten OBDD graf. Kasnije je Breitbart [45] dokazao precizniji odnos

$$|G| \leq (1 + \mathcal{O}(1)) \frac{2^n}{n}$$

Q.E.D.

Pitanje donje granice se pokazuje specifičnim u odnosu na oblik logičke funkcije, za što postoje brojni rezultati u literaturi s različitih područja. Primjerice, autori Bollig i Wegener su pokazali u radu [46] postojanje asimptotski optimalne granice za veličinu BDD u nekim jednostavnijim slučajevima. Osim za vezu između tipa logičke funkcije i veličine BDD grafa, interesantan rezultat [47] je nepostojanje čvrste veze između veličine BDD grafa te broja elementarnih konjunkcija u DNF zapisu monotone funkcije. Međutim, pokazuje se postojanje veze između redoslijeda varijabli i veličine BDD grafa [30] te da je problem određivanja optimalnog redoslijeda varijabli **NP** – *težak* problem kako je dokazano u radu [48]. Formalno, redoslijed varijabli definiramo

Definicija 3.3 (Redoslijed varijabli). *Redoslijed varijabli* π na skupu logičkih varijabli $X_n = \{x_1, \dots, x_n\}$ je permutacija indeksa iz skupa $I = \{1, \dots, n\}$. $\pi(i)$ označava poziciju varijable x_i u redoslijedu π , dok je $\pi^{-1}(X_n) = \{x_{\pi^{-1}(1)}, \dots, x_{\pi^{-1}(n)}\}$ oznaka permutacije skupa logičkih varijabli X_n u redoslijedu π .

Za problem određivanja donje granice za veličinu BDD grafa Bryant je u svom radu [49] zasnovanom na kompleksnosti protoka informacija u VLSI sklopovima, došao do korisnog rezultata. Trenutno je njegov pristup jedina općenita metoda dokazivanja donje granice za veličinu BDD grafa logičke funkcije, točnije za familije logičkih funkcija definiranih nad n varijabli. Osnovicu njegova pristupa predstavlja definicija *balansirane particije* za interpretacije logičke

funkcije te definiranje skupa “ključnih” varijabli koje su zaslužne za prijenos informacija između elemenata particije. Pojam balansirane particije definiran je na uravnoteženoj raspodjeli “ključnih” varijabli između elemenata particije.

Definicija 3.4 (Balansirana particija). Neka je $X_n = \{x_1, \dots, x_n\}$, skup logičkih varijabli, te neka je $Y \subset X_n$ njegov podskup (“ključne” varijable). Za realan broj $\omega \in [0, 1]$ kažemo da su skupovi $L, R \subset X_n$ *balansirana particija* od X_n ako vrijedi

$$\lfloor \omega |Y| \rfloor \leq |Y \cap L| \leq \lceil \omega |Y| \rceil$$

Obično se uzima $\omega = 0,5$ za ravnomjernu podjelu “ključnih” varijabli u balansiranoj particiji. Za logičku funkciju $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$, na balansiranoj particiji možemo definirati parcijalne interpretacije na skupovima L, R u oznaci

$$\sigma_L(f) = \sigma(f)|_{x_i \in L}$$

$$\sigma_R(f) = \sigma(f)|_{x_i \in R}$$

Očigledno vrijedi,

$$\sigma(f) = \sigma_L(f) \cup \sigma_R(f)$$

za interpretaciju funkcije f na skupu X_n . Pomoću σ_L, σ_R definiramo skup logičkih varijabli koje prenose informacije između podskupova particije za logičku funkciju. Zbog jednostavnosti razumijevanja, skup nazivamo *lažnjak skup* u duhu naziva “*fooling set*” koji upotrebljava Bryant u radu [49].

Definicija 3.5 (Lažnjak skup). Neka je L, R balansirana particija za funkciju $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$. Kažemo da je $\mathcal{A}(L, R) \subseteq \sigma_L$ *lažnjak skup* za funkciju f , ako vrijedi

$$\forall l_1, l_2 \in \mathcal{A}(L, R) \implies \exists r \in \sigma_R \mid f(l_1 \cup r) \neq f(l_2 \cup r)$$

Kardinalitet lažnjak skupa određuje donju granicu za veličinu BDD grafa funkcije.

Lema 3.3 (BDD donja granica). Ako svaka balansirana particija $\{L, R\}$ funkcije f ima *lažnjak skup* $\mathcal{A}(L, R)$ za koji vrijedi

$$\exists c \in \mathbb{R}, c > 1 : |\mathcal{A}(L, R)| \geq c^n$$

Tada za svaki BDD graf G_f funkcije f vrijedi

$$|G_f| \sim \Omega(c^n)$$

Dokaz. Neka je $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$ logička funkcija definirana na skupu varijabli $X_n = \{x_1, \dots, x_n\}$. Za proizvoljan redoslijed varijabli π , uzimamo indeks $k < n$, takav da skupovi

$$\begin{aligned} L &= \{\pi^{-1}(i) \mid 1 \leq i \leq k\} \\ R &= \{\pi^{-1}(i) \mid k+1 \leq i \leq n\} \end{aligned}$$

određuju $\omega > 0$ balansiranu particiju od X_n . Bilo koja interpretacija na skupu L definira šetnju na G_f koja ili završava u vanjskom vrhu ili u vrhu za koji vrijedi $\text{index}(v) \in R$. Takvih završnih vrhova ima najmanje $|\mathcal{A}(L, R)|$, jer ako ih ima manje tada vrijedi

$$\exists l_1, l_2 \in \mathcal{A}(L, R) \implies \forall r \in \sigma_R \mid f(l_1 \cup r) = f(l_2 \cup r)$$

što je protivno pretpostavci da je $\mathcal{A}(L, R)$ *lažnjak skup*. Odatle slijedi tvrdnja leme, budući vrijedi $|\mathcal{A}(L, R)| \geq c^n$. Q.E.D.

Obzirom na težinu problema određivanja optimalnog redoslijeda varijabli, za praktičnu primjenu BDD grafova prikladno je poznavanje redoslijeda bliskog optimalnom. Nažalost, čak i određivanje takvog redoslijeda je **NP** – *teški* problem kako je pokazano u radu [50]. Njihov rezultat sažet je u sljedećem teoremu za koji su autori prezentirali dokaz u svom radu.

Teorem 3.8. Za proizvoljan realan broj $\varepsilon > 0$, nije moguće odrediti ε -aproksimaciju (definicija 2.37) za redoslijed varijabli u polinomijalnom vremenu osim ako vrijedi **P** = **NP**.

Dokaz. Pogledati u [50]. Q.E.D.

Iako je taj rezultat dobro poznat, određeni napredak je ipak postignut u pronalaženju kvalitetnog redoslijeda varijabli koji omogućava nalaženje BDD grafa za logičku funkciju. Osnovicu algoritama za pronalaženje kvalitetnog redoslijeda predstavlja nam sljedeća lema zasnovana na fiksiranju pozicije jedne varijable u redoslijedu.

Lema 3.4 (Fiksna pozicija varijable). Neka je $X_k \subset \pi^{-1}(X_n)$ podskup od prvih k varijabli iz redoslijeda π , i neka je $x_i \in X_k$ varijabla za koju vrijedi $\pi_k(i) = k$ u svim permutacijama π_k skupa X_k . Tada vrijedi

$$\exists c \in \mathbb{N} : |\{v \in \mathcal{V}_G : \text{index}(v) = x_i\}| = c$$

Dokaz. Pogledati u [51]

Q.E.D.

Tvrdnja leme pokazuje: broj vrhova u BDD grafu funkcije s varijablom x_i na k – toj poziciji ostaje nepromijenjen za sve permutacije kod kojih nije promijenjen skup od prvih k varijabli. Drugim riječima, redoslijed prvih $k - 1$ varijabli možemo mijenjati kako nam odgovara sve dok nam je zadnja varijabla fiksirana. U radu [51] autori prezentiraju algoritam 8 za nalaženje optimalnog redoslijeda koji ima vremensku kompleksnost $\mathcal{O}(n^2 3^n)$, i prostornu kompleksnost $\mathcal{O}\left(\frac{3^n}{\sqrt{n}}\right)$. Drugi autori [8] su kasnije poboljšali algoritam i razvili nove algoritme zasnovane na istoj lemi 3.4, ali je kompleksnost algoritama ostala ista. Zbog eksponencijalne kompleksnosti, algoritam ili njegova poboljšanja primijenjivi su za funkcije s malim brojem varijabli, tipično $n \leq 50$.

Algoritam 8: Nalaženje optimalnog redoslijeda varijabli (Friedman & Supowith)

Ulaz: $\text{FS}(\mathcal{V}(G_f), n)$
Izlaz: $\pi \leftarrow \text{FS}(\mathcal{V}(G_f), n)$
Data: Skup svih varijabli iz G_f

```

1   $\mathcal{V}(G_f)$                                      // Skup vrhova BDD grafa funkcije  $f$ 
2   $n \in \mathbb{N}$                                      // Broj varijabli u definiciji funkcije  $f$ 
3   $X_n = \{1, \dots, x_n\}$                          // Skup svih varijabli logičke funkcije  $f$ 
4   $\text{FS}(\mathcal{V}(G_f), n) \sim \mathcal{O}(n^2 3^n)$            // Kompleksnost algoritma

5   $I = \{1, \dots, n\}$                              // Skup svih indeksa za varijable
6  begin
8       $\pi \leftarrow \emptyset$ 
9      for  $k \leftarrow 1$  to  $n$  do
10         foreach  $I_k \subseteq I$  do
11             /* Formiraj redoslijed usklađen s  $I_k$  podskupom indeksa */
12              $\pi_k \leftarrow I_k$ 
13              $\text{MinCost}(\pi_k) \leftarrow \infty$ 
14             foreach  $i \in I \setminus I_k$  do
15                 /* Izračunaj  $\text{MinCost}(\pi_k)$  za sve redoslijede s  $x_i$  na  $k$ -toj poziciji */
16                 /*
17                  $\pi_i \leftarrow \pi_{I - \{i\}} \cup \{x_i\}$ 
18                  $\text{count} \leftarrow \text{MinCost}(\pi_i)$ 
19                 if  $\text{count} < \text{MinCost}(\pi_k)$  then
20                     /* Sačuvaj u tablici za  $k$  poziciju */
21                      $\text{MinCost}(\pi_k) \leftarrow \text{count}$ 
22                      $\pi_k \leftarrow \{x_i\} \cup \pi_{I - \{i\}}$ 
23                 */
24             /* Najbolji redoslijed duljine  $k$  je potencijalno optimalan */
26          $\pi \leftarrow \pi_k$ 
28 return  $\pi$ 

```

Originalna implementacija algoritma koristi tablice za spremanje redoslijeda i minimalnog broja BDD vrhova, što je glavni razlog eksponencijalne prostorne kompleksnosti. Kasnije razvijeni algoritmi oslanjaju se na svojstvo lokalnosti zamjene dviju susjednih varijabli u BDD grafu, tj. na zamjenu indeksa za BDD vrhove susjednih varijabli. Efikasnost takve zamjene pokazao je Rudell u radu [52], u kojemu ujedno prezentira algoritam za smanjenje formiranog BDD grafa zasnovan na ideji lokalne zamjene varijabli. Njegova ideja lokalne zamjene susjednih varijabli predstavlja osnovu za implementaciju klase algoritama za *dinamičko* poboljšanje

postojećeg redoslijeda.

Rudellov pristup lokalnoj zamjeni susjednih varijabli zasniva se na primjeni Boole-Shannon razvoja (teorem 3.1) te kombiniranju članova uz susjedne varijable. Neka je $f: \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$, logička funkcija, prema propoziciji 3.1 možemo za svaki unutarnji v vrh BDD grafa definirati funkciju f_v . Uz oznake $f_l = f_{low(v)}$, $f_h = f_{high(v)}$ te ispuštanja logičke operacije $\wedge$ u zapisu zbog preglednosti, zamjena susjednih varijabli x_i, x_j za vrh v (tj. za funkciju f_v) svodi se na razvoj

$$\begin{aligned} f_v &= x_i f_h(\mathbf{x}; 1_i) \vee \bar{x}_i f_l(\mathbf{x}; 0_i) \\ &= x_i (x_j f_{hh}(\mathbf{x}; 1_i, 1_j) \vee \bar{x}_j f_{hl}(\mathbf{x}; 1_i, 0_j)) \vee \bar{x}_i (x_j f_{lh}(\mathbf{x}; 0_i, 1_j) \vee \bar{x}_j f_{ll}(\mathbf{x}; 0_i, 0_j)) \\ &= x_j (x_i f_{hh}(\mathbf{x}; 1_i, 1_j) \vee \bar{x}_i f_{lh}(\mathbf{x}; 0_i, 1_j)) \vee \bar{x}_j (x_i f_{hl}(\mathbf{x}; 1_i, 0_j) \vee \bar{x}_i f_{ll}(\mathbf{x}; 0_i, 0_j)) \\ &= x_j g_h(\mathbf{x}; 1_j) \vee \bar{x}_j g_l(\mathbf{x}; 0_j) \end{aligned}$$

Vidimo da se zamjena susjednih varijabli za neki vrh u BDD grafu svodi na zamjenu oznake varijable $x_i \leftrightarrow x_j$, te formiranje novog vrha $high(v)$ određenog funkcijom g_h i novog $low(v)$ vrha određenog funkcijom g_l . Formalno, struktura BDD grafa se mijenja na sljedeći način

$$\begin{aligned} index(v) &\leftarrow x_j \\ high(v) &\leftarrow x_i f_{hh}(\mathbf{x}; 1_i, 1_j) \vee \bar{x}_i f_{lh}(\mathbf{x}; 0_i, 1_j) \\ low(v) &\leftarrow x_i f_{hl}(\mathbf{x}; 1_i, 0_j) \vee \bar{x}_i f_{ll}(\mathbf{x}; 0_i, 0_j) \end{aligned}$$

Jedan od prvih algoritama za dinamičko poboljšanje redoslijeda sijanjem (eng. sifting), tj. filtriranjem najbolje pozicije za varijablu, razvio je Rudel u istom radu [52]. Sijanje, je iznimno važan korak u implementaciji novog pristupa za određivanje inicijalnog redoslijeda varijabli u pododjeljku za implementaciju novog algoritma 11 za nalaženje redoslijeda. Ideja algoritma 9 je nalaženje pozicije za varijablu x_i zamjenom sa susjednim varijablama dok takva zamjena rezultira smanjenjem broja vrhova u BDD grafu. Tijekom traženja pozicije za varijablu, ostale varijable ne mijenjaju relativnu poziciju u odnosu na druge varijable. Zbog lokalnosti zamjene varijabli jasno je da nađeni minimum gotovo sigurno nije globalni minimum. Traženje pozicije za varijablu x_i provodi se lokalnim zamjenama s drugim varijablama koje u trenutnom redoslijedu imaju poziciju s manjim ili većim indeksom.

Za implementaciju algoritma uobičajene su sljedeće optimizacije

- najprije tražimo bolju poziciju za varijable koje generiraju najviše vrhova u grafu, tj. razvrstavamo indekse pozicija varijabli prema padajućem broju vrhova u BDD grafu

$$I_s = \left\{ i_1, \dots, i_n : \left| G_{index(v)=i_j} \right| \geq \left| G_{index(v)=i_{j+1}} \right|, j = 1, \dots, n-1 \right\},$$

- traženje pozicije u jednom smjeru (prema završnim ili početnim vrhovima) prekidamo

Algoritam 9: Dinamičko poboljšanje redoslijeda varijabli sijanjem (Rudell)

Ulaz: $\mathcal{V}(G_f), \pi_0$
Izlaz: $\pi \leftarrow \text{Sift}(\mathcal{V}(G_f), \pi_0)$
Data: π_0 inicijalni redoslijed varijabli u BDD grafu G_f

```

1   $\mathcal{V}(G_f)$  // Skup vrhova BDD grafa funkcije  $f$ 
2   $n \in \mathbb{N}$  // broj varijabli u definiciji funkcije  $f$ 
3   $X_n = \{1, \dots, x_n\}$  // Skup svih varijabli logičke funkcije  $f$ 
4   $\text{FS}(\mathcal{V}(G_f), \pi_0) \sim \mathcal{O}(|G_f|^n)$  // Kompleksnost algoritma
5   $I = \{1, \dots, n\}$  // Skup svih indeksa za varijable
6   $\pi \leftarrow \pi_0$ 
7  begin
   /* Padajući sort indeksa varijabli prema broj vrhova u grafu */
9   $I_s = \left\{ i_1, \dots, i_n : |G_{\text{index}(v)=i_j}| \geq |G_{\text{index}(v)=i_{j+1}}|, j = 1, \dots, n-1 \right\}$ 
10 foreach  $i \in I_s$  do
12    $\text{Best}_i \leftarrow \pi(i)$  // Trenutna pozicija varijable je najbolja
14    $\text{Cost}_i \leftarrow |G_f|$  // Trenutni broj vrhova u grafu
15   while  $\pi(i) > 1$  do
   /* Filtriraj najbolju poziciju za varijablu prema gore */
17    $\pi(i) - 1 \longleftrightarrow \pi(i)$ 
19    $\text{Cost} \leftarrow |G_f|$ 
20   if  $\text{Cost} < \text{Cost}_i$  then
22   |  $\text{Best}_i \leftarrow \pi(i)$  // Trenutno najbolja je jedno mjesto prema gore
24   |  $\text{Cost}_i \leftarrow \text{Cost}$ 
25   while  $\pi(i) < n$  do
   /* Filtriraj najbolju poziciju za varijablu prema dolje */
27    $\pi(i) + 1 \longleftrightarrow \pi(i)$ 
29    $\text{Cost} \leftarrow |G_f|$ 
30   if  $\text{Cost} < \text{Cost}_i$  then
32   |  $\text{Best}_i \leftarrow \pi(i)$  // Trenutno najbolja je jedno mjesto prema dolje
34   |  $\text{Cost}_i \leftarrow \text{Cost}$ 
   /* Postavi varijablu na najbolju poziciju */
35   while  $\text{Best}_i > \pi(i)$  do
37   |  $\pi(i) + 1 \longleftrightarrow \pi(i)$ 
38   while  $\text{Best}_i < \pi(i)$  do
40   |  $\pi(i) - 1 \longleftrightarrow \pi(i)$ 
42 return  $\pi$ 

```

kada ukupan broj vrhova prelazi početni broj vrhova BDD grafa za neki postotak, drugim riječima, kriterij zaustavljanja traženja bolje pozicije u jednom smjeru glasi

$$|G'| \leq c \cdot |G| : c \in [1, 2]$$

gdje je $|G'|$ trenutni, a $|G|$ polazni broj vrhova u BDD grafu,

- traženje pozicije za istu varijablu možemo ponoviti nakon odrađenog ciklusa sa svim varijablama.

Druga klasa algoritama razvija se u smjeru nalaženja inicijalnog *statičkog* redoslijeda na osnovi strukturnih svojstava problema. Postojeći algoritmi u toj klasi spadaju u kategoriju heurističkih³¹ algoritama, drugim riječima nema ocjene kvalitete dobivenog rezultata. U pravilu se postojeći algoritmi za inicijalni redoslijed oslanjaju na zapažanja iz dosadašnje primjene binarnih dijagrama odlučivanja:

- Logičke varijable koje imaju najveći utjecaj na rezultat funkcije nalaze se bliže početku redoslijeda. Zapažanje možemo opravdati činjenicom da nam poznavanje vrijednosti logičke varijable koja je prisutna u najviše elementarnih konjunkcija u DNF zapisu, omogućava najveće pojednostavljenje DNF zapisa. Primjerice, poznavanjem vrijednost neke logičke varijable $x_i = 0$, znamo da su sve elementarne konjunkcije koje sadrže tu varijablu također 0 te se mogu ukloniti iz zapisa,
- Logičke varijable koje su topološki blizu u problemu koji razmatramo trebaju biti blizu i u redoslijedu za BDD graf. To zapažanje je posljedica očekivanja kako topološki bliske varijable imaju podjednak utjecaj na logičku funkciju koja opisuje polazni problem. Primjerice, u stablu kvara osnovni događaji koji se pojavljuju samo jednom za ulaz istih vrata imaju jednak utjecaj na pojavu vršnog događaja.

Obično se primjenom takvih zapažanja dodjeljuju “težine” za varijable, te se temeljem težina formira padajući redoslijed varijabli za izgradnju BDD grafa, tj. varijable s većom težinom dolaze na početak redoslijeda. U sljedećem poglavlju predstavljen je novi pristup određivanju inicijalnog redoslijeda varijabli zasnovan na određivanju “težine” razlike između stabla kvara i logičke funkcije predstavljene potpunim binarnim stablom.

³¹**heuristika** (prema grčki *εὕρισχεν*: nalaziti, otkrivati), u modernoj znanosti opisuje postupak koji može riješiti određenu vrstu problema, ali ne jamči uspješno rješenje (izvor: Hrvatska enciklopedija)

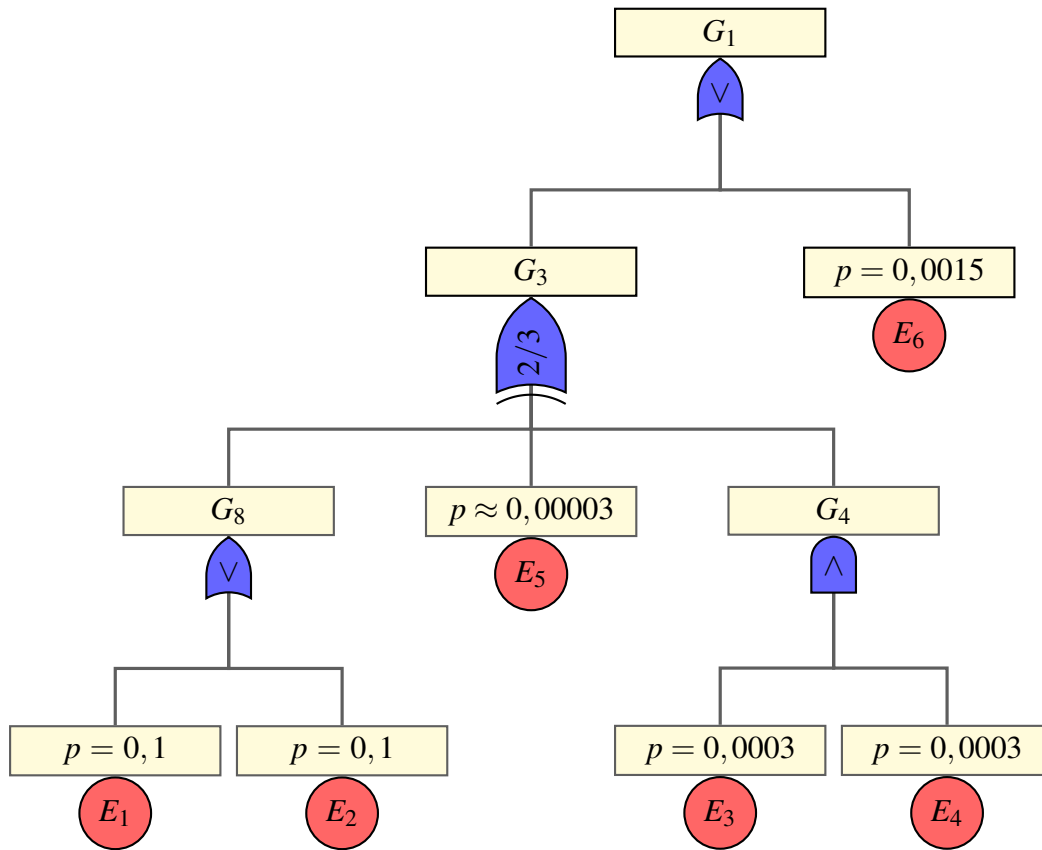
Poglavlje 4

Određivanje redoslijeda osnovnih događaja

Kako je pokazano u prethodnom poglavlju veličina BDD grafa određena je izborom redoslijeda varijabli tijekom Boole-Shannon razvoja (teorem 3.1) logičke funkcije. Međutim, problem određivanja optimalnog redoslijeda varijabli spada u klasu **NP** – *teških* problema, štoviše čak i određivanje dovoljno bliskog (ϵ -aproksimacija lema 3.8) redoslijeda spada u istu klasu. Težina problema opravdava upotrebu heurističkih postupaka kojima se može pronaći zadovoljavajući početni redoslijed za formiranje BDD grafa logičke funkcije. Nužno je napomenuti da za neke posebne klase logičkih funkcija možemo odrediti optimalan redoslijed varijabli polinomijalnim algoritmom kako je pokazano u radu [1] za logičke funkcije predstavljene formulama u kojima se svaka varijabla pojavljuje samo jednom (eng. *read-once* formula). Upravo su ti rezultati poslužili kao podloga za razvoj nove heuristike prezentirane u ovom radu. Međutim, budući logička funkcija stabla kvara ne spada u klase takvih funkcija potrebno je reducirati strukturu stabla kvara ekvivalentnim logičkim transformacijama. Nakon reduciranja stabla kvara u sljedećoj sekciji biti će detaljno objašnjen i predstavljen algoritam za implementaciju nove heuristike za određivanje inicijalnog redoslijeda osnovnih događaja u stablu kvara. Osim određivanja inicijalnog redoslijeda u trećoj sekciji objašnjena je tehnika dinamičkog poboljšanja redoslijeda tijekom formiranja BDD grafa koja je primjenjiva u novoj heuristici. Ostatak poglavlja posvećen je primjeni heuristike na modelima stabla kvara iz nuklearne elektrane i literature, te analizi dobivenih rezultata vrednovanjem modela stabla kvara primjenom BDD algoritama. Za potrebe ilustracije algoritma koristi se sljedeći jednostavan model stabla kvara prikazan na slici 4.1.

4.1 Redukcija stabla kvara

Prije analize stabla kvara uobičajeno se provodi redukcija stabla primjenom različitih pristupa. Jedan od pristupa je određivanje reduciranog podmodela stabla kvara funkcionalnom dekompo-



Slika 4.1: Jednostavan primjer modela stabla kvara

zicijom u odnosu na manji skup osnovnih događaja [53]. Tehnika funkcionalne dekompozicije zasniva se na određivanju manjeg skupa osnovnih događaja iz minimalnih putanja 2.32. Poznato je iz teorije matematičke logike da se logičke formule mogu prevesti u reducirani zapis upotrebom ekvivalentnih logičkih transformacija, više o tome u [54], [55]. Ekvivalentne logičke transformacije mogu se iterativno primjenjivati na modelu sve dok uspijevamo dobiti reduciranu logičku funkciju predstavljenu stablom kvara. Tipične transformacije koje se mogu primijeniti na stablu kvara sastoje se u primjeni pravila:

asocijativnost³² eliminiranje vrata koja su ulaz za vrata istog tipa. Promatramo li jedna vrata, koja su povezana na vrata s istom logičkom operacijom, te ako su to jedina vrata na koja su povezana, onda možemo sve ulaze za ta vrata prebaciti za ulaze na vrata na koja su povezana. Na taj način eliminiramo hijerarhijski odnos između vrata koji ne doprinosi strukturi logičke funkcije predstavljene modelom stabla kvara. Formalno asocijativnost se svodi na sljedeći postupak:

1. u stablu kvara prolazimo kroz sva vrata $G_i, i = 1, \dots, n$
2. za svaka vrata G_i promatramo ulaze za ta vrata $G_{ij}, j = 1, \dots, k$
3. ako su vrata G_{ij} vezana jedino na vrata G_i , te ako je logička operacija od G_{ij} jednaka

³²**asocijativnost** (srednjovj. lat. *associatio*) svojstvo neke binarne matematičke operacije jest da se rezultat ne mijenja bez obzira na združivanje operanada (izvor. Hrvatska enciklopedija)

logičkoj operaciji od G_i , tada povežemo sve ulaze od G_{ij} na vrata G_i i eliminiramo vrata G_{ij}

redundancija³³ nakon primjene pravila asocijativnosti možemo imati za neka vrata višestruki ulaz od istih vrata ili osnovnih događaja. Višestruke istovrsne ulaze za vrata eliminiramo primjenom pravila idempotentnosti za logičke operatore $\{\wedge, \vee\}$, tj. višestruke istovrsne ulaze zamjenjujemo primjenom pravila

$$F \wedge F \equiv F$$

$$F \vee F \equiv F$$

koja vrijede za svaku logičku formulu F . Formalno idempotentnost se svodi na sljedeći postupak:

1. u stablu kvara prolazimo kroz sva vrata $G_i, i = 1, \dots, n$
2. za svaka vrata G_i promatramo ulaze za ta vrata $G_{ij}, j = 1, \dots, k$
3. ako vrijedi $G_{ij_1} = G_{ij_2}$, za neki par $j_1, j_2 \in 1, \dots, k$ tada možemo eliminirati ulaz G_{ij_2}

apsorpcija³⁴ eliminacija ulaza za vrata primjenom zakona apsorpcije na operatorima $\{\wedge, \vee\}$. Drugim riječima, na logičku formulu predstavljenu stablom kvara primjenjujemo sljedeća pravila

$$(F \wedge G) \vee F \equiv F$$

$$(F \vee G) \wedge F \equiv F$$

koja vrijede za sve logičke formule F, G . Formalno apsorpcija se svodi na sljedeći postupak:

1. u stablu kvara prolazimo kroz sva vrata $G_i, i = 1, \dots, n$
2. za svaka vrata G_i promatramo ulaze za ta vrata $G_{ij}, j = 1, \dots, k$
3. ako za vrata G_{ij} imamo logički operator $\wedge$ (ili $\vee$), dok je za vrata G_i logički operator $\vee$ (ili $\wedge$), tada sve ulaze u vrata G_{ij} koja su istovremeno ulazi za vrata G_i možemo obrisati iz ulaza za vrata G_{ij}

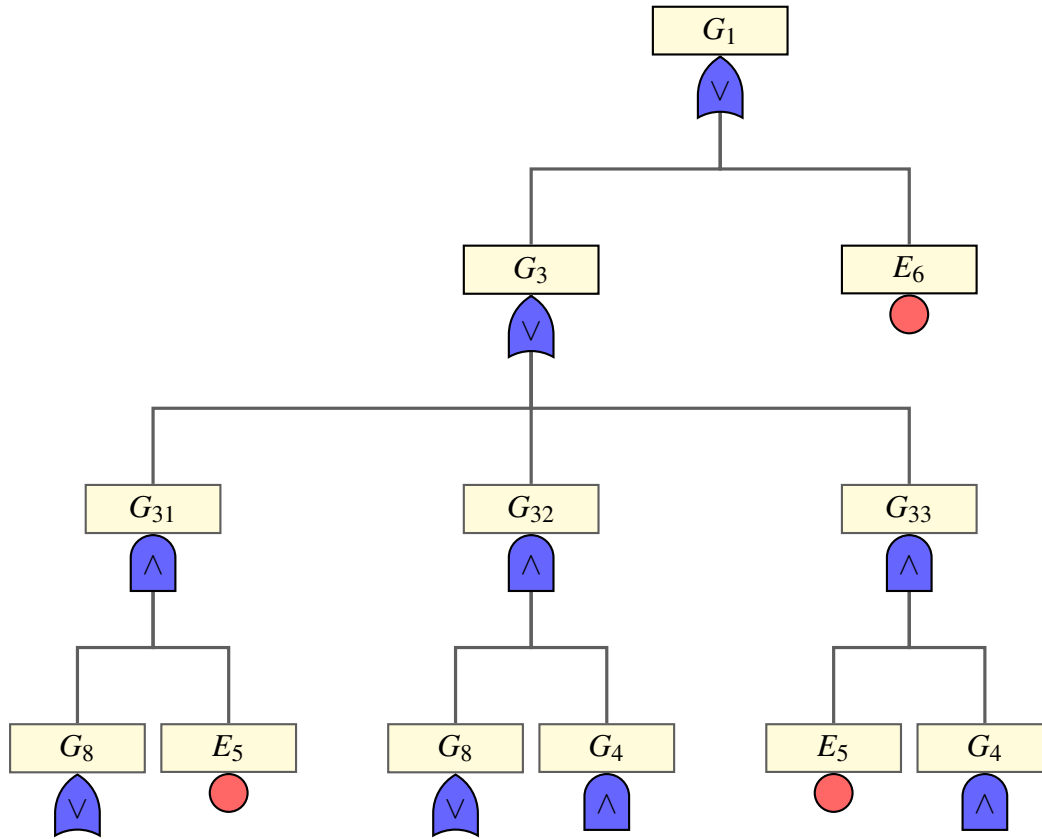
K/N ekspanzija³⁵ eliminacija K/N vrata zamjenom s ekvivalentnom kombinacijom $\{\wedge, \vee\}$ operatora. Drugim riječima, K/N vrata zamijenimo $\vee$ vratima koja za ulaz imaju $\wedge$ vrata dobivena primjenom sljedećeg rekurzivnog pravila

$$(k, F_1, \dots, F_n) = (F_1 \wedge (k-1, F_2, \dots, F_n)) \vee (k, F_2, \dots, F_n)$$

³³**redundancija** ili **zalihost** (lat. *redundantia: preobilje*) višak obavijesti u komunikaciji (izvor. Hrvatska enciklopedija)

³⁴**apsorpcija** (lat. *absorptio*) srkanje, upijanje (izvor. Hrvatska enciklopedija)

³⁵**ekspanzija** (kasnolat. *expansio*) širenje, rastezanje (ekspanzija volumena, ekspanzija svemira)



Slika 4.2: Stablo kvara iz slike 4.1 nakon ekspanzije G_3 vrata

Potrebno je napomenuti da postoje kompleksnija pravila od navedenog za ekspanziju K/N vrata kako je pokazano u radu [56].

Primjerice, možemo u stablu kvara 4.1 razviti G_3 vrata. Primjenom K/N pravila ekspanzije na G_3 vratima za $K = 2$, $N = 3$ dobijemo:

$$\begin{aligned}
 G_3 &= (2, G_8, E_5, G_4) \\
 &= (G_8 \wedge (1, E_5, G_4)) \vee (2, E_5, G_4) \\
 &= (G_8 \wedge (E_5 \vee G_4)) \vee (E_5 \wedge G_4) \\
 &= (G_8 \wedge E_5) \vee (G_8 \wedge G_4) \vee (E_5 \wedge G_4) \\
 &= G_{31} \vee G_{32} \vee G_{33}
 \end{aligned}$$

kako je prikazano na slici 4.2. Zbog preglednosti ostatak modela za vrata G_4, G_8 nije prikazan.

Osim reduciranja modela korisno je odrediti dijelove na strukturi stabla kvara koji se više-kratno koriste kao cjeline. Postupak određivanja takvih cjelina u strukturi stabla kvara naziva se *modularizacija* [57] stabla kvara. U primjeni susrećemo dva pristupa za određivanje modula na strukturi stabla kvara. Prvi pristup [58] zasnovan je na zapisivanju logičke formule upotrebom ekvivalentnih transformacija za detekciju i definiranje modula na stablu kvara koji sadrži samo $\{\wedge, \vee\}$ vrata. Drugi pristup [59] predstavlja varijantu Tarjanova algoritma za određivanje pod-

grafova usmjerenog grafa, te je neovisan o logičkom operatoru za vrata. Oba navedena pristupa daju ekvivalentne module za stablo kvara s $\{\wedge, \vee\}$ vratima, iz tog razloga odabran je drugi pristup zbog svoje neovisnosti o logičkom operatoru za vrata. Algoritam za određivanje modula u stablu kvara zasnovan je na dvostrukom obilasku stabla kvara po dubini te usporedbom redoslijeda obilaska vrata s redoslijedom obilaska njegovih ulaza. Implementaciju algoritma možemo provesti na sljedeći način:

1. formiramo listu vrata i osnovnih događaja u modelu stabla kvara obilaskom stabla po dubini. Tijekom obilaska za vrata i osnovne događaje bilježimo dva podatka: poziciju T_1 u redoslijedu prvog obilaska te poziciju T_2 zadnjih vrata koja za ulaz imaju ta vrata ili osnovni događaj,
2. u drugom prolazu po dubini za vrata G_i uzimamo minimalnu T_1 poziciju te maksimalnu T_2 poziciju svih ulaza za ta vrata. Ukoliko je T_1 podatak od G_i veći od minimalne T_1 pozicije svih ulaza i istovremeno T_2 podatak od G_i manji od maksimalne T_2 pozicije svih ulaza tada su vrata G_i vršni događaj za modul u stablu kvara.

Detaljniji opis i analiza algoritma s primjenom na stablima kvara izneseni su u radu [59].

4.2 Heuristika za određivanje redoslijeda

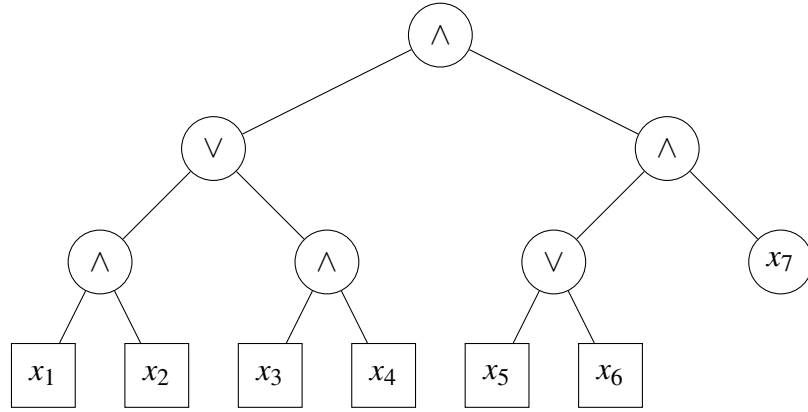
Osnovna ideja za izbor redoslijeda heuristikom dolazi od implementacije algoritma iz [1] na logičkim formulama s jednostrukim pojavljivanjem varijabli.

4.2.1 Logičke formule s jednostrukim pojavljivanjem varijabli

Logičke formule s jednostrukim pojavljivanjem varijabli predstavljamo binarnim stablom koje ima onoliko završnih vrhova koliko ima logičkih varijabli u formuli. Primjerice, logička formula

$$f(x_1, \dots, x_7) = ((x_1 \wedge x_2) \vee (x_3 \wedge x_4)) \wedge ((x_5 \vee x_6) \wedge x_7)$$

je takvog oblika te je možemo prikazati binarnim stablom na slici 4.3. Algoritam iz rada [1] zasnovan je na rekurzivnoj primjeni dviju relacija za različite logičke operatore. Jedna relacija se odnosi na skup $\{\wedge, \vee\}$ logičkih operatora, dok se druga relacija primjenjuje za logički $\oplus$ (*xor*) operator. Kako je prikazano u radu, rekurzivnom primjenom navedenih relacija možemo odrediti optimalan redoslijed za logičke varijable na način da je broj vrhova u BDD zapisu minimalan. Autori su također u radu odredili gornju i donju granicu za broj vrhova u BDD zapisu za proizvoljne funkcije predstavljene logičkim formulama s jednostrukim pojavljivanjem varijabli. Budući su stabla kvara, općenito, logičke formule općeg oblika te ne odgovaraju takvim funkcijama, njihov algoritam nije direktno primjenjiv za određivanje redoslijeda osnovnih događaja u stablu kvara.



Slika 4.3: Binarno stablo za logičku formulu $((x_1 \wedge x_2) \vee (x_3 \wedge x_4)) \wedge ((x_5 \vee x_6) \wedge x_7)$

4.2.2 Nova heuristika za redoslijed osnovnih događaja

Osnovna ideja nove heuristike [60] za redoslijed sastoji se u primjeni rekurzivne relacije za $\{\wedge, \vee\}$ iz rada [1] na vratima kada vrata predstavljaju formulu s jednostrukim pojavljivanjem osnovnih događaja, dok se za ostala vrata redoslijed određuje usporedbom broja vrhova iz BDD zapisa za ulaze. Heuristiku u osnovi možemo podijeliti u dva dijela: prvi dio je algoritam za kombiniranje dva redoslijeda iz ulaza za neka vrata, dok drugi dio predstavlja osnovni algoritam heuristike pomoću kojega određujemo redoslijed za vrata iz permutacije ulaza.

Heuristika za kombiniranje više redoslijeda

Kombiniranje redoslijeda iz ulaza za neka vrata implementira se definiranjem dvaju pomoćnih brojača $(Nodes_1, Nodes_2)$ za svaki osnovni događaj u redoslijedu. Brojač $Nodes_1(e)$ ima značenje procjene broja BDD čvorova za osnovni događaj e kod implementacije BDD algoritama upotrebom komplementiranih bridova [61], dok $Nodes_2(e)$ predstavlja procjenu broja BDD čvorova za osnovni događaj e u implementaciji bez komplementiranih bridova. Formalno kombiniranje redoslijeda osnovnih događaja za redoslijed iz ulaza možemo predstaviti algoritmom 10.

U algoritmu je vidljivo da redoslijed za vrata računamo s lijeva iz redoslijeda za ulaze tih vrata. Za svaki sljedeći redoslijed iz ulaza u vrata provjeravamo postojanje zajedničkih osnovnih događaja između dotičnog redoslijeda i trenutno izračunatog redoslijeda. Ukoliko postoje zajednički osnovni događaji novi redoslijed računamo usporedbom s_1, s_2 za svaki događaj iz oba razmatrana redoslijeda. U suprotnom, ako ne postoje zajednički osnovni događaji to znači da imamo logičku funkciju s jednostrukim pojavljivanjem osnovnih događaja na koju možemo primijeniti algoritam iz [1]. Algoritam možemo ilustrirati na primjeru izračuna redoslijeda za logičku funkciju nakon ekspanzije G_3 kako je prikazano na slici 4.2.

$$G_3(E_1, E_2, E_3, E_4, E_5) = G_{31}(E_1, E_2, E_5) \vee G_{32}(E_1, E_2, E_3, E_4) \vee G_{33}(E_3, E_4, E_5)$$

Naime, pretpostavimo da smo odredili redoslijede π_1, π_2, π_3 za logičke funkcije G_{31}, G_{32}, G_{33} i neka su osnovni događaji u redoslijedu s parovima vrijednosti za brojače $Nodes_1, Nodes_2$ poredani na sljedeći način

- $\pi_1 = \{(3, 6) : \{E_5(1, 2), E_1(1, 2), E_2(1, 2)\}\}$
- $\pi_2 = \{(4, 8) : \{E_3(1, 2), E_4(1, 2), E_1(1, 2), E_2(1, 2)\}\}$
- $\pi_3 = \{(3, 6) : \{E_5(1, 2), E_3(1, 2), E_4(1, 2)\}\}$

U prvom koraku glavne petlje redoslijed π_1 je dodan na prazan redoslijed π , nakon čega u glavnoj petlji kombiniramo redoslijede na sljedeći način:

- kombiniramo π, π_2

$$\pi = \{(3, 6) : \{E_5(1, 2), E_1(1, 2), E_2(1, 2)\}\}$$

$$\pi_2 = \{(4, 8) : \{E_3(1, 2), E_4(1, 2), E_1(1, 2), E_2(1, 2)\}\}$$
 1. $e_1 = E_5(1, 2), e_2 = E_3(1, 2), \pi_n = (2, 4) : \{E_3(2, 4)\}$
 2. $e_1 = E_5(1, 2), e_2 = E_4(1, 2), \pi_n = (4, 8) : \{E_3(2, 4), E_4(2, 4)\}$
 3. $e_1 = E_5(1, 2), e_2 = E_1(1, 2), \pi_n = (6, 12) : \{E_3(2, 4), E_4(2, 4), E_1(2, 4)\}$
 4. $e_1 = E_5(1, 2), e_2 = E_2(1, 2), \pi_n = (8, 16) : \{E_3(2, 4), E_4(2, 4), E_1(2, 4), E_2(2, 4)\}$
 5. $e_1 = E_5(1, 2), e_2 = \emptyset, \pi_n = (9, 18) : \{E_3(2, 4), E_4(2, 4), E_1(2, 4), E_2(2, 4), E_5(1, 2)\}$
- kombiniramo π, π_3

$$\pi = (9, 18) : \{E_3(2, 4), E_4(2, 4), E_1(2, 4), E_2(2, 4), E_5(1, 2)\}$$

$$\pi_3 = (3, 6) : \{E_5(1, 2), E_3(1, 2), E_4(1, 2)\}$$
 1. $e_1 = E_3(2, 4), e_2 = E_5(1, 2), \pi_n = (3, 6) : \{E_5(3, 6)\}$
 2. $e_1 = E_3(2, 4), e_2 = E_3(1, 2), \pi_n = (6, 12) : \{E_5(3, 6), E_3(3, 6)\}$
 3. $e_1 = E_4(2, 4), e_2 = E_4(1, 2), \pi_n = (9, 18) : \{E_5(3, 6), E_3(3, 6), E_4(3, 6)\}$
 4. $e_1 = E_1(2, 4), e_2 = \emptyset, \pi_n = (11, 22) : \{E_5(3, 6), E_3(3, 6), E_4(3, 6), E_1(2, 4)\}$
 5. $e_1 = E_2(2, 4), e_2 = \emptyset, \pi_n = (13, 26) : \{E_5(3, 6), E_3(3, 6), E_4(3, 6), E_1(2, 4), E_2(2, 4)\}$
- redoslijed za logičku funkciju G_3 određen je s π_n

$$\pi = (13, 26) : \{E_5(3, 6), E_3(3, 6), E_4(3, 6), E_1(2, 4), E_2(2, 4)\}$$

Time smo izračunali novi redoslijed za logičku funkciju G_3 s odgovarajućim vrijednostima za brojače $Nodes_1 = 13, Nodes_2 = 26$. Brojač $Nodes_1$ nam pokazuje da je 13 procijenjeni broj vrhova u BDD zapisu logičke funkcije određene vratima G_3 .

Algoritam za određivanje redoslijeda za vrata

Kako je pokazano u podpoglavlju 4.1 o reduciranju stabla kvara, monotoni FT model je moguće zapisati pomoću $\{\wedge, \vee\}$ operatora. Za tako zapisani reducirani monotoni FT model određivanje redoslijeda se uobičajeno provodi obilaskom stabla kvara po dubini. Tijekom obilaska po dubini redoslijed se određuje od razine osnovnog događaja prema složenijim prijelaznim događajima koji su predstavljeni vratima u modelu stabla kvara. Jasno je da redoslijed na razini osnovnog događaja predstavlja sam osnovni događaj, budući osnovni događaj određuje elementarnu

Algoritam 10: Heuristika za kombiniranje više redoslijeda

```

Ulaz:  $Merge(A_G, \pi)$ 
Izlaz:  $\pi \leftarrow Merge(A_G)$ 

1  $A_G = \{\pi_i, i = 1, \dots, k\}$  // Skup redoslijeda za ulaze u vrata  $G$ 
2  $\pi = \{e_j, j = 1, \dots, l\}$  // Početni skup osnovnih događaja za redoslijed
3  $Merge(A_G) \sim \mathcal{O}(k \cdot \max|\pi_i|)$  // Kompleksnost algoritma

4 begin
5   foreach  $\pi_i \in A_G$  do
6     if  $(\pi_i \cap \pi) \neq \emptyset$  then
7        $\pi_n \leftarrow \emptyset$ 
8        $Nodes_{1,2} \leftarrow 0$ 
9       foreach  $e \in (\pi, \pi_i)$  do
10         $e_1 \leftarrow Next\{e \in \pi: e \notin \pi_n\}$  // sljedeći osnovni događaj iz  $\pi$ 
11         $e_2 \leftarrow Next\{e \in \pi_i: e \notin \pi_n\}$  // sljedeći osnovni događaj iz  $\pi_i$ 
12         $s_1 \leftarrow 2 \cdot Nodes_1(e_1) + Nodes_2(e_2)$ 
13         $s_2 \leftarrow 2 \cdot Nodes_1(e_2) + Nodes_2(e_1)$ 
14        if  $s_1 < s_2$  then
15           $\pi_n \leftarrow \{\pi_n, e_1\}$  // dodaj  $e_1$  na kraj redoslijeda  $\pi_n$ 
16           $Nodes_1(e_1) \leftarrow Nodes_1(e_1) + Nodes_1(e_2)$ 
17           $Nodes_2(e_1) \leftarrow s_1$ 
18        else
19           $\pi_n \leftarrow \{\pi_n, e_2\}$  // dodaj  $e_2$  na kraj redoslijeda  $\pi_n$ 
20           $Nodes_1(e_2) \leftarrow Nodes_1(e_1) + Nodes_1(e_2)$ 
21           $Nodes_2(e_2) \leftarrow s_2$ 
22         $\pi \leftarrow \pi_n$  // novi redoslijed za vrata  $G$  je kombinacija  $\pi, \pi_i$ 
23   else
24      $s_1 \leftarrow 2 \cdot Nodes_1(\pi) + Nodes_2(\pi_i)$ 
25      $s_2 \leftarrow 2 \cdot Nodes_1(\pi_i) + Nodes_2(\pi)$ 
26      $Nodes_1(\pi) \leftarrow Nodes_1(\pi) + Nodes_1(\pi_i)$ 
27     if  $s_1 < s_2$  then
28        $\pi \leftarrow \{\pi, \pi_i\}$  // dodaj redoslijed  $\pi_i$  na kraj  $\pi$ 
29        $Nodes_2(\pi) \leftarrow s_1$ 
30     else
31        $\pi \leftarrow \{\pi_i, \pi\}$  // dodaj redoslijed  $\pi$  nakon  $\pi_i$ 
32        $Nodes_2(\pi) \leftarrow s_2$ 
33   return  $\pi$  // kombinirani redoslijed osnovnih događaja
    
```

logičku funkciju identiteta $f(e) = e$ za osnovni događaj e . Vrata u stablu kvara definiraju logičku funkciju određenu operatorom na ulazima, drugim riječima logička funkcija f_G određena operatorom na vratima G poprima jedan od sljedeća dva oblika:

- za operator $\wedge$ to je oblik $f_G = \bigwedge_{i=1}^k f_i$,

- dok je za operator $\vee$ to oblik $f_G = \bigvee_{i=1}^k f_i$,

gdje su f_i logičke funkcije predstavljene ulaznim vratima G_i za vrata G .

Imajući to u vidu možemo tijekom obilaska stabla kvara po dubini odrediti redoslijed osnovnih događaja za vrata iz redoslijeda za ulaze. Prema tome, potrebno je primjenom algoritma 10 odrediti najbolji redoslijed osnovnih događaja za vrata na koja nailazimo tijekom obilaska po dubini što je osnovna ideja nove heuristike za redoslijed. Heuristiku možemo formalno opisati algoritmom 11 iz kojega je jasno vidljiva ideja određivanja redoslijeda osnovnih događaja za vrata G . Osnovicu pristupa predstavlja petlja koja generira različite permutacije ulaza za G , te primjenom algoritma 10 formira novi redoslijed za vrata. Novo formirani redoslijed se primjenjuje za određivanje BDD zapisa za vrata, te se na taj način određuje točan broj vrhova u BDD zapisu. Na osnovu točnog broja vrhova izabire se redoslijed koji ima najmanji broj BDD vrhova u zapisu, čime taj redoslijed postaje redoslijedom osnovnih događaja za vrata G . Budući je broj permutacija ulaza od vrata određen brojem $k!$ gdje je k broj ulaza za vrata, u algoritmu se generiranje permutacija prekida kada broj generiranih permutacija dostigne vrijednost zadanog parametra L_p .

Algoritam 11: Heuristika za određivanje redoslijeda za jedna vrata

Ulaz: $RedoslijedVrata(G, L_p)$
Izlaz: $\pi \leftarrow RedoslijedVrata(G, L_p)$

```

1   $G = \{G_i : G_i \text{ je ulaz za } G\}$  // Skup svih ulaza za vrata  $G$ 
2   $L_p \in \mathbb{N}$  // Maksimalni broj permutacija
3   $A \leftarrow \{\pi_j\}$  // Skup redoslijeda za permutiranje
4   $F \leftarrow \{\pi_l\}$  // Skup redoslijeda koji se ne permutiraju
5   $RedoslijedVrata \sim \mathcal{O}(L_p \cdot \frac{2^k}{k})$  //  $k$  broj varijabli u redoslijedu za vrata  $G$ 

6  begin
8       $\pi_F \leftarrow \{e_i\}$  // osnovni događaji koji su neposredni ulaz za  $G$ 
10      $F \leftarrow \{\pi_j : M_j \in G_i\}$  // redoslijedi za module  $M_j$  koji su neposredni ulaz za  $G$ 
12      $\pi_F \leftarrow Merge(F, \pi_F)$  // početna vrijednost za redoslijed od  $G$ 
13     <Inicijalizacija implementacije BDD programskog paketa>
14      $best \leftarrow \infty$ 
15     foreach  $A_n \in {}^n P_A$  do
16         /* Nova permutacija ulaza od  $G$  koji nisu osnovni događaji ili moduli */
17          $\pi_n \leftarrow Merge(A_n, \pi_F)$  // generiranje novog redoslijeda
18         <Formiranje  $BDD_G$  zapisa za  $G$  primjenom redoslijeda  $\pi_n$ >
19         if  $|BDD_G| < best$  then
20              $\pi \leftarrow \pi_n$  // novi najbolji redoslijed
21              $best \leftarrow |BDD_G|$ 
22         if  $n \geq L_p$  then
23             break
24     <Opcija – primjena dinamičkog poboljšanja redoslijeda  $\pi$ >
25     return  $\pi$  // redoslijed osnovnih događaja za vrata  $G$ 
    
```

Primjerice, pomoću heuristike iz algoritma 11 možemo odrediti redoslijed za vrata G_3 u primjeru 4.2 za model stabla kvara. Vrata G_3 imaju neposredni ulaz iz triju vrata, te je polje A postavljeno na listu $A = \{G_{31}, G_{32}, G_{33}\}$. U petlji za generiranje permutacija polje A_n poprimit će svih 6 mogućih vrijednosti iz kojih pomoću algoritma 10 formiramo redoslijed $\pi(A_i)$ za svaku kombinaciju.

1. $A_1 = \{G_{31}, G_{32}, G_{33}\}, \pi(A_1) = (13, 26) : \{E_5(3, 6), E_3(3, 6), E_4(3, 6), E_1(2, 4), E_2(2, 4)\}$
2. $A_2 = \{G_{31}, G_{33}, G_{32}\}, \pi(A_2) = (14, 28) : \{E_3(3, 6), E_4(3, 6), E_1(3, 6), E_2(3, 6), E_5(2, 4)\}$
3. $A_3 = \{G_{32}, G_{31}, G_{33}\}, \pi(A_3) = (13, 26) : \{E_5(3, 6), E_3(3, 6), E_4(3, 6), E_1(2, 4), E_2(2, 4)\}$
4. $A_4 = \{G_{32}, G_{33}, G_{31}\}, \pi(A_4) = (13, 26) : \{E_5(3, 6), E_1(3, 6), E_2(3, 6), E_3(2, 4), E_4(2, 4)\}$
5. $A_5 = \{G_{33}, G_{31}, G_{32}\}, \pi(A_5) = (14, 28) : \{E_3(3, 6), E_4(3, 6), E_1(3, 6), E_2(3, 6), E_5(2, 4)\}$

6. $A_6 = \{G_{33}, G_{32}, G_{31}\}$, $\pi(A_6) = (13, 26): \{E_5(3, 6), E_1(3, 6), E_2(3, 6), E_3(2, 4), E_4(2, 4)\}$
 Kako je pokazano na primjeru za algoritam 10, redoslijed za A_1 permutaciju je

$$\pi(A_1) = (13, 26): \{E_5(3, 6), E_3(3, 6), E_4(3, 6), E_1(2, 4), E_2(2, 4)\}$$

Na sličan način nalazimo redoslijed za ostale permutacije $\pi(A_i), i = 2, \dots, 6$. Od svih redoslijeda odabiremo onaj redoslijed pomoću kojeg je BDD zapis za vrata najmanji, za vrata G_3 to je redoslijed $\pi(A_1)$.

Algoritam za određivanje redoslijeda za stablo kvara

Jasno je da je posljednji događaj prilikom obilaska stabla kvara vršni događaj, te je redoslijed za vršni događaj u stvari redoslijed za cijeli model stabla kvara.

Algoritam 12: Heuristika za određivanje redoslijeda za stablo kvara

Ulaz: *Redoslijed*(*Top*)
Izlaz: $\pi \leftarrow \text{Redoslijed}(\text{Top})$

```

1  Top =  $f(E_1, \dots, E_n)$                                 // Vršni događaj za stablo kvara
2  Vrata  $\leftarrow \{G_i: i = 1, \dots, k\}$                     // Lista svih vrata iz stabla kvara u DFS poretku
3  Redoslijed  $\sim \mathcal{O}(5!|Vrata|^{\frac{2^n}{n}})$                     // Kompleksnost algoritma
4  procedure DFS(G, Visited)
6      Visited  $\leftarrow \text{Visited} \cup \{G\}$                     // Označimo vrata obrađenima
7      foreach  $G_i \in G$  do
9          /* Obilazimo sva vrata  $G_i$  koja su ulaz za  $G$  */
10         if  $G_i \notin \text{Visited}$  then
12             DFS( $G_i$ , Visited)                    // Rekurzivni poziv za obilazak  $G_i$  vrata
12     Vrata  $\leftarrow \text{Vrata} \cup \{G\}$ 
13 begin
15     Visited  $\leftarrow \emptyset$                                 // Inicijalizacija skupa posjećenih vrata
17     Vrata  $\leftarrow \emptyset$                                 // Inicijalizacija liste vrata u DFS poretku
19     DFS(Top, Visited)                    // Određivanje DFS rasporeda vrata za vršni događaj
20     foreach  $G_i \in \text{Vrata}$  do
22         /* Određivanje najboljeg redoslijeda za vrata  $G_i$  uz ograničenje broja
           permutacija u petlji za funkciju RedoslijedVrata na  $5! = 120$  */
22          $\pi(G_i) \leftarrow \text{RedoslijedVrata}(G_i, 5!)$ 
24     return  $\pi(\text{Top})$                     // redoslijed osnovnih događaja za vršni događaj Top

```

Primjenom algoritma 12 na primjeru iz slike 4.2 dobijemo ocjenu 13 za očekivani broj vrhova u BDD prikazu stabla kvara. Zanimljivo je napomenuti da je stvarni broj vrhova u generiranom BDD prikazu 10.

Dinamičko poboljšanje redoslijeda za vrata

Inicijalni redoslijed određen algoritmom 12 može se tijekom formiranja BDD zapisa dodatno popraviti korištenjem neke od metoda dinamičkog poboljšanja redoslijeda [6]. Dinamičko poboljšanje zasnovano je na zamjeni pozicije susjednih varijabli u redoslijedu koju ostvarujemo primjenom algoritma iz rada [52]. Međutim, osim navedenog osnovnog algoritma poželjno je isti unaprijediti detekcijom simetrije između varijabli u redoslijedu kako je pokazano u radovima [62] i [63]. U ovom radu, za određivanje redoslijeda osnovnih događaja kod zahtjevnijih modela stabla kvara odlučio sam upotrijebiti osnovni algoritam 9 zbog njegove jednostavnosti za implementaciju. Važno je napomenuti da izabrani algoritam u primjeni daje poboljšanje redoslijeda za zahtjevnije modele koje mi je omogućilo vrednovanje najsloženijeg dostupnog modela stabla kvara. Za primjer iz slike 4.2, algoritam 9 daje poboljšani redoslijed koji smanjuje broj vrhova u BDD zapisu na 9.

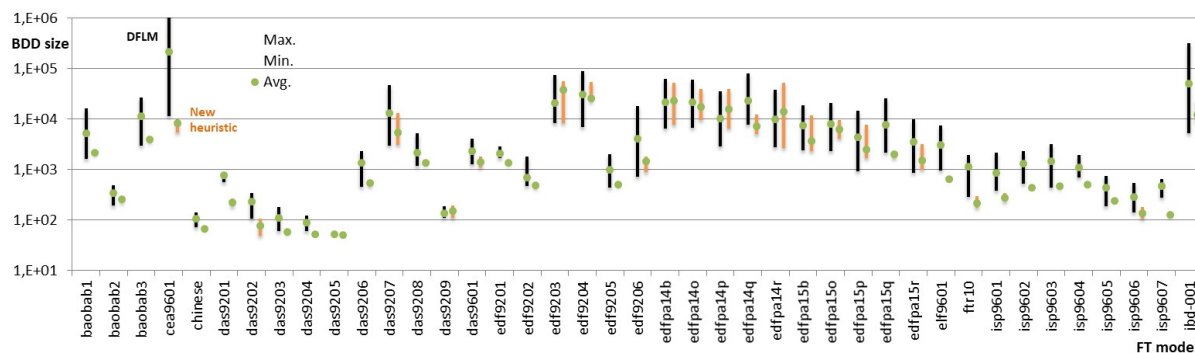
4.3 Provjera ispravnosti novog algoritma

Za provjeru ispravnosti heuristike i testiranje kvalitete dobivenih redoslijeda koristio sam primjere iz literature [64], [65], te primjere iz modela za nuklearnu elektranu Krško. Svojstva odabranih modela stabla kvara prikazana su u dodatku A1. Rezultati usporedbe DFLM pristupa i nove heuristike na malim i srednje velikim primjerima iz literature prikazani su u tablici 4.1. Modele dijelimo na male i srednje u odnosu na proizvoljno postavljenu granicu od ukupno 1000 ulaza za vrata u primjeru stabla kvara. Navedeni modeli predstavljaju primjere stabla kvara iz različitih izvora s različitim karakteristikama prema broju osnovnih događaja, broju vrata (prijelazni događaji), te broju ulaza za vrata. Rezultati u tablici su prikupljeni iz 100 pokretanja algoritma za DFLM i novu heuristiku uz slučajni izbor poretka ulaza za vrata u primjerima. U tablici je prikazana statistika minimalnog, prosječnog i maksimalnog (stupci Minimum, Prosjek, Maksimum) broja vrhova u BDD zapisu modela stabla kvara za redoslijede generirane DFLM i novom heuristikom, uz napomenu manji broj vrhova u BDD zapisu znači kvalitetniji redoslijed. Stupac minimum nam daje broj vrhova za najmanji BDD zapis nakon 100 pokretanja algoritma za DFLM te za novu heuristiku, dok stupac maksimum daje broj vrhova za najveći BDD zapis iz istog broja pokretanja algoritama. Prosjek je aritmetička sredina broja vrhova za BDD zapis iz svih redoslijeda za odabranu heuristiku.

Iz tablice se jasno razaznaje da su najbolji rezultati za oba pristupa približno poravnati po broju vrhova u BDD zapisu, što je vidljivo iz stupca minimum koji pokazuje najmanji BDD

Tablica 4.1: Broj BDD vrhova za DFLM i novu heuristiku na srednje velikim modelima

Stablo kvara	DFLM heuristika			Nova heuristika		
	Minimum	Prosjek	Maksimum	Minimum	Prosjek	Maksimum
baobab1	1.615	5.194	16.162	2.025	2.207	2.439
baobab2	197	346	494	226	259	290
baobab3	2.992	11.461	26.509	3.582	3.995	4.341
cea9601	11.415	215.573	1.533.444	5.400	8.185	10.042
chinese	73	105	143	66	68	71
das9201	569	775	898	191	230	273
das9202	108	236	347	50	79	108
das9203	60	111	179	55	59	62
das9204	61	89	89	53	53	53
das9205	52	52	52	521	52	52
das9206	449	1.388	2.340	474	546	636
das9207	2.934	13.375	47.178	3.143	5.395	13.229
das9208	1.186	2.131	5.240	1.270	1.357	1.516
das9209	110	137	191	111	156	200
das9601	1.277	2.343	4.140	1.109	1.444	1.843
edf9201	1.706	2.094	2.910	1.302	1.391	1.446
edf9202	471	689	1.841	440	488	577
edf9203	8.381	20.892	74.845	8.338	38.372	55.828
edf9204	6.864	30.958	89.934	22.544	25.458	54.402
edf9205	448	1.011	2.037	471	505	554
edf9206	733	4.095	17.880	907	1.477	1.849
edfpa14b	6.616	21.735	63.683	7.890	22.916	52.043
edfpa14o	6.829	21.805	60.925	9.563	17.506	38.646
edfpa14p	2.855	10.401	35.887	6.579	15.526	39.259
edfpa14q	7.683	23.304	79.589	4.990	7.108	12.336
edfpa14r	2.817	9.982	38.363	2.714	13.951	51.827
edfpa15b	2.400	7.542	18.808	2.322	3.700	11.820
edfpa15o	2.356	7.910	20.817	4.111	6.170	9.567
edfpa15p	914	4.326	14.906	1.703	2.522	7.715
edfpa15q	2.175	7.677	25.879	1.698	2.013	2.333
edfpa15r	861	3.543	9.990	1.005	1.521	3.227
elf9601	962	3.114	7.620	638	652	665
ftr10	289	1.144	1.928	181	220	297
isp9601	383	853	2.193	238	283	346
isp9602	529	1.302	2.313	444	452	459
isp9603	440	1.464	3.203	443	481	522
isp9604	701	1.103	1.930	487	518	525
isp9605	185	439	748	244	244	244
isp9606	142	283	550	108	137	184
isp9607	274	469	643	122	130	140
jbd-001	5.248	50.328	321.132	8.569	12.191	24.280
Zbroj	86.315	491.779	2.537.993	105.858	200.017	406.246



Slika 4.4: Usporedba broja BDD vrhova za DFLM i novu heuristiku na srednje velikim modelima

zapis za DFLM i novu heuristiku. Međutim, usporedba prosječne veličine generiranog BDD zapisa između dviju metoda jasno pokazuje prednost nove heuristike u odnosu na DFLM pristup. Također, jasno je vidljivo iz rezultata da je maksimalni broj vrhova u prosjeku znatno manji ($\approx 7,6$ puta) kod nove heuristike u odnosu na DFLM pristup. Zanimljivo je pogledati omjere između zbrojeva po stupcima za minimalan, prosječan i maksimalan broj vrhova u BDD zapisu (tablica A2.1 u dodatku A2). Primjerice, omjer između prosječnih i minimalnih vrijednosti za DFLM iznosi $\approx 5,7$ dok kod nove heuristike taj omjer iznosi $\approx 1,9$. Omjer između zbroja maksimalnih i minimalnih vrijednosti kod DFLM iznosi $\approx 29,4$ ($\approx 13,4$ bez *cea9601* modela) dok za novu heuristiku taj omjer iznosi svega $\approx 3,9$. Navedeni omjeri jasno pokazuju stabilnost nove heuristike u odnosu na DFLM pristup, te znatno manju osjetljivost na poredak ulaza za vrata. Grafički prikaz usporedbe veličine (minimum, prosjek, maksimum) BDD zapisa za DFLM i novu heuristiku na srednje velikim testnim modelima dat je na slici 4.4. Na slici je prikazan interval $[minimum, maksimum]$ te pozicija prosječne veličine BDD zapisa za testirane modele. Iz slike se jasno uočava znatno kraći interval za veličinu BDD zapisa kod nove heuristike, drugim riječima, veličina BDD zapisa pomoću redoslijeda iz nove heuristike značajno manje odstupa od prosječne veličine.

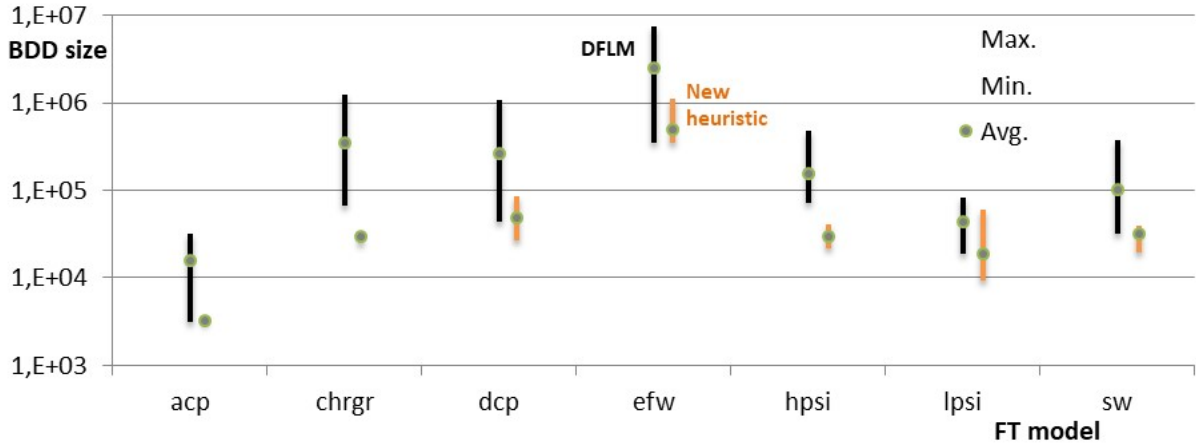
Pored statističkih pokazatelja za novu heuristiku prikupljeni su podaci koji prikazuju prosječan omjer između procjene i stvarnog broja vrhova u BDD zapisu. Ti podatci su prikazani u tablici [A2.1](#) iz dodatka [A2](#). Iz tablice uočavamo kako je procjena broja BDD vrhova iz nove heuristike veća (u prosjeku $\approx 4,45$ puta) od stvarnog broja vrhova u BDD zapisu. Također, uočavamo kako se primjenom dinamičkog poboljšanja redoslijeda iz algoritma [9](#) nakon formiranja BDD zapisa broj vrhova dodatno smanjio (za faktor $\approx 1,85$). Rezultati jasno ukazuju na uporabljivost i svrsihodnost primijenjene metode dinamičkog poboljšanja.

Osim primjera iz literature, nova heuristika je provjerena na realnim kompleksnim stablima kvara iz modela za nuklearnu elektranu Krško. Navedeni modeli predstavljaju stabla kvara koja imaju zbirno više od 1000 ulaza za vrata te ih smatramo velikim modelima. Rezultati usporedbe DFLM i nove heuristike na velikim modelima predstavljeni su u tablici 4.2, uz odgovarajući grafički prikaz na slici 4.5. Zbog veličine modela za DFLM pristup primijenjena je

Tablica 4.2: Usporedba broja BDD vrhova za DFLM i novu heuristiku na velikim modelima

Stablo kvara	DFLM heuristika			Nova heuristika		
	Minimum	Prosjek	Maksimum	Minimum	Prosjek	Maksimum
acp	3.092	15.705	31.972	3.047	3.270	3.584
chrgr	67.032	348.155	1.237.888	25.305	29.626	31.505
dcp	43.835	265.403	1.088.955	26.660	49.013	83.504
efw	350.408	2.466.618	7.488.392	349.251	490.275	1.070.978
hpsi	70.827	153.712	480.635	21.369	29.370	41.164
lpsi	18.863	44.505	82.147	9.516	18.962	60.552
sw	32.210	103.408	379.953	19.421	31.422	39.385
Zbroj	586.267	3.397.506	10.789.942	454.569	651.938	1.330.672
cored1	---	---	---	19M	23M	39M
cored2	---	---	---	337M	499M	541M

metoda uključivanja dinamičkog poboljšanja redoslijeda varijabli, što je standardna metoda koja se koristi u primjeni BDD na velikim modelima. Metoda uključivanja dinamičkog poboljšanja sastoji se u automatskoj primjeni promjene redoslijeda varijabli (algoritam 9) tijekom generiranja BDD zapisa. Drugim riječima, njegova primjena prepuštena je implementaciji programskog paketa za generiranje BDD te se obično aktivira nakon reorganizacije memorijskog prostora za spremanje BDD strukture. Iz istog razloga, u algoritmu 11 primijenjeno je opcionalno dinamičko poboljšanje pomoću algoritma 9, na generiranim redoslijedima s procijenjenim brojem BDD vrhova iz intervala $[1M, 10M]$. Za najveće modele (*cored1*, *cored2*) DFLM pristupom nije uspješno generiran nijedan redoslijed pomoću kojeg je moguće dobiti BDD zapis stabla kvara. Međutim, pomoću nove heuristike uspješno su pronađeni redoslijedi s kojima je moguće formirati BDD zapis svih testiranih modela. Također se iz rezultata razaznaje da nova heuristika zadržava svojstvo stabilnosti kod generiranja redoslijeda za modele stabla kvara. Prosječan omjer za minimalan broj vrhova je porastao na $\approx 1,9$ u usporedbi s prosječnim omjerom za testove iz literature, što više time se pokazuje da nova heuristika generira kvalitetniji (u smislu manjeg broja vrhova u BDD zapisu) redoslijed od DFLM pristupa. Prosječan broj vrhova za redoslijed dobiven novom heuristikom je preko pet ($\approx 5,4$) puta manji od prosječnog broja vrhova dobivenog redoslijedom iz DFLM pristupa. Činjenica da automatsko dinamičko poboljšanje kod DFLM pristupa nije omogućilo formiranje BDD zapisa za najveće modele (*cored1*, *cored2*) dok je dinamičko poboljšanje kod nove heuristike polučilo rezultat pokazuje potencijal koji nova heuristika ima u odnosu na DFLM pristup.



Slika 4.5: Interval rezultata za BDD broj vrhova na NEK modelima stabla kvara

4.4 Postupak kvantitativnog i kvalitativnog vrednovanja stabla kvara

Nakon uspješnog određivanja redoslijeda na modelu stabla kvara možemo provesti postupak kvantitativnog i kvalitativnog vrednovanje upotrebom algoritama 3 za određivanje potpunog MCS skupa i algoritma 4 za određivanje uvjetne vjerojatnosti te odrediti mjere važnosti prema definiciji iz tablice 3.1. Drugim riječima, na BDD zapisu formiranom pomoću redoslijeda iz algoritma 12 možemo provesti kvalitativnu i kvantitativnu analizu. Za ilustraciju postupka vrednovanja možemo uzeti primjer kvalitativne i kvantitativne analize na modelu stabla kvara iz slike 2.5. Budući se radi o malom modelu s deset osnovnih događaja, za provođenje analize nije nužno odrediti kvalitetan redoslijed osnovnih događaja. Iz tog razloga možemo izabrati bilo koji redoslijed, primjerice: $\{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6, E_7, E_8, E_9, E_{10}\}$ te provesti vrednovanje na modelu primjenom binarnih dijagrama odlučivanja. Osnovni rezultati vrednovanja za testni model 4.1 prikazani su u tablici B0.1 iz dodatka B. U tablici B0.1 dat je prikaz osnovnih rezultata za model, te su prikazane vrijednosti za sljedeće izračunate parametre:

- $P(TOP)$ – vjerojatnost vršnog događaja, u primjeru vjerojatnost za vrata G_1 ,
- $P_{RE}(TOP)$ – gornja ograda vjerojatnosti vršnog događaja izračunata pomoću algoritma 6. Prema definiciji 2.4 predstavlja zbroj vjerojatnosti za sve minimalne presjeke iz skupa minimalnih presjeka $MCS = \{MC_i\}$,
- $P_{MC}(TOP)$ – gornja ograda vjerojatnosti vršnog događaja izračunata pomoću algoritma 5. Prema definiciji 2.5 predstavlja komplement umnoška vjerojatnosti za komplemente minimalnih presjeka iz skupa svih minimalnih presjeka $MCS = \{MC_i\}$,
- $|MCS|$ – kardinalitet skupa svih minimalnih presjeka, tj. broj minimalnih presjeka u skupu svih minimalnih presjeka,
- MC_i – jedan minimalni presjek, minimalni skup osnovnih događaja koji uzrokuje pojavu vršnog događaja.

Osim osnovnih rezultata, na modelu 4.1 možemo odrediti parametre pouzdanosti prema definiciji iz tablice 3.1. Rezultati dobiveni primjenom binarnih dijagrama odlučivanja prikazani su tablicom 3.2 iz poglavlja 3. Kako je vidljivo iz priloženih tablica, postupak vrednovanja stabla kvara možemo u potpunosti provesti primjenom binarnih dijagrama odlučivanja.

4.4.1 Vrednovanje testnih modela stabla kvara

Na sličan način, nakon određivanja redoslijeda osnovnih događaja algoritmom 12 isti postupak je proveden na primjerima iz nuklearne elektrane te je provedeno vrednovanje na dobivenim skupovima minimalnih presjeka. U prvoj tablici 4.3 prikazani su rezultati za vjerojatnost vršnog događaja izračunati iz BDD zapisa pomoću tri prezentirana algoritma:

- algoritam 4 – točna vrijednost vjerojatnosti vršnog događaja (stupac $P(TOP)$),
- algoritam 5 – gornja ograda vjerojatnosti vršnog događaja, primjenom ocjene gornje ograde iz skupa minimalnih presjeka (stupac $P_{MC}(TOP)$),
- algoritam 6 – gornja ograda vjerojatnosti vršnog događaja, primjenom približne ocjene prvog reda iz rijetkih događaja za cijeli skup minimalnih presjeka (stupac $P_{RE}(TOP)$).

U zadnjem bloku (stupci ispod **KIRAP**) prikazani su rezultati izračuna gornje ograde vjerojatnosti vršnog događaja konvencionalnim pristupom (stupac P_{KIRAP} na manjem dijelu skupa minimalnih presjeka. Dodatno je za izračune gornjih ograda određena relativna greška u postotku spram točne vrijednosti vjerojatnosti vršnog događaja prema formuli

$$r_i = \frac{|P(TOP) - P_i(TOP)|}{P(TOP)} \cdot 100\%, \quad i \in \{RE, MC, KIRAP\}$$

Iz rezultata je vidljiva razlika u vrijednostima koja je posljedica različitosti u pristupima izračunu vjerojatnost vršnog događaja primjenom potpunog skupa presjeka ili primjenom približnog izračuna na cijelokupnom (ili djelomičnom za **KIRAP**) skupu minimalnih presjeka. Na primjerima stabla kvara za događaje u osnovnim modelima (bez $cored_i$) razlika je manja od 5%, s izuzetkom modela *chrgr* na kojem je razlika približno 33%. Međutim, iako je razlika $|P(TOP) - P_{RE}(TOP)|$, te $|P(TOP) - P_{MC}(TOP)|$ nešto veća na tom modelu ipak se primjenom konvencionalnog pristupa ne uočava bitna razlika u mjerama važnosti za osnovne događaja (potpuni rezultati u dodatku B2), te se također ne uočava ni razlika u mjerama važnosti za dio skupa minimalnih presjeka. Usporedbom rezultata BDD pristupa za model *chrgr* s konvencionalnim pristupom iz programa KIRAP (potpuni rezultati u dodatku C2) vidimo praktično podudaranje mjera važnosti za osnovne događaje, te Fussel-Vesely mjere za minimalne presjeke koja je ovdje izračunata radi jednostavnije usporedbe s rezultatima konvencionalnog pristupa iz programa KIRAP. Na primjerima stabala kvara za niz neželjenih događaja $cored_i$ razlika je još nešto veća, primjerice, za najsloženiji model stabla događaja $cored_2$ razlika iznosi približno 71%. Veću razliku na tom modelu možemo pripisati brojnosti skupa minimalnih presjeka, što

Tablica 4.3: Vjerojatnost vršnog događaja primjenom algoritma: 4, 5, 6

Model	BDD				KIRAP		
	$P(TOP)$	$P_{RE}(TOP)$	r_{re}	$P_{MC}(TOP)$	r_{mc}	P_{KIRAP}	r_{kirap}
<i>acp</i>	$6,08E-3$	$6,34E-3$	4,3%	$6,33E-3$	4,1%	$6,34E-3$	4,3%
<i>chrgr</i>	$8,83E-5$	$1,17E-4$	32,9%	$1,17E-4$	32,9%	$1,17E-4$	32,9%
<i>dcp</i>	$1,56E-7$	$1,56E-7$	0,0%	$1,56E-7$	0,0%	$1,56E-7$	0,0%
<i>efw</i>	$1,06E-3$	$1,11E-3$	4,3%	$1,11E-3$	4,3%	$1,11E-3$	4,3%
<i>hpsi</i>	$8,90E-4$	$9,22E-4$	3,5%	$9,21E-4$	3,5%	$9,21E-4$	3,5%
<i>lpsi</i>	$5,88E-4$	$6,08E-4$	3,4%	$6,08E-4$	3,4%	$6,08E-4$	3,4%
<i>sw</i>	$1,98E-4$	$2,00E-4$	0,8%	$2,00E-4$	0,8%	$2,00E-4$	0,8%
<i>cored₁</i>	$3,65E-4$	$3,75E-4$	2,4%	$3,74E-4$	2,4%	$3,75E-4$	2,4%
<i>cored₂</i>	$4,77E-4$	$8,16E-4$	71,0%	$8,16E-4$	71,0%	$8,16E-3$	70,9%
<i>cored₄</i>	$3,36E-6$	$3,72E-6$	10,6%	$3,72E-6$	10,6%	$3,71E-6$	10,2%
<i>cored₅</i>	$5,50E-7$	$5,81E-7$	5,6%	$5,81E-7$	5,6%	$5,76E-7$	4,8%

¹ $P(TOP)$ – točna vjerojatnost vršnog događaja BDD pristupom (algoritam 4)

² $P_{RE}(TOP)$ – ocjena vjerojatnosti vršnog događaja pomoću rijetkih događaja (algoritam 6)

³ r_{re} – relativna greška ocjene $P_{RE}(TOP)$

⁴ $P_{MC}(TOP)$ – gornja ograda za vjerojatnosti vršnog događaja (algoritam 5)

⁵ r_{mc} – relativna greška gornje ograde $P_{MC}(TOP)$

⁶ P_{KIRAP} – vjerojatnost vršnog događaja konvencionalnim pristupom

⁷ r_{kirap} – relativna greška konvencionalnim pristupom

je vidljivo u tablici A1.3 iz dodatka A. Za primjenu konvencionalnog pristupa zanimljiv je podatak koliko veliki skup minimalnih presjeka je potrebno odrediti da dostignemo određeni postotak rezultata iz gornje ograde algoritmom 5 na potpunom skupu minimalnih presjeka. U slijedećoj tablici 4.4 prikazani su rezultati za broj potrebnih minimalnih presjeka iz $|MCS|$ skupa te za granicu odbacivanja *CutOff* međurezultata kod konvencionalnog pristupa radi dostizanja 95%, te 99% rezultata iz gornje ograde izračunate na cijelom skupu minimalnih presjeka. Primjerice, za model *chrgr* gdje imamo najveću razliku za vjerojatnost vršnog događaja u odnosu na točan rezultat vrijedi:

- 95% rezultat postizemo određivanjem $|MCS| = 911$ najvećih (po vjerojatnosti) minimalnih presjeka, ili postavljanjem granice $CutOff = 1E-06$ za odbacivanje međurezultata kod konvencionalnog izračuna
- za 99% rezultata, potrebno je $|MCS| = 5320$ minimalnih presjeka, ili postavljanje granice $CutOff = 1E-12$ za međurezultate

Podatci iz tablice 4.4 jasno pokazuju razlog, zašto kod primjera *chrgr* imamo veću razliku spram točne vrijednosti za vjerojatnost vršnog događaja. Vidljivo je, posebice iz kvadratnog porasta za granicu odbacivanja, da je za taj primjer nužno poznavanje većeg skupa minimalnih presjeka za postizanje veće točnosti. Slična situacija vrijedi i za primjer stabla neželjenih događaja *cored₂*, gdje je također prisutna znatno veća razlika (približno 71%) u odnosu na točan rezultat. Poseban slučaj predstavlja model *dcp* kod kojega jedan minimalni presjek praktično

Tablica 4.4: Dovoljan broj minimalnih presjeka za primjenu konvencionalnog pristupa

Model	95%		99%	
	$ MCS_{95} $	$CutOff_{95}$	$ MCS_{99} $	$CutOff_{99}$
<i>acp</i>	62	$1E-07$	440	$1E-07$
<i>chrgr</i>	911	$1E-06$	5.320	$1E-12$
<i>dcp</i>	1	$1E-10$	1	$1E-10$
<i>efw</i>	199	$1E-07$	1.462	$1E-09$
<i>hpsi</i>	529	$1E-08$	2.237	$1E-09$
<i>lpsi</i>	175	$1E-07$	834	$1E-09$
<i>sw</i>	25	$1E-07$	58	$1E-08$
<i>cored₁</i>	6	$1E-06$	102	$1E-08$
<i>cored₂</i>	5.264	$1E-09$	16.420	$1E-10$
<i>cored₄</i>	1.016	$1E-10$	5.966	$1E-12$
<i>cored₅</i>	865	$1E-11$	4.323	$1E-12$

¹ $|MCS_{95}|$ – broj najvećih (po vjerojatnosti) minimalnih presjeka za dostizanje 95% rezultata konvencionalnim pristupom

² $CutOff_{95}$ – granična vjerojatnost za odbacivanje minimalnog presjeka za dostizanje 95% rezultata konvencionalnim pristupom

³ $|MCS_{99}|$ – broj najvećih (po vjerojatnosti) minimalnih presjeka za dostizanje 99% rezultata konvencionalnim pristupom

⁴ $CutOff_{99}$ – granična vjerojatnost za odbacivanje minimalnog presjeka za dostizanje 99% rezultata konvencionalnim pristupom

određuje kompletan rezultat, što je vidljivo iz kompletnih rezultata za taj model [B3](#) iz dodatka [B](#). Detaljnijom analizom rezultata za *dcp* model nalazimo minimalne presjeke za koje je vjerojatnost pojavljivanja relativno manja od vjerojatnosti najvećeg minimalnog presjeka za više od petnaest redova veličina, drugim riječima, odnos je ispod numeričke preciznosti (dvostruka preciznost) reprezentacije brojeva u računalu. Takav skup minimalnih presjeka sugerira potencijalnu nedovršenost te moguće greške u formiranju modela. Ostali prikazani rezultati potvrđuju upotrebljivost konvencionalnog pristupa za analizu stabla kvara. Naime, iz podataka na realnim primjerima vidimo da je tipično manji dio potpunog skupa minimalnih presjeka dovoljan za provođenje analize, te da se pažljivom primjenom približnih metoda kod konvencionalnog pristupa mogu postići zadovoljavajući rezultati na statičkom modelu stabla kvara.

Poglavlje 5

Doprinos i daljnje istraživanje

Otkrivanjem BDD reprezentacije zapisa logičkih funkcija otvaraju se brojna područja njihove praktične primjene za analizu zasnovanu na njihovim svojstvima. Jedinstvenost BDD zapisa logičke funkcije osigurava nedvosmisleno preslikavanje problema iz različitih inženjerskih područja u domenu reprezentacije logičkim funkcijama. Jedan od takvih problema je pitanje pouzdanosti složenih sustava, posebice pitanje pouzdanosti sustava i podsustava u nuklearnoj elektrani. Nakon Rauzyeva rada [39] mogućnost indirektne primjene BDD reprezentacije na problemu analize pouzdanosti sustava u nuklearnoj elektrani vrednovanjem modela stabla kvara pokazuje se realnom. Već od prvih primjera možemo očigledno primjenu BDD reprezentacije koristiti za vrednovanje koherentnih (definicija 2.28) te nekoherentnih modela. Međutim, za koherentne modele primjena je nešto jednostavnija budući se svodi na vrednovanje minimalnih presjeka koji određuju punu sliku logičke funkcije predstavljene modelom stabla kvara. Kod nekoherentnih modela primjena je nešto složenija uslijed problema određivanja skupa elementarnih konjunkcija u disjunktivnom zapisu logičke funkcije. Za koherentne modele određivanje skupa elementarnih konjunkcija (ekvivalentno skupu minimalnih presjeka) se provodi jednostavnije zbog monotonosti logičke funkcije predstavljene stablom kvara.

Neovisno o vrsti stabla kvara (koherentni ili nekoherentni), očito je bazični problem koji treba riješiti kod reprezentacije stabla kvara u obliku BDD zapisa, problem određivanja redoslijeda osnovnih događaja u Boole-Shannonovom 3.1 razvoju logičke funkcije. Međutim, problem određivanja redoslijeda osnovnih događaja spada u klasu najtežih kombinatornih problema te je za njegovo rješenje primjerenije razviti heuristički algoritam. Kompleksnost problema pruža mogućnost kontinuiranog razvoja različitih oblika heurističkih algoritama za određivanje redoslijeda. Jedan od pristupa problemu izložen je u disertaciji razvijanjem heurističkog algoritma za redoslijed osnovnih događaja u Boole-Shannonovom razvoju logičke funkcije stabla kvara.

5.1 Pregled rada

Zbog složenosti problema, u disertaciji su korišteni rezultati s različitih područja primijenjene znanosti. Za potrebe verifikacije i potvrde primjenjivosti razvijenih algoritama, nužno je koristiti rezultate matematičkog aparata iz nekoliko grana:

- teorije složenosti za analizu kompleksnosti razvijenih ili korištenih algoritama,
- matematičke logike za povezivanje logičkih funkcija s modelima stabla kvara,
- teorije vjerojatnosti za uspostavljanje osnovnih odnosa u postupku vrednovanja stabla kvara.

Osim matematičkog aparata, rezultati iz teorije pouzdanosti izgrađuju vezu s formalnim modelima složenih sustava. Osobito je važno povezivanje modela sustava s rezultatima iz teorije vjerojatnosti na modelima pouzdanosti složenih sustava. Također, važnu ulogu predstavlja pojam logičke funkcije te njihove interpretacije na modelu sustava u obliku minimalnih putanja i presjeka. Osnovni alat za vrednovanje modela sustava u nuklearnoj energetici predstavlja stablo kvara, te se pitanje kompleksnosti njegove analize (kvalitativne i/ili kvantitativne) povezuje s kompleksnošću reprezentacije logičkih funkcija korištenjem BDD dijagrama.

U poglavlju posvećenom BDD reprezentaciji uvedena su osnovna svojstva predstavljanja BDD zapisa strukturom usmjerenog grafa s dva završna vrha. Pokazano je svojstvo jedinstvenosti BDD zapisa (kanonski zapis) za logičke funkcije te kako zbog kanonskog zapisa, kompleksnost logičkih operacija na BDD zapisu ovisi o broju vrhova u strukturi grafa. Osim osnovnih logičkih operacija BDD zapisa uvedena je ZDD modifikacija koja omogućava jedinstveni zapis skupova čime se otvara mogućnost jednostavnog rada s kombinacijama skupova, posebice za potrebe predstavljanja te operacija nad brojnim skupovima minimalnih presjeka. Također, pomoću jednostavne karakterizacije minimalnih presjeka za koherentna stabla kvara implementirana je i pokazana primjena BDD zapisa za određivanje njihovog potpunog MCS skupa. Izvedene su definicije mjera važnosti te je razvijen algoritam za računanje uvjetne vjerojatnosti na MCS skupu pomoću kojega možemo odrediti vrijednosti svih mjera važnosti za osnovne događaje iz stabla kvara. Osim mjera važnosti, izvedeni su algoritam za odabir minimalnih presjeka prema zadanom kriteriju (u obliku predikata) te algoritmi za ocjenu dviju gornjih granica za vjerojatnost vršnog događaja radi usporedbe s konvencionalnim pristupom kvantitativnoj analizi stabla kvara. Razvijeni algoritmi te njihova implementacija na BDD zapisu stabla kvara omogućava provođenje postupka vrednovanja na potpunom MCS skupu bez potrebe za redukcijom skupa te primjene aproksimativnih pristupa problema.

U disertaciji je pokazano kako svojstva BDD reprezentacije možemo iskoristiti za efikasno rješavanje problema u postupku vrednovanja stabla kvara. Međutim, ključni preduvjet u primjeni BDD reprezentacije u postupku vrednovanja predstavlja određivanje redoslijeda osnovnih događaja. Tom problemu posvećena je glavnina disertacije te je pokazano da se primjenom

ново razvijenog heurističkog algoritma može provesti postupak vrednovanja za najsloženije modele stabla kvara. Osnovicu nove heuristike predstavlja algoritam 10 za kombiniranje postojećih redoslijeda za ulaze u vrata. Tim se algoritmom formira novi redoslijed osnovnih događaja za vrata uzimajući u obzir njihovu poziciju, te mogućnost pojavljivanja istog događaja u različitim redoslijedima iz ulaza tih vrata. Jednostavna situacija, kada nema preklapanja osnovnih događaja između redoslijeda za ulaze u vrata, riješena je algoritmom za funkcije s jednostrukim pojavljivanjem varijabli. Složenija situacija, kada postoji preklapanje između redoslijeda, riješena je usporedbom broja vrhova za osnovne događaje u BDD zapisu. Budući se formiranje redoslijeda novom heuristikom provodi sekvencijalno u nekom poretku ulaza, te je postupak senzitiv na izbor tog poretka, heuristika se višestruko (ograničen broj puta) primjenjuje na ulaze za vrata. Najbolji redoslijed dobiven tim postupkom dodatno se poboljšava metodom sijanja, što se pokazuje korisnim za najveće modele stabla kvara. Cjelokupni postupak se za stablo kvara provodi u poretku za vršna vrata koji slijedi iz obilaska modela po dubini.

Verifikacija pristupa provedena je vrednovanjem primjera stabla kvara iz literature te na realnim primjerima iz modela za nuklearnu elektranu Krško. Pokazuje se kako je dobivenim redoslijedom moguće u potpunosti provesti kvantitativno i kvalitativno vrednovanje bez približnih izračuna. Štoviše, postignuti rezultati (točnost, potpunost) pokazuju primjenjivost pristupa na realnim primjerima uz vrijeme izvođenja usporedivo s konvencionalnim pristupom.

5.2 Doprinos

Znanstveni doprinosi rada mogu se podijeliti u tri osnovne cjeline:

1. Razvoj algoritma za određivanje redoslijeda varijabli za pronalaženje BDD zapisa potpunog modela stabla kvara ili stabla događaja u analizama nuklearne sigurnosti. Polazeći od oblika logičke funkcije s jednostrukim pojavljivanjem varijabli razvijen je algoritam pomoću kojega nalazimo redoslijed osnovnih događaja u Boole-Shannonovom razvoju logičke funkcije predstavljene stablom kvara. Osnovna ideja nove heuristike (algoritam 10) zasniva se na primjeni rekurzivne relacije iz rada [1] za vrata u stablu kvara gdje je sadržan zapis logičke funkcije s jednostrukim pojavljivanjem varijabli, dok se na ostalim vratima primjenjuje tehnika traženja najbolje permutacije ulaza zasnovane na ocjeni veličine BDD zapisa vrata (algoritam 11). Radi smanjenja prostora pretraživanja, primjenjuju se različite tehnike pojednostavljenja stabla kvara s ciljem povećanja dijela stabla kvara koji ima strukturu logičke funkcije s jednostrukim pojavljivanjem varijabli. Tijekom formiranja BDD zapisa za vrata u složenijim modelima stabla kvara dodatno se primjenjuje tehnika dinamičke promjene redoslijeda zamjenom susjednih logičkih varijabli 9. Nova heuristika se primjenjuje sukcesivno na vrata u redoslijedu određenom obilaskom modela stabla kvara po dubini (algoritam 12), Redoslijed za vršni događaja opcionalno se

dinamički poboljšava za najsloženije modele.

2. Unapređenje kvalitativne i kvantitativne analize stabla kvara na kompleksnim sustavima u nuklearnoj energetici primjenom kompletnog proračuna nad BDD zapisom modela upotrebom redoslijeda osnovnih događaja određenog novom heuristikom. Kvalitativna analiza stabla kvara poboljšana je u domeni izbora dijela MCS skupa iz potpunog skupa minimalnih presjeka uz zadovoljenje prilagođenih kriterija izbora (algoritam 7). Razlika spram konvencionalnog pristupa odražava se u pristupu, budući se izbor provodi na cjelokupnom MCS skupu, dok se kod konvencionalnih pristupa izbor dijela MCS skupa provodi odbacivanjem elemenata tijekom izračuna. Za kvantitativnu analizu stabla kvara razvijeni su sljedeći algoritmi:
 - algoritam 4 za određivanje vjerojatnosti vršnog (ili nekog drugog) događaja iz potpunog MCS skupa u BDD zapisu uz zadanu interpretaciju $\sigma(f)$ logičke funkcije predstavljene stablom kvara,
 - algoritam 5 za određivanje gornje ograde vjerojatnosti vršnog (ili drugog) događaja iz potpunog skupa minimalnih presjeka,
 - algoritam 6 za određivanje gornje ograde vjerojatnosti vršnog (ili drugog) događaja iz rijetkih događaja primjenom potpunog skupa minimalnih presjeka,
3. Razvoj aplikacije i potvrda dobivenih rezultata postignuti su usporedbom s konvencionalnim pristupom. Svi algoritmi u disertaciji u potpunosti su implementirani u programskom rješenju, te je korektnost i točnost algoritama provjerena usporedbom s rezultatima dobivenim konvencionalnim pristupom. Za usporedbu s konvencionalnim pristupom korišteno je programsko rješenje KIRAP [66], budući je izbor konvencionalnog rješenja invarijantan za rezultate. Drugim riječima, usporedba s drugim konvencionalnim rješenjem dati će slične (najčešće iste) rezultate uz primjenu istih približnih metoda.

5.3 Daljnje istraživanje

Disertacijom se otvaraju brojna pitanja vezana za daljnji istraživački rad. Jasno je da razvijeni heuristički algoritam ne predstavlja konačno rješenje problema redoslijeda osnovnih događaja kod modela stabla kvara, ali on predstavlja korak naprijed u smjeru primjene BDD metode na realnim modelima u nuklearnoj energetici te na drugim tehnološkim područjima. U tom smislu moguće su preinake postojećih ili razvoj novih heurističkih algoritama koji mogu eksploatirati specifičnosti modela stabla kvara iz odabranog područja primjene. Osim toga, moguće je proširiti područje primjene BDD metode na druge probleme gdje se pojavljuju logičke funkcije te problemi njihove efikasne reprezentacije.

Također je važno napomenuti, kako se otvara mogućnost implementacije analize nad funkcionalnim zapisom MCS skupa budući se vrednovanje BDD pristupom provodi na potpunom

skupu minimalnih presjeka. Drugim riječima, iz potpunog skupa minimalnih presjeka možemo odrediti logičku funkciju koja pokazuje ovisnost modela o promjeni vjerojatnosti osnovnog događaja, ili o promjeni vjerojatnosti izvedenog događaja (vrata) te njihovim kombinacijama. Osim analize osjetljivosti, iz potpunog zapisa MCS skupa možemo dobiti funkcionalnu zavisnost između komponenata, primjerice, kvarove koji ovise o funkciji koju realiziraju, ili sekvence kvarova s komponentama.

Dodatno, interesantno područje za daljnja istraživanje može biti primjena BDD zapisa na dinamička stabla kvara. Za primjenu na dinamička stabla kvara potrebno je proširenje u implementaciji, posebice u domeni određivanja redoslijeda za prioritetna vrata te njihovoj implementaciji pomoću binarnih dijagrama odlučivanja.

Zanimljivo područje istraživanja je problem nalaženja minimalnih oblika zapisa proizvoljnih logičkih funkcija. Konkretno, jedan takav problem predstavlja problem određivanja minimalnog zapisa nekoherentnog stabla kvara. U tom je smjeru postignut određeni napredak, no prostora za istraživanja još uvijek ima, osobito na logičkim funkcijama s više stotina (ili tisuća) logičkih varijabli. Osim praktične primjene BDD metode otvorena su i teorijska pitanja svojstava BDD zapisa, posebice svojstva BDD zapisa za određene kategorije logičkih funkcija, primjerice logičke funkcije koje se primjenjuju u kriptografiji (npr. Bent funkcije), ili za otkrivanje i ispravak greške tijekom prijenosa komunikacijskim kanalom.

Dodatci

Dodatak A

Svojstva i rezultati testiranih modela

U ovom dodatku prikazana su osnovna svojstva i rezultati testiranih modela stabla kvara. Testirane modele možemo podijeliti u dvije grupe prema izvorima:

- literatura - testni modeli koji se pojavljuju u referentnoj literaturi iz časopisa i konferencija. Testni modeli iz ove grupe koriste se primarno od objave u radu [64], te predstavljaju modele stabla kvara iz elektroindustrije,
- nuklearna energetika - modeli stabla kvara iz nuklearne elektrane. U modelima su zamijenjeni originalni nazivi osnovnih i složenih događaja (vrata), ali je sačuvana logička struktura osnovnog modela.

Prvi dio dodatka opisuje osnovna svojstva testiranih modela: broj osnovnih događaja, broj složenih događaja te ukupan broj veza između osnovnih i složenih događaja. U drugom dijelu dodatka predstavljena su osnovna svojstva BDD zapisa cjelokupnog skupa minimalnih presjeka.

A1 Svojstva modela stabla kvara

U svrhu testiranja korišteni su modeli stabla kvara koji se upotrebljavaju u literaturi [64],[37] te modela stabla kvara iz nuklearne elektrane Krško. U tablici A1.1 su iznesena svojstva modela iz literature: broj osnovnih događaja, broj složenih događaja (vrata) u modelu, te ukupan broj veza između vrata, tj. ukupan broj ulaza za sva vrata u stablu kvara.

Stabla kvara iz literature uglavnom su formirana za modele sustava iz energetike, npr. EDF su modeli za sustave tvrtke Électricité de France. Kao što proizlazi iz tablice, radi se uglavnom o manjim ili srednje (< 1000 veza) kompleksnim modelima stabla kvara. Granica od 1000 veza između vrata nije stroga granica za vrednovanje, budući je kompleksnost vrednovanja stabla kvara primarno određena brojem osnovnih događaja. Ponekad modeli stabla kvara s više stotina osnovnih događaja predstavljaju modele složenijih događaja koji su posljedica različitih kombinacija (primjerice, k/n vrata) manjeg broja osnovnih događaja. Tako primjerice, model *cea9601* ima 2,5 puta manje osnovnih te približno 2,2 puta manje složenih događaja (vrata su složeni događaji) od modela *edf9202* premda sadrže približno isti broj veza. Za razliku od prethodna dva modela, model *edf9203* je, usprkos tomu što sadrži približno isti broj složenih te nešto manji broj osnovnih događaja, ipak znatno složeniji od *edf9202* modela. Složenost modela *edf9203* se vidi po broju veza, kojih ima četiri puta više u odnosu na *edf9202* model.

Za testne modele stabla kvara iz nuklearne elektrane odabrani su nešto složeniji modeli (> 1000 veza) sa svojstvima navedenim u A1.2 tablici. Modeli stabla kvara iz nuklearne elektrane s nazivom oblika *cored_{1,2}* predstavljaju zapis niza vršnih događaja (stablo događaja) koji uzrokuju oštećenje jezgre nuklearne elektrane. Budući su za modele stabla kvara iz nuklearne elektrane dostupni podaci o vjerojatnostima pojavljivanja osnovnih događaja, testovi vrednovanja provedeni su na njima kako je prikazano u tekstu. Primjeri *cored_{1,2,4,5}* nisu uključeni u dodatku rada budući za njih nije bio dostupan KIRAP model za usporedbu.

Tablica A1.1: Svojstva modela stabla kvara iz literature

FT model	Broj O.D.	Broj vrata	Broj veza (ulaza)
baobab1	61	84	219
baobab2	32	40	88
baobab3	80	107	273
cea9601	186	201	1.025
chinese	25	36	94
das9201	122	82	246
das9202	49	36	101
das9203	51	30	86
das9204	53	30	101
das9205	51	20	72
das9206	121	112	335
das9207	276	324	807
das9208	103	145	399
das9209	109	73	182
das9601	122	288	671
edf9201	183	132	494
edf9202	458	435	1.192
edf9203	362	475	4.880
edf9204	323	375	993
edf9205	165	142	391
edf9206	240	362	728
edfpa14b	311	290	852
edfpa14o	311	173	821
edfpa14p	124	101	562
edfpa14q	311	194	826
edfpa14r	106	132	559
edfpa15b	283	249	745
edfpa15o	283	138	611
edfpa15p	100	80	370
edfpa15q	289	151	650
edfpa15r	88	110	416
elf9601	145	242	619
ftr10	175	94	368
isp9601	143	104	266
isp9602	116	122	284
isp9603	91	95	242
isp9604	215	132	392
isp9605	32	40	88
isp9606	89	41	143
isp9607	74	65	169
jbd-001	533	315	1.094

¹ O.D. – osnovni događaj

Tablica A1.2: Svojstva velikih modela iz nuklearne energetike

FT model	Broj O.D.	Broj vrata	Broj veza (ulaza)
<i>acp</i>	409	674	1.781
<i>chrgr</i>	438	695	1.840
<i>dcp</i>	447	706	1.871
<i>efw</i>	692	957	2.570
<i>hpsi</i>	674	940	2.550
<i>lpsi</i>	525	760	2.030
<i>sw</i>	444	720	1.925
<i>cored₁</i>	1.319	1.279	3.003
<i>cored₂</i>	1.377	1.633	3.976
<i>cored₄</i>	965	2.199	2.894
<i>cored₅</i>	1.013	2.199	2.990

¹ O.D. – osnovni događaj

Poznato je da BDD struktura zapisa logičkih funkcija ne ovisi o veličini skupa ispunjivih interpretacija, drugim riječima ne ovisi o brojnosti skupa $\{\sigma(x_1, \dots, x_n) : f(\sigma) = 1\}$. Ovo svojstvo BDD zapisa logičkih funkcija ima za posljedicu da BDD zapis stabla kvara ne ovisi o brojnosti skupa minimalnih presjeka. U slijedećoj tablici A1.3 prikazan je odnos između broja elemenata iz skupa svih minimalnih presjeka te broja vrhova BDD zapisa stabla kvara. Kardinalitet skupa svih minimalnih presjeka prikazan je u stupcu $|MCS|$, te pokazuje broj minimalnih presjeka iz cjelokupnog skupa minimalnih presjeka. Drugi stupac, $|BDD|$, pokazuje broj BDD vrhova za predstavljanje MCS skupa dobivenog primjenom algoritma 3 na BDD zapisu modela stabla kvara. U zadnjem stupcu $\frac{|MCS|}{|BDD|}$ prikazan je omjer između kardinaliteta MCS skupa te broja vrhova u BDD zapisu. Vrijednosti u zadnjem stupcu, jasno pokazuju navedeno svojstvo neovisnosti veličine BDD zapisa o kardinalitetu MCS skupa, te je vidljiva visoka kompaktnost BDD zapisa za MCS skup kod koherentnih FT modela.

Tablica A1.3: Svojstva BDD zapisa i skupa minimalnih presjeka

FT model	$ BDD $	$ MCS $	$\frac{ MCS }{ BDD }$
<i>acp</i>	4.583	228.242.636	49.802
<i>chrgr</i>	68.904	14.840.731.139.897	215.382.723
<i>dcp</i>	77.595	152.148.878.846.392	1.960.807.769
<i>efw</i>	265.401	1.769.960.840.506.752	6.669.005.921
<i>hpsi</i>	22.902	371.554.422.700	16.223.667
<i>lpsi</i>	26.754	479.582.239.771	17.925.628
<i>sw</i>	140.486	58.952.275.075.664	419.630.960
<i>cored₁</i>	1.951.673	69.273.024.997.243.046	35.494.176.021
<i>cored₂</i>	16.524.072	2.436.058.751.633.933.343	147.424.844.895
<i>cored₄</i>	106.422	1.443.541.330.572.550.950	13.564.313.117.330
<i>cored₅</i>	47.416	81.800.972.704	1.725.176

¹ $|BDD|$ – broj vrhova u BDD zapisu FT modela² $|MCS|$ – broj minimalnih presjeka u potpunom *MCS* skupu

A2 Statistika izvođenja nove heuristike

Svi algoritmi iz rada su implementirani u programskom jeziku $C/C++$ na MS Windows okruženju. Za potrebe implementacije nove heuristike korištena je programska biblioteka CUDD [67] u kojoj su implementirani osnovni algoritmi za dinamičku promjenu redoslijeda varijabli kod BDD zapisa. U tablici A2.1 isčitavamo statistiku izvođenja nove heuristike na primjerima modela iz literature. Statistika pokazuje slijedeće podatke:

Procjena pokazuje procjenu broja BDD vrhova (oznaka stupca I) koju dobijemo primjenom nove heuristike,

Stvarni broj pokazuje broj vrhova u BDD zapisu primjenom redoslijeda dobivenog novom heuristikom (oznaka stupca II),

Nakon alg. 9 predstavlja broj BDD vrhova (oznaka stupca III) nakon primjene algoritma 9 za dinamičko poboljšanje redoslijeda,

BDD vrhova pokazuje maksimalni (vršni) broj vrhova tijekom formiranja BDD zapisa modela,

Vrijeme izvođenja utrošeno vrijeme za određivanje redoslijeda varijabli algoritmom 11 novom heuristikom.

Tablica A2.1: Statistika izvođenja nove heuristike na primjerima iz literature

Stablo kvara	Statistika izvođenja				
	Procjena I	Stvarni broj II	Nakon alg. 9 III	BDD vrhova	Vrijeme za heuristiku (s)
baobab1	3.489	1.828	1.398	8.176	10,1
baobab2	523	494	114	7.154	5,4
baobab3	5.676	4.215	3.285	15.330	5,1
cea9601	6.639	6.070	5.538	54.166	31,3
chinese	85	63	45	1.022	0,6
das9201	642	525	179	4.088	9,8
das9202	144	98	62	1.022	3,4
das9203	115	67	52	1.022	1,6
das9204	120	69	53	1.022	3,1
das9205	101	52	52	1.022	1,1
das9206	1.427	632	468	4.088	5,0
das9207	1.215.274	12.119	2.608	105.266	35,9
das9208	1.713	1.312	1.015	7.154	19,8
das9209	258	151	110	2.044	5,1
das9601	2.747	2.159	1.641	143.080	41,1
edf9201	1.928	1.706	1.528	12.264	2,1
edf9202	1.317	1.113	442	119.574	309,8
edf9203	11.087	7.135	5.941	303.534	108,0
edf9204	52.050	26.922	24.301	123.662	70,8
edf9205	1.342	632	376	5.110	24,8
edf9206	1.879	1.583	1.030	28.616	199,5
edfpa14b	13.079	8.877	6.566	51.122	30,2
edfpa14o	51.290	8.617	4.411	57.232	64,8
edfpa14p	23.218	6.164	2.019	44.968	10,7
edfpa14q	6.703	5.742	3.929	52.122	144,9
edfpa14r	5.919	5.616	5.258	20.440	16,9
edfpa15b	5.272	3.745	3.053	21.462	22,6
edfpa15o	9.944	3.955	3.127	33.726	37,1
edfpa15p	22.693	2.186	1.073	8.176	6,3
edfpa15q	5.407	2.947	2.022	17.374	64,5
edfpa15r	1.827	1.206	666	8.176	9,6
elf9601	982	843	840	45.990	40,1
ftr10	677	504	184	6.132	1,0
isp9601	873	732	366	5.110	5,6
isp9602	731	617	606	4.088	8,3
isp9603	2.983	654	426	3.066	4,7
isp9604	1.090	749	519	6.132	9,6
isp9605	575	546	123	8.176	5,2
isp9606	357	270	108	2.044	3,0
isp9607	474	405	124	2.044	3,7
jbd-001	87.261	14.469	6.055	118.552	7,4
Prosjek	$I/II = 4,45$ $II/III = 1,85$				

Dodatak B

Rezultati vrednovanja - BDD pristup

Sljedeći odlomci pokazuju rezultate vrednovanja modela iz nuklearne energetike primjenom BDD pristupa. Zbog duljine prikaza, kompletni rezultati iz vrednovanja modela priloženi su uz radnju u elektronskom obliku. Za osnovne modele iz tablice [A1.2](#) rezultati su strukturirani na sljedeći način:

1. sekcija pokazuje svojstva modela nakon redukcije strukture modela, za početna svojstva modela vidjeti tablicu [A1.2](#),
2. sekcija daje osnovne parametre BDD zapisa FT modela formiranog primjenom redosljeda iz nove heuristike (algoritam [12](#)). Osnovni parametri pokazuju broj BDD vrhova za prikaz FT modela, te za prikaz njegova MCS skupa. Također je prikazan broj presjeka u prikazu FT modela te broj minimalnih presjeka u MCS skupu te na kraju vremena izvođenja za formiranje BDD zapisa,
3. sekcija pokazuje distribuciju minimalnih presjeka prema broju osnovnih događaja. Broj minimalnih presjeka s 11, ili više osnovnih događaja dan je zbirno,
4. sekcija donosi osnovne vrijednosti za vjerojatnost vršnog događaja izračunatog pomoću algoritama [4](#), [5](#), i [6](#),
5. sekcija pokazuje mjere važnosti za prvih 100 osnovnih događaja u padajućem redosljedu prema *FV* mjeri važnosti. U stupcima su iskazane vrijednosti za:

Prob. vjerojatnost osnovnog događaja,

QTOP(BE=1) vjerojatnost vršnog događaja uz uvjet **pojavljivanja** tog osnovnog događaja,

QTOP(BE=0) vjerojatnost vršnog događaja uz uvjet **ne pojavljivanja** tog osnovnog događaja,

F.V. Fussel-Vesely mjera važnosti za osnovni događaj,

RRW. faktor smanjenja rizika za osnovni događaj,

RAW. faktor povećanja rizika za osnovni događaj,

PD. Birnbaum mjera važnosti, tj. parcijalna derivacija za osnovni događaj,

6. sekcija pokazuje prvih 100 minimalnih presjeka u padajućem redoslijedu prema vjerojatnosti. U stupcima su zadane vrijednosti za:

p(MCS) vjerojatnost minimalnog presjeka. Uz pretpostavljenu nezavisnost osnovnih događaja vjerojatnost je definirana s 2.3.2,

F.V. relativna mjera važnosti za minimalni presjek definirana s B.1. Ovdje je korišten isti naziv za stupac zbog jednostavnije usporedbe s KIRAP programom,

Acc. kumulativni zbroj relativnih mjera važnosti za sve prethodne minimalne presjeke uključujući tekući minimalni presjek,

Events... osnovni događaji u minimalnom presjeku, ako minimalni presjek sadrži više od 7 osnovnih događaja na kraju linije je znak . >

U tablici B0.1 prikazani su rezultati vrednovanja modela sa slike 2.5 primjenom BDD pristupa. Izračunate su točne vrijednosti za vjerojatnost vršnog događaja $P(TOP)$, potom za gornju ogradu $P_{MC}(TOP)$ iz potpunog MCS skupa, te za gornju ogradu pomoću ocjene iz rijetkih događaja $P_{RE}(TOP)$ primijenjene na cjelokupnom MCS skupu. Pored kvantitativnih vrijednosti za vjerojatnost vršnog događaja prikazane su vrijednosti za vjerojatnost svih minimalnih presjeka iz MCS, te njihova relativna važnost u odnosu na gornju ogradu vjerojatnosti vršnog događaja $P_{MC}(TOP)$ izračunatu iz potpunog MCS skupa. Relativna važnost minimalnog presjeka pokazuje njegov doprinos vjerojatnosti vršnog događaja, te je definirana na sljedeći način

$$FV(MC_i) = \frac{P(MC_i)}{P_{MC}(TOP)} \quad (B.1)$$

U radu je relativna važnost prikazana u stupcu $FV(MC_i)$, dok je njena kumulativna vrijednost prikazana u stupcu $\sum^i FV(MC_k)$. Kumulativnu vrijednost za relativnu važnost minimalnog presjeka pokazuje zbroj za relativne mjere važnosti minimalnih presjeka u padajućem redoslijedu prema vjerojatnosti. Primjerice, kumulativna vrijednost u retku 20 pokazuje zbroj relativne mjere važnosti za minimalne presjeke na pozicijama od 1 do 20. Kumulativna vrijednost jednostavno daje mjeru za potreban broj minimalnih presjeka za dostizanje određenog postotka rezultata iz potpunog MCS skupa. Primjerice, $\approx 45\%$ rezultata donosi prvi minimalni presjek, $\approx 90\%$ dobijemo iz prva dva minimalna presjeka, dok $\approx 99\%$ rezultata dobijemo iz prvih 6 minimalnih presjeka.

Tablica B0.1: Rezultati vrednovanja za model 2.5

$P(TOP)$	alg. 4	$2,2406e-06$		
$P_{MC}(TOP)$	alg. 5	$2,2432e-06$		
$P_{RE}(TOP)$	alg. 6	$2,2433e-06$		
$ BDD $	def. 3.2	11		
$ MCS $	def. 2.31	17		
#	MC_i	$P(MC_i)$	$FV(MC_i)$	$\sum^i FV(MC_k)$
1	$\{E_1\}$	$1,00e-04$	0,4458	0,446
2	$\{E_2, E_8\}$	$1,00e-04$	0,4458	0,892
3	$\{E_2, E_7\}$	$1,00e-05$	0,0446	0,936
4	$\{E_5, E_8\}$	$1,00e-05$	0,0446	0,981
5	$\{E_3, E_8\}$	$1,00e-06$	0,0045	0,985
6	$\{E_4, E_8\}$	$1,00e-06$	0,0045	0,990
7	$\{E_2, E_6\}$	$1,00e-06$	0,0045	0,994
8	$\{E_5, E_7\}$	$1,00e-06$	0,0045	0,999
9	$\{E_3, E_7\}$	$1,00e-07$	0,0004	0,999
10	$\{E_4, E_7\}$	$1,00e-07$	0,0004	0,999
11	$\{E_5, E_6\}$	$1,00e-07$	0,0004	1,000
12	$\{E_3, E_6\}$	$1,00e-08$	0,0000	1,000
13	$\{E_4, E_6\}$	$1,00e-08$	0,0000	1,000
14	$\{E_2, E_{10}, E_9\}$	$1,00e-08$	0,0000	1,000
15	$\{E_5, E_{10}, E_9\}$	$1,00e-09$	0,0000	1,000
16	$\{E_3, E_{10}, E_9\}$	$1,00e-10$	0,0000	1,000
17	$\{E_4, E_{10}, E_9\}$	$1,00e-10$	0,0000	1,000

B1 ACPOWER

 Fault Tree after compaction...

Number of gates : 455
 Number of events : 409
 Number of edges : 1538
 Top gate name : G2193

TOP event BDD nodes : 4018
 TOP event cutset set size : 5.528415e+23
 TOP event BDD build (sec) : 5.67
 MCS set BDD nodes : 2947
 MCS set size : 228242636
 MCS set BDD build (sec) : 0.01

Total time to finish computations (sec) : 5.85

size	mcs_counters
1 :	0
2 :	177
3 :	97355
4 :	717620
5 :	3490650
6 :	10287598
7 :	22991206
8 :	41189337
9 :	57048521
10 :	59299584
11+:	33120588

 Total : 228242636

RELIABILITY PARAMETERS

=====

TOP probability from CSs: 6.076897e-03
 MCSs upper bound : 6.327079e-03
 Rare event upper bound : 6.340758e-03

Event Importance Information

Pos	Variable (BE)	Prob.	QTOP(BE=1)	QTOP(BE=0)	FV.	RRW.	RAW.	PD.
1,	EDG2DGAACF,	9.350e-02,	5.51380e-02,	1.01654e-03,	0.8327202,	5.98,	9.07,	0.0541214
2,	%T3,	3.680e-02,	1.10237e-01,	2.09736e-03,	0.6548640,	2.90,	18.14,	0.1081397
3,	EDG2DG1XXF,	9.350e-02,	1.71716e-02,	4.93254e-03,	0.1883121,	1.23,	2.83,	0.0122391
4,	EDG2DG2XXF,	9.350e-02,	1.68770e-02,	4.96293e-03,	0.1833112,	1.22,	2.78,	0.0119140
5,	EMM2CCFDGF,	4.675e-03,	1.10166e-01,	5.58799e-03,	0.0804527,	1.09,	18.13,	0.1045781
6,	EMC27100XN,	7.190e-03,	5.51380e-02,	5.72159e-03,	0.0584680,	1.06,	9.07,	0.0494164
7,	EDG2DGAACA,	3.070e-03,	5.51380e-02,	5.92582e-03,	0.0248616,	1.03,	9.07,	0.0492122
8,	SMV215031N,	9.230e-03,	1.71716e-02,	5.97354e-03,	0.0170084,	1.02,	2.83,	0.0111981
9,	SMV215042N,	9.230e-03,	1.68770e-02,	5.97628e-03,	0.0165567,	1.02,	2.78,	0.0109007
10,	ESV27150XN,	1.310e-03,	5.51380e-02,	6.01254e-03,	0.0105900,	1.01,	9.07,	0.0491254
11,	ESV27162XN,	1.310e-03,	5.51380e-02,	6.01254e-03,	0.0105900,	1.01,	9.07,	0.0491254
12,	ESV27245XN,	1.310e-03,	5.51380e-02,	6.01254e-03,	0.0105900,	1.01,	9.07,	0.0491254

Rezultati vrednovanja - BDD pristup

13,	SFL2P4BIS,	1.000e+00,	6.07690e-03,	6.03895e-03,	0.0062439,	1.01,	1.00,	0.0000379
14,	EDG2DG1XXA,	3.070e-03,	1.71716e-02,	6.04273e-03,	0.0056222,	1.01,	2.83,	0.0111289
15,	EDG2DG2XXA,	3.070e-03,	1.68770e-02,	6.04364e-03,	0.0054729,	1.01,	2.78,	0.0108333
16,	ECB2A1001D,	6.450e-04,	5.51380e-02,	6.04523e-03,	0.0052107,	1.01,	9.07,	0.0490927
17,	EHX2E9XXXJ,	6.262e-04,	5.51380e-02,	6.04616e-03,	0.0050587,	1.01,	9.07,	0.0490918
18,	EMF2VEF18F,	5.638e-04,	5.51380e-02,	6.04922e-03,	0.0045543,	1.00,	9.07,	0.0490888
19,	EMF2VEF17F,	5.638e-04,	5.51380e-02,	6.04922e-03,	0.0045543,	1.00,	9.07,	0.0490888
20,	EMP2P16AXA,	2.320e-03,	1.71716e-02,	6.05110e-03,	0.0042455,	1.00,	2.83,	0.0111205
21,	EMP2P16BXA,	2.320e-03,	1.68770e-02,	6.05178e-03,	0.0041328,	1.00,	2.78,	0.0108252
22,	EHX2E9XXXF,	5.039e-04,	5.51380e-02,	6.05216e-03,	0.0040702,	1.00,	9.07,	0.0490858
23,	EMM2CCFFXA,	2.320e-04,	1.10166e-01,	6.05274e-03,	0.0039748,	1.00,	18.13,	0.1041133
24,	EAV27239AN,	2.110e-02,	7.09069e-03,	6.05504e-03,	0.0035959,	1.00,	1.17,	0.0010356
25,	EAV27239BN,	2.110e-02,	7.09069e-03,	6.05504e-03,	0.0035959,	1.00,	1.17,	0.0010356
26,	EDGOPER2,	8.510e-02,	6.28273e-03,	6.05775e-03,	0.0031506,	1.00,	1.03,	0.0002250
27,	T9PREREC,	5.600e-02,	6.39964e-03,	6.05775e-03,	0.0031506,	1.00,	1.05,	0.0003419
28,	%T9,	3.160e-02,	6.66363e-03,	6.05775e-03,	0.0031506,	1.00,	1.10,	0.0006059
29,	EMM2CCFDGA,	1.535e-04,	1.10166e-01,	6.06092e-03,	0.0026297,	1.00,	18.13,	0.1041052
30,	ESV228021N,	1.310e-03,	1.71716e-02,	6.06234e-03,	0.0023948,	1.00,	2.83,	0.0111093
31,	ESV228222N,	1.310e-03,	1.68770e-02,	6.06273e-03,	0.0023312,	1.00,	2.78,	0.0108142
32,	%T14,	1.040e-03,	1.71716e-02,	6.06535e-03,	0.0019007,	1.00,	2.83,	0.0111063
33,	%T15,	1.040e-03,	1.68770e-02,	6.06565e-03,	0.0018502,	1.00,	2.78,	0.0108113
34,	STF2SCRNSP,	9.768e-05,	1.10166e-01,	6.06673e-03,	0.0016733,	1.00,	18.13,	0.1040993
35,	ELS228041H,	9.143e-04,	1.71716e-02,	6.06674e-03,	0.0016708,	1.00,	2.83,	0.0111049
36,	ELS228011H,	9.143e-04,	1.71716e-02,	6.06674e-03,	0.0016708,	1.00,	2.83,	0.0111049
37,	ELS228242H,	9.143e-04,	1.68770e-02,	6.06701e-03,	0.0016264,	1.00,	2.78,	0.0108100
38,	ELS228212H,	9.143e-04,	1.68770e-02,	6.06701e-03,	0.0016264,	1.00,	2.78,	0.0108100
39,	EMP2P235XA,	2.320e-03,	1.02699e-02,	6.06715e-03,	0.0016045,	1.00,	1.69,	0.0042028
40,	T7REC,	7.100e-02,	6.17360e-03,	6.06951e-03,	0.0012162,	1.00,	1.02,	0.0001041
41,	%T7,	1.000e-03,	1.34604e-02,	6.06951e-03,	0.0012162,	1.00,	2.22,	0.0073909
42,	ECB2A112XD,	6.450e-04,	1.71716e-02,	6.06974e-03,	0.0011784,	1.00,	2.83,	0.0111019
43,	EMP2P16AXF,	6.430e-04,	1.71716e-02,	6.06976e-03,	0.0011747,	1.00,	2.83,	0.0111019
44,	ECB2A212XD,	6.450e-04,	1.68770e-02,	6.06993e-03,	0.0011471,	1.00,	2.78,	0.0108070
45,	SMP2-2P4CF,	6.430e-04,	1.68770e-02,	6.06995e-03,	0.0011435,	1.00,	2.78,	0.0108070
46,	EMP2P16BXF,	6.430e-04,	1.68770e-02,	6.06995e-03,	0.0011435,	1.00,	2.78,	0.0108070
47,	EXV22AXXXK,	6.215e-04,	1.71716e-02,	6.07000e-03,	0.0011354,	1.00,	2.83,	0.0111016
48,	SXV224AXXXK,	6.215e-04,	1.71716e-02,	6.07000e-03,	0.0011354,	1.00,	2.83,	0.0111016
49,	EXV24AXXXK,	6.215e-04,	1.71716e-02,	6.07000e-03,	0.0011354,	1.00,	2.83,	0.0111016
50,	SST2-2F6CP,	6.382e-04,	1.68770e-02,	6.07000e-03,	0.0011350,	1.00,	2.78,	0.0108070
51,	SXV224BXXK,	6.215e-04,	1.68770e-02,	6.07018e-03,	0.0011052,	1.00,	2.78,	0.0108068
52,	EXV22BXXK,	6.215e-04,	1.68770e-02,	6.07018e-03,	0.0011052,	1.00,	2.78,	0.0108068
53,	EXV24BXXK,	6.215e-04,	1.68770e-02,	6.07018e-03,	0.0011052,	1.00,	2.78,	0.0108068
54,	EMM2CCFFXF,	6.430e-05,	1.10166e-01,	6.07020e-03,	0.0011014,	1.00,	18.13,	0.1040959
55,	ETK2T25AXJ,	1.325e-04,	5.51380e-02,	6.07040e-03,	0.0010699,	1.00,	9.07,	0.0490676
56,	ESV27100XN,	1.310e-03,	1.02699e-02,	6.07140e-03,	0.0009051,	1.00,	1.69,	0.0041985
57,	ECV23AXXXN,	4.930e-04,	1.71716e-02,	6.07142e-03,	0.0009005,	1.00,	2.83,	0.0111002
58,	ECV23BXXN,	4.930e-04,	1.68770e-02,	6.07157e-03,	0.0008766,	1.00,	2.78,	0.0108054
59,	DBT2D55A0F,	1.010e-04,	5.51380e-02,	6.07194e-03,	0.0008155,	1.00,	9.07,	0.0490660
60,	%T10,	3.940e-04,	1.71872e-02,	6.07252e-03,	0.0007206,	1.00,	2.83,	0.0111147
61,	%T12,	3.940e-04,	1.71716e-02,	6.07252e-03,	0.0007196,	1.00,	2.83,	0.0110991
62,	%T11,	3.940e-04,	1.68770e-02,	6.07264e-03,	0.0007005,	1.00,	2.78,	0.0108043
63,	%T13,	3.940e-04,	1.68770e-02,	6.07264e-03,	0.0007005,	1.00,	2.78,	0.0108043
64,	ECB251M2XR,	3.686e-04,	1.71716e-02,	6.07281e-03,	0.0006732,	1.00,	2.83,	0.0110988
65,	ECB261M2XR,	3.686e-04,	1.68770e-02,	6.07291e-03,	0.0006553,	1.00,	2.78,	0.0108041
66,	ECV238XXXK,	7.344e-05,	5.51380e-02,	6.07329e-03,	0.0005930,	1.00,	9.07,	0.0490647
67,	EMF2E9AXXA,	7.500e-03,	6.47022e-03,	6.07392e-03,	0.0004891,	1.00,	1.06,	0.0003963
68,	EMF2E9BXXA,	7.500e-03,	6.47022e-03,	6.07392e-03,	0.0004891,	1.00,	1.06,	0.0003963

Rezultati vrednovanja - BDD pristup

69,	EMF2VEF17A,	7.500e-03,	6.44425e-03,	6.07412e-03,	0.0004568,	1.00,	1.06,	0.0003701
70,	EMF2VEF18A,	7.500e-03,	6.44425e-03,	6.07412e-03,	0.0004568,	1.00,	1.06,	0.0003701
71,	EMP2P235XF,	6.430e-04,	1.02699e-02,	6.07420e-03,	0.0004440,	1.00,	1.69,	0.0041957
72,	ET12X46XXF,	6.048e-05,	3.88212e-02,	6.07492e-03,	0.0003259,	1.00,	6.39,	0.0327462
73,	EXV212XXXX,	3.768e-05,	5.51380e-02,	6.07505e-03,	0.0003042,	1.00,	9.07,	0.0490629
74,	EXV237XXXX,	3.768e-05,	5.51380e-02,	6.07505e-03,	0.0003042,	1.00,	9.07,	0.0490629
75,	DCS20D55AR,	3.384e-05,	5.51380e-02,	6.07524e-03,	0.0002732,	1.00,	9.07,	0.0490627
76,	ETK2T30AXG,	1.325e-04,	1.71716e-02,	6.07543e-03,	0.0002419,	1.00,	2.83,	0.0110962
77,	ETK2T57AXG,	1.325e-04,	1.71716e-02,	6.07543e-03,	0.0002419,	1.00,	2.83,	0.0110962
78,	ETK2T30BXG,	1.325e-04,	1.68770e-02,	6.07547e-03,	0.0002355,	1.00,	2.78,	0.0108015
79,	ETK2T57BXG,	1.325e-04,	1.68770e-02,	6.07547e-03,	0.0002355,	1.00,	2.78,	0.0108015
80,	SMV215031K,	1.277e-04,	1.71716e-02,	6.07548e-03,	0.0002332,	1.00,	2.83,	0.0110961
81,	SWREC,	2.100e-02,	6.14288e-03,	6.07548e-03,	0.0002329,	1.00,	1.01,	0.0000674
82,	T8PREREC,	1.400e-01,	6.08546e-03,	6.07550e-03,	0.0002293,	1.00,	1.00,	0.0000100
83,	%T8,	3.160e-02,	6.11959e-03,	6.07550e-03,	0.0002293,	1.00,	1.01,	0.0000441
84,	SMV215042K,	1.277e-04,	1.68770e-02,	6.07552e-03,	0.0002270,	1.00,	2.78,	0.0108015
85,	SMV214742K,	1.277e-04,	1.68770e-02,	6.07552e-03,	0.0002270,	1.00,	2.78,	0.0108015
86,	DBT2D11A0F,	1.010e-04,	1.71716e-02,	6.07578e-03,	0.0001844,	1.00,	2.83,	0.0110958
87,	ECB2A1001R,	2.234e-05,	5.51380e-02,	6.07580e-03,	0.0001804,	1.00,	9.07,	0.0490622
88,	DBT2D12A0F,	1.010e-04,	1.68770e-02,	6.07581e-03,	0.0001795,	1.00,	2.78,	0.0108012
89,	ECD22103XR,	9.120e-05,	1.71716e-02,	6.07588e-03,	0.0001665,	1.00,	2.83,	0.0110957
90,	DCD22304XR,	9.120e-05,	1.71716e-02,	6.07588e-03,	0.0001665,	1.00,	2.83,	0.0110957
91,	ECD22308XR,	9.120e-05,	1.71716e-02,	6.07588e-03,	0.0001665,	1.00,	2.83,	0.0110957
92,	DCD22404XR,	9.120e-05,	1.68770e-02,	6.07591e-03,	0.0001621,	1.00,	2.78,	0.0108011
93,	ECD22203XR,	9.120e-05,	1.68770e-02,	6.07591e-03,	0.0001621,	1.00,	2.78,	0.0108011
94,	ECD22408XR,	9.120e-05,	1.68770e-02,	6.07591e-03,	0.0001621,	1.00,	2.78,	0.0108011
95,	ESV228021K,	8.760e-05,	1.71716e-02,	6.07592e-03,	0.0001599,	1.00,	2.83,	0.0110957
96,	ESV228222K,	8.760e-05,	1.68770e-02,	6.07595e-03,	0.0001557,	1.00,	2.78,	0.0108010
97,	ERE2A3X2UE,	7.650e-05,	1.71716e-02,	6.07605e-03,	0.0001397,	1.00,	2.83,	0.0110956
98,	DMM2CCFBTA,	8.083e-06,	1.10166e-01,	6.07606e-03,	0.0001385,	1.00,	18.13,	0.1040900
99,	ERE2A4X2UE,	7.650e-05,	1.68770e-02,	6.07607e-03,	0.0001360,	1.00,	2.78,	0.0108009
100,	ECV23AXXXK,	7.344e-05,	1.71716e-02,	6.07608e-03,	0.0001341,	1.00,	2.83,	0.0110955

Finished Importance analysis computation in : 57.70 sec.

Average probability computation : 70 ms.

Final Cut Sets

#MCS#	p(MCS)	F.V.	Acc.	Events...
-------	--------	------	------	-----------

1,	3.441e-03,	0.5426,	0.5426,	EDG2DGAACF %T3
2,	8.174e-04,	0.1289,	0.6716,	EDG2DGAACF EDG2DG1XXF EDG2DG2XXF
3,	4.371e-04,	0.0689,	0.7405,	EDG2DGAACF EMM2CCFDGF
4,	2.646e-04,	0.0417,	0.7822,	EMC27100XN %T3
5,	1.130e-04,	0.0178,	0.8000,	EDG2DGAACA %T3
6,	8.069e-05,	0.0127,	0.8128,	EDG2DGAACF EDG2DG1XXF SMV215042N
7,	8.069e-05,	0.0127,	0.8255,	EDG2DGAACF SMV215031N EDG2DG2XXF
8,	6.286e-05,	0.0099,	0.8354,	EMC27100XN EDG2DG1XXF EDG2DG2XXF
9,	4.821e-05,	0.0076,	0.8430,	ESV27245XN %T3
10,	4.821e-05,	0.0076,	0.8506,	ESV27162XN %T3
11,	4.821e-05,	0.0076,	0.8582,	ESV27150XN %T3
12,	3.361e-05,	0.0053,	0.8635,	EMC27100XN EMM2CCFDGF
13,	2.684e-05,	0.0042,	0.8678,	EDG2DGAACA EDG2DG1XXF EDG2DG2XXF
14,	2.684e-05,	0.0042,	0.8720,	EDG2DGAACF EDG2DG1XXF EDG2DG2XXA
15,	2.684e-05,	0.0042,	0.8762,	EDG2DGAACF EDG2DG1XXA EDG2DG2XXF
16,	2.374e-05,	0.0037,	0.8800,	ECB2A1001D %T3

17, 2.304e-05, 0.0036, 0.8836, EHX2E9XXXJ %T3
18, 2.169e-05, 0.0034, 0.8870, EDG2DGAACF EMM2CCFFXA
19, 2.075e-05, 0.0033, 0.8903, EMF2VEF18F %T3
20, 2.075e-05, 0.0033, 0.8936, EMF2VEF17F %T3
21, 2.028e-05, 0.0032, 0.8968, EDG2DGAACF EMP2P16AXA EDG2DG2XXF
22, 2.028e-05, 0.0032, 0.9000, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF EMP2P16BXA
23, 1.854e-05, 0.0029, 0.9029, EHX2E9XXXF %T3
24, 1.638e-05, 0.0026, 0.9055, EAV27239AN EAV27239BN %T3
25, 1.547e-05, 0.0024, 0.9079, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF SFL2P4BIS T9PREREC %T9
26, 1.435e-05, 0.0023, 0.9102, EDG2DGAACA EMM2CCFDGF
27, 1.435e-05, 0.0023, 0.9124, EDG2DGAACF EMM2CCFDGA
28, 1.145e-05, 0.0018, 0.9142, EDG2DGAACF ESV228021N EDG2DG2XXF
29, 1.145e-05, 0.0018, 0.9160, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF ESV228222N
30, 1.145e-05, 0.0018, 0.9178, ESV27245XN EDG2DG1XXF EDG2DG2XXF
31, 1.145e-05, 0.0018, 0.9197, ESV27162XN EDG2DG1XXF EDG2DG2XXF
32, 1.145e-05, 0.0018, 0.9215, ESV27150XN EDG2DG1XXF EDG2DG2XXF
33, 9.133e-06, 0.0014, 0.9229, EDG2DGAACF STF2SCRNSP
34, 9.092e-06, 0.0014, 0.9243, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF %T15
35, 9.092e-06, 0.0014, 0.9258, EDG2DGAACF %T14 EDG2DG2XXF
36, 7.993e-06, 0.0013, 0.9270, EDG2DGAACF ELS228011H EDG2DG2XXF
37, 7.993e-06, 0.0013, 0.9283, EDG2DGAACF ELS228041H EDG2DG2XXF
38, 7.993e-06, 0.0013, 0.9296, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF ELS228212H
39, 7.993e-06, 0.0013, 0.9308, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF ELS228242H
40, 7.966e-06, 0.0013, 0.9321, EDG2DGAACF SMV215031N SMV215042N
41, 7.265e-06, 0.0011, 0.9332, EMP2P235XA EDGOPER2 %T3
42, 6.639e-06, 0.0010, 0.9343, EDG2DGAACF T7REC %T7
43, 6.205e-06, 0.0010, 0.9352, EMC27100XN EDG2DG1XXF SMV215042N
44, 6.205e-06, 0.0010, 0.9362, EMC27100XN SMV215031N EDG2DG2XXF
45, 6.124e-06, 0.0010, 0.9372, ESV27245XN EMM2CCFDGF
46, 6.124e-06, 0.0010, 0.9382, ESV27162XN EMM2CCFDGF
47, 6.124e-06, 0.0010, 0.9391, ESV27150XN EMM2CCFDGF
48, 6.012e-06, 0.0009, 0.9401, EDG2DGAACF EMM2CCFFXF
49, 5.639e-06, 0.0009, 0.9410, ECB2A1001D EDG2DG1XXF EDG2DG2XXF
50, 5.639e-06, 0.0009, 0.9418, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF ECB2A212XD
51, 5.639e-06, 0.0009, 0.9427, EDG2DGAACF ECB2A112XD EDG2DG2XXF
52, 5.621e-06, 0.0009, 0.9436, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF SFL2P4BIS SMP2-2P4CF
53, 5.621e-06, 0.0009, 0.9445, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF EMP2P16BXF
54, 5.621e-06, 0.0009, 0.9454, EDG2DGAACF EMP2P16AXF EDG2DG2XXF
55, 5.579e-06, 0.0009, 0.9463, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF SFL2P4BIS SST2-2F6CP
56, 5.474e-06, 0.0009, 0.9471, EHX2E9XXXJ EDG2DG1XXF EDG2DG2XXF
57, 5.433e-06, 0.0009, 0.9480, EDG2DGAACF EXV22AXXXK EDG2DG2XXF
58, 5.433e-06, 0.0009, 0.9488, EDG2DGAACF EXV24AXXXK EDG2DG2XXF
59, 5.433e-06, 0.0009, 0.9497, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF SXV224BXXK
60, 5.433e-06, 0.0009, 0.9506, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF EXV24BXXK
61, 5.433e-06, 0.0009, 0.9514, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF EXV22BXXK
62, 5.433e-06, 0.0009, 0.9523, EDG2DGAACF SXV224AXXK EDG2DG2XXF
63, 4.929e-06, 0.0008, 0.9531, EMF2VEF18F EDG2DG1XXF EDG2DG2XXF
64, 4.929e-06, 0.0008, 0.9538, EMF2VEF17F EDG2DG1XXF EDG2DG2XXF
65, 4.876e-06, 0.0008, 0.9546, ETK2T25AXJ %T3
66, 4.405e-06, 0.0007, 0.9553, EHX2E9XXXF EDG2DG1XXF EDG2DG2XXF
67, 4.310e-06, 0.0007, 0.9560, EDG2DGAACF ECV23AXXXN EDG2DG2XXF
68, 4.310e-06, 0.0007, 0.9567, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF ECV23BXXN
69, 4.103e-06, 0.0006, 0.9573, ESV27100XN EDGOPER2 %T3
70, 3.892e-06, 0.0006, 0.9579, EAV27239AN EAV27239BN EDG2DG1XXF EDG2DG2XXF
71, 3.717e-06, 0.0006, 0.9585, DBT2D55AOF %T3
72, 3.444e-06, 0.0005, 0.9590, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF %T11

Final CS from MCS set selection in : 1.12 sec.

B2 CHRGR

Fault Tree after compaction...

Number of gates : 465
 Number of events : 438
 Number of edges : 1580
 Top gate name : G2198

TOP event BDD nodes : 36528
 TOP event cutset set size : 1.018015e+32
 TOP event BDD build (sec) : 3.99
 MCS set BDD nodes : 82830
 MCS set size : 14840731139897
 MCS set BDD build (sec) : 0.43

Total time to finish computations (sec) : 4.60

size	mcs_counters
1 :	0
2 :	0
3 :	3042
4 :	40184
5 :	4098959
6 :	225647111
7 :	4301398367
8 :	39058727014
9 :	213526131140
10 :	776874070634
11+ :	13806741023446

Total : 14840731139897

RELIABILITY PARAMETERS

=====

TOP probability from CSs: 8.831216e-05
 MCSs upper bound : 1.173825e-04
 Rare event upper bound : 1.173894e-04

Event Importance Information

Pos	Variable (BE)	Prob.	QTOP (BE=1)	QTOP (BE=0)	FV.	RRW.	RAW.	PD.
1,	%T3,	3.680e-02,	2.28245e-03,	4.48307e-06,	0.9492360,	19.70,	25.85,	0.0022780
2,	DFLB54-D34,	1.000e+00,	8.83122e-05,	7.21351e-06,	0.9183181,	12.24,	1.00,	0.0000811
3,	EDG2DG1XXF,	9.350e-02,	5.45124e-04,	4.11948e-05,	0.5335317,	2.14,	6.17,	0.0005039
4,	EDG2DG2XXF,	9.350e-02,	4.78952e-04,	4.80200e-05,	0.4562466,	1.84,	5.42,	0.0004309
5,	EDGOPER1,	1.230e-01,	3.75529e-04,	4.80298e-05,	0.4561363,	1.84,	4.25,	0.0003275
6,	EDG2DGAACF,	9.350e-02,	4.05186e-04,	5.56285e-05,	0.3700919,	1.59,	4.59,	0.0003496
7,	EREC A3/A4,	2.630e-01,	1.62699e-04,	6.17670e-05,	0.3005834,	1.43,	1.84,	0.0001009
8,	EREC B5/B6,	2.600e-01,	1.62929e-04,	6.20954e-05,	0.2968643,	1.42,	1.84,	0.0001008
9,	EMM2CCFDGF,	4.675e-03,	3.78178e-03,	7.09641e-05,	0.1964402,	1.24,	42.82,	0.0037108
10,	SMV215042N,	9.230e-03,	7.17732e-04,	8.24485e-05,	0.0663971,	1.07,	8.13,	0.0006353
11,	SMV215031N,	9.230e-03,	5.68127e-04,	8.38422e-05,	0.0506153,	1.05,	6.43,	0.0004843
12,	SFL2P4BIS,	1.000e+00,	8.83122e-05,	8.42770e-05,	0.0456922,	1.05,	1.00,	0.0000040

Rezultati vrednovanja - BDD pristup

13,	%T14,	1.040e-03,	3.43226e-03,	8.48308e-05,	0.0394207,	1.04,	38.87,	0.0033474
14,	%T15,	1.040e-03,	2.95731e-03,	8.53253e-05,	0.0338217,	1.04,	33.49,	0.0028720
15,	EMC27100XN,	7.190e-03,	3.75529e-04,	8.62321e-05,	0.0235533,	1.02,	4.25,	0.0002893
16,	EDG2DG2XXA,	3.070e-03,	7.17732e-04,	8.63739e-05,	0.0219479,	1.02,	8.13,	0.0006314
17,	EMM2CCFFXA,	2.320e-04,	6.60675e-03,	8.67995e-05,	0.0171282,	1.02,	74.81,	0.0065199
18,	EDG2DG1XXA,	3.070e-03,	5.68127e-04,	8.68346e-05,	0.0167312,	1.02,	6.43,	0.0004813
19,	EMP2P16BXA,	2.320e-03,	7.17732e-04,	8.68485e-05,	0.0165736,	1.02,	8.13,	0.0006309
20,	SMP2-2P4CA,	2.320e-03,	7.17524e-04,	8.68490e-05,	0.0165681,	1.02,	8.12,	0.0006307
21,	%T10,	3.940e-04,	3.15189e-03,	8.71046e-05,	0.0136734,	1.01,	35.69,	0.0030648
22,	%T12,	3.940e-04,	3.14732e-03,	8.71064e-05,	0.0136530,	1.01,	35.64,	0.0030602
23,	%T11,	3.940e-04,	2.94836e-03,	8.71849e-05,	0.0127650,	1.01,	33.39,	0.0028612
24,	%T13,	3.940e-04,	2.94836e-03,	8.71849e-05,	0.0127650,	1.01,	33.39,	0.0028612
25,	%T9,	3.160e-02,	1.22506e-04,	8.71964e-05,	0.0126347,	1.01,	1.39,	0.0000353
26,	T9PREREC,	5.600e-02,	1.07121e-04,	8.71964e-05,	0.0126347,	1.01,	1.21,	0.0000199
27,	EMP2P16AXA,	2.320e-03,	5.68127e-04,	8.71964e-05,	0.0126343,	1.01,	6.43,	0.0004809
28,	EMM2CCFDGA,	1.535e-04,	6.60675e-03,	8.73114e-05,	0.0113318,	1.01,	74.81,	0.0065194
29,	EDG2DGAACA,	3.070e-03,	3.75529e-04,	8.74277e-05,	0.0100153,	1.01,	4.25,	0.0002881
30,	ESV228222N,	1.310e-03,	7.17732e-04,	8.74865e-05,	0.0093489,	1.01,	8.13,	0.0006302
31,	ESV228021N,	1.310e-03,	5.68127e-04,	8.76828e-05,	0.0071268,	1.01,	6.43,	0.0004804
32,	ECB2A409XD,	6.450e-04,	1.04478e-03,	8.76948e-05,	0.0069902,	1.01,	11.83,	0.0009571
33,	ECB2A408XD,	6.450e-04,	1.04478e-03,	8.76948e-05,	0.0069902,	1.01,	11.83,	0.0009571
34,	ECB2A309XD,	6.450e-04,	1.03578e-03,	8.77006e-05,	0.0069244,	1.01,	11.73,	0.0009481
35,	ECB2A308XD,	6.450e-04,	1.03578e-03,	8.77006e-05,	0.0069244,	1.01,	11.73,	0.0009481
36,	ELS228242H,	9.143e-04,	7.17732e-04,	8.77362e-05,	0.0065224,	1.01,	8.13,	0.0006300
37,	ELS228212H,	9.143e-04,	7.17732e-04,	8.77362e-05,	0.0065224,	1.01,	8.13,	0.0006300
38,	%T7,	1.000e-03,	5.50691e-04,	8.78493e-05,	0.0052410,	1.01,	6.24,	0.0004628
39,	T7REC,	7.100e-02,	9.43682e-05,	8.78493e-05,	0.0052410,	1.01,	1.07,	0.0000065
40,	ELS228041H,	9.143e-04,	5.68127e-04,	8.78731e-05,	0.0049721,	1.00,	6.43,	0.0004803
41,	ELS228011H,	9.143e-04,	5.68127e-04,	8.78731e-05,	0.0049721,	1.00,	6.43,	0.0004803
42,	SCB22A402D,	6.450e-04,	7.17524e-04,	8.79061e-05,	0.0045985,	1.00,	8.12,	0.0006296
43,	DBC202D32F,	2.688e-04,	1.56862e-03,	8.79141e-05,	0.0045069,	1.00,	17.76,	0.0014807
44,	EXV22BXXXX,	6.215e-04,	7.17732e-04,	8.79207e-05,	0.0044323,	1.00,	8.13,	0.0006298
45,	EXV24BXXXX,	6.215e-04,	7.17732e-04,	8.79207e-05,	0.0044323,	1.00,	8.13,	0.0006298
46,	SXV224BXXXX,	6.215e-04,	7.17732e-04,	8.79207e-05,	0.0044323,	1.00,	8.13,	0.0006298
47,	ESV27245XN,	1.310e-03,	3.75529e-04,	8.79354e-05,	0.0042661,	1.00,	4.25,	0.0002876
48,	ESV27162XN,	1.310e-03,	3.75529e-04,	8.79354e-05,	0.0042661,	1.00,	4.25,	0.0002876
49,	ESV27150XN,	1.310e-03,	3.75529e-04,	8.79354e-05,	0.0042661,	1.00,	4.25,	0.0002876
50,	STF2SCRNSP,	9.768e-05,	3.78178e-03,	8.79513e-05,	0.0040857,	1.00,	42.82,	0.0036938
51,	ECV23BXXXX,	4.930e-04,	7.17732e-04,	8.80017e-05,	0.0035155,	1.00,	8.13,	0.0006297
52,	SCV22SW2CN,	4.930e-04,	7.17524e-04,	8.80018e-05,	0.0035143,	1.00,	8.12,	0.0006295
53,	EXV22AXXXX,	6.215e-04,	5.68127e-04,	8.80138e-05,	0.0033788,	1.00,	6.43,	0.0004801
54,	EXV24AXXXX,	6.215e-04,	5.68127e-04,	8.80138e-05,	0.0033788,	1.00,	6.43,	0.0004801
55,	SXV224AXXX,	6.215e-04,	5.68127e-04,	8.80138e-05,	0.0033788,	1.00,	6.43,	0.0004801
56,	EMP2P16AXF,	6.430e-04,	5.45124e-04,	8.80182e-05,	0.0033282,	1.00,	6.17,	0.0004571
57,	EMP2P16BXF,	6.430e-04,	4.78952e-04,	8.80608e-05,	0.0028461,	1.00,	5.42,	0.0003909
58,	SMP2-2P4CF,	6.430e-04,	4.78952e-04,	8.80608e-05,	0.0028461,	1.00,	5.42,	0.0003909
59,	SST2-2F6CP,	6.382e-04,	4.78952e-04,	8.80627e-05,	0.0028248,	1.00,	5.42,	0.0003909
60,	EMM2CCFFXF,	6.430e-05,	3.78178e-03,	8.80747e-05,	0.0026894,	1.00,	42.82,	0.0036937
61,	ECV23AXXXN,	4.930e-04,	5.68127e-04,	8.80755e-05,	0.0026799,	1.00,	6.43,	0.0004801
62,	ECB261M2XR,	3.686e-04,	7.17732e-04,	8.80801e-05,	0.0026281,	1.00,	8.13,	0.0006297
63,	ET12X25XXF,	6.048e-05,	3.43226e-03,	8.81099e-05,	0.0022902,	1.00,	38.87,	0.0033442
64,	EHX2E9XXXJ,	6.262e-04,	4.05186e-04,	8.81136e-05,	0.0022483,	1.00,	4.59,	0.0003171
65,	ECB2A1001D,	6.450e-04,	3.75584e-04,	8.81267e-05,	0.0020995,	1.00,	4.25,	0.0002875
66,	EMF2VEF17F,	5.638e-04,	4.05186e-04,	8.81334e-05,	0.0020241,	1.00,	4.59,	0.0003171
67,	EMF2VEF18F,	5.638e-04,	4.05186e-04,	8.81334e-05,	0.0020241,	1.00,	4.59,	0.0003171
68,	ECB251M2XR,	3.686e-04,	5.68127e-04,	8.81352e-05,	0.0020034,	1.00,	6.43,	0.0004800

Rezultati vrednovanja - BDD pristup

69,	ET12X26XXF,	6.048e-05,	2.95731e-03,	8.81386e-05,	0.0019649,	1.00,	33.49,	0.0028692
70,	EHX2E9XXF,	5.039e-04,	4.05186e-04,	8.81524e-05,	0.0018090,	1.00,	4.59,	0.0003170
71,	ERE2409PRK,	1.560e-04,	1.04478e-03,	8.81629e-05,	0.0016898,	1.00,	11.83,	0.0009566
72,	ERE2309PRK,	1.560e-04,	1.03578e-03,	8.81643e-05,	0.0016739,	1.00,	11.73,	0.0009476
73,	DCD200224R,	9.120e-05,	1.56862e-03,	8.81771e-05,	0.0015288,	1.00,	17.76,	0.0014804
74,	EAV27239BN,	2.110e-02,	9.42472e-05,	8.81842e-05,	0.0014486,	1.00,	1.07,	0.0000061
75,	EAV27239AN,	2.110e-02,	9.42472e-05,	8.81842e-05,	0.0014486,	1.00,	1.07,	0.0000061
76,	EDGOPER2,	8.510e-02,	8.95433e-05,	8.81976e-05,	0.0012968,	1.00,	1.01,	0.0000013
77,	DBT2D12AOF,	1.010e-04,	1.04478e-03,	8.82155e-05,	0.0010940,	1.00,	11.83,	0.0009566
78,	DBT2D11AOF,	1.010e-04,	1.03578e-03,	8.82165e-05,	0.0010837,	1.00,	11.73,	0.0009476
79,	SWREC,	2.100e-02,	9.27200e-05,	8.82176e-05,	0.0010706,	1.00,	1.05,	0.0000045
80,	DCD22404XR,	9.120e-05,	1.04478e-03,	8.82249e-05,	0.0009878,	1.00,	11.83,	0.0009566
81,	DCD22304XR,	9.120e-05,	1.03578e-03,	8.82257e-05,	0.0009785,	1.00,	11.73,	0.0009476
82,	SMV215042K,	1.277e-04,	7.17732e-04,	8.82318e-05,	0.0009103,	1.00,	8.13,	0.0006295
83,	ECB2512XXR,	2.234e-05,	3.43226e-03,	8.82375e-05,	0.0008459,	1.00,	38.87,	0.0033440
84,	ECB2A301XR,	2.234e-05,	3.43226e-03,	8.82375e-05,	0.0008459,	1.00,	38.87,	0.0033440
85,	DMM2CCFBTA,	8.083e-06,	8.19260e-03,	8.82466e-05,	0.0007418,	1.00,	92.77,	0.0081044
86,	ECB2A401XR,	2.234e-05,	2.95731e-03,	8.82481e-05,	0.0007258,	1.00,	33.49,	0.0028691
87,	ECB2612XXR,	2.234e-05,	2.95731e-03,	8.82481e-05,	0.0007258,	1.00,	33.49,	0.0028691
88,	SMV215031K,	1.277e-04,	5.68127e-04,	8.82509e-05,	0.0006939,	1.00,	6.43,	0.0004799
89,	ETK2T57AXG,	1.325e-04,	5.45124e-04,	8.82516e-05,	0.0006855,	1.00,	6.17,	0.0004569
90,	ETK2T30AXG,	1.325e-04,	5.45124e-04,	8.82516e-05,	0.0006855,	1.00,	6.17,	0.0004569
91,	OPER-15,	7.900e-02,	8.90111e-05,	8.82522e-05,	0.0006788,	1.00,	1.01,	0.0000008
92,	%T8,	3.160e-02,	9.01478e-05,	8.82523e-05,	0.0006782,	1.00,	1.02,	0.0000019
93,	T8PREREC,	1.400e-01,	8.86801e-05,	8.82523e-05,	0.0006782,	1.00,	1.00,	0.0000004
94,	EMP2P235XA,	2.320e-03,	1.12860e-04,	8.82551e-05,	0.0006464,	1.00,	1.28,	0.0000246
95,	ECB2A410XD,	6.450e-04,	1.69807e-04,	8.82596e-05,	0.0005956,	1.00,	1.92,	0.0000815
96,	ETK2T30BXG,	1.325e-04,	4.78952e-04,	8.82604e-05,	0.0005862,	1.00,	5.42,	0.0003907
97,	ETK2T57BXG,	1.325e-04,	4.78952e-04,	8.82604e-05,	0.0005862,	1.00,	5.42,	0.0003907
98,	SMV214742K,	1.277e-04,	4.78952e-04,	8.82623e-05,	0.0005649,	1.00,	5.42,	0.0003907
99,	ECB2613XXD,	6.450e-04,	1.62929e-04,	8.82640e-05,	0.0005453,	1.00,	1.84,	0.0000747
100,	ECB2513XXD,	6.450e-04,	1.62929e-04,	8.82640e-05,	0.0005453,	1.00,	1.84,	0.0000747

Finished Importance analysis computation in : 64.79 sec.

Average probability computation : 73 ms.

Final Cut Sets

#MCS#	p(MCS)	F.V.	Acc.	Events...
1,	1.041e-05,	0.0887,	0.0887,	EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF ERECA3/A4 EDGOPER1 DFLB54-D34
2,	1.029e-05,	0.0876,	0.1763,	EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF EDGOPER1 ERECB5/B6 DFLB54-D34
3,	7.911e-06,	0.0674,	0.2437,	EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF ERECA3/A4 EDG2DGAACF DFLB54-D34
4,	7.821e-06,	0.0666,	0.3103,	EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF EDG2DGAACF ERECB5/B6 DFLB54-D34
5,	5.565e-06,	0.0474,	0.3577,	%T3 EMM2CCFDGF ERECA3/A4 EDGOPER1 DFLB54-D34
6,	5.502e-06,	0.0469,	0.4046,	%T3 EMM2CCFDGF EDGOPER1 ERECB5/B6 DFLB54-D34
7,	4.231e-06,	0.0360,	0.4406,	%T3 EMM2CCFDGF ERECA3/A4 EDG2DGAACF DFLB54-D34
8,	4.182e-06,	0.0356,	0.4763,	%T3 EMM2CCFDGF EDG2DGAACF ERECB5/B6 DFLB54-D34
9,	2.969e-06,	0.0253,	0.5016,	EDG2DG1XXF %T3 SMV215042N EDG2DGAACF DFLB54-D34
10,	1.082e-06,	0.0092,	0.5108,	%T14 %T15 DFLB54-D34
11,	1.050e-06,	0.0089,	0.5197,	%T3 EMM2CCFFXA EDGOPER1 DFLB54-D34
12,	1.027e-06,	0.0088,	0.5285,	EDG2DG1XXF %T3 SMV215042N ERECA3/A4 EDGOPER1 DFLB54-D34
13,	1.027e-06,	0.0088,	0.5372,	SMV215031N %T3 EDG2DG2XXF ERECA3/A4 EDGOPER1 DFLB54-D34
14,	1.016e-06,	0.0087,	0.5459,	EDG2DG1XXF %T3 SMV215042N EDGOPER1 ERECB5/B6 DFLB54-D34
15,	1.016e-06,	0.0087,	0.5545,	SMV215031N %T3 EDG2DG2XXF EDGOPER1 ERECB5/B6 DFLB54-D34
16,	9.877e-07,	0.0084,	0.5629,	EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXA EDG2DGAACF DFLB54-D34

17, 8.222e-07, 0.0070, 0.5699, EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF ERECA3/A4 EDGOPER1 OPER-15
18, 8.128e-07, 0.0069, 0.5769, EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF EDGOPER1 ERECB5/B6 OPER-15
19, 7.810e-07, 0.0067, 0.5835, SMV215031N %T3 EDG2DG2XXF ERECA3/A4 EDG2DGAACF DFLB54-D34
20, 7.721e-07, 0.0066, 0.5901, SMV215031N %T3 EDG2DG2XXF EDG2DGAACF ERECB5/B6 DFLB54-D34
21, 7.464e-07, 0.0064, 0.5964, EDG2DG1XXF SFL2P4BIS %T3 SMP2-2P4CA EDG2DGAACF DFLB54-D34
22, 7.464e-07, 0.0064, 0.6028, EDG2DG1XXF %T3 EMP2P16BXA EDG2DGAACF DFLB54-D34
23, 6.948e-07, 0.0059, 0.6087, %T3 EMM2CCFDGA EDGOPER1 DFLB54-D34
24, 6.250e-07, 0.0053, 0.6140, EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF ERECA3/A4 EDG2DGAACF OPER-15
25, 6.179e-07, 0.0053, 0.6193, EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF EDG2DGAACF ERECB5/B6 OPER-15
26, 6.084e-07, 0.0052, 0.6245, EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF ERECA3/A4 EMC27100XN DFLB54-D34
27, 6.014e-07, 0.0051, 0.6296, EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF EMC27100XN ERECB5/B6 DFLB54-D34
28, 5.693e-07, 0.0048, 0.6345, EDG2DG1XXF SFL2P4BIS %T3 %T9 T9PREREC EDG2DGAACF DFLB54-D34
29, 4.401e-07, 0.0037, 0.6382, %T3 EDG2DG2XXF %T14 EDGOPER1 DFLB54-D34
30, 4.401e-07, 0.0037, 0.6420, EDG2DG1XXF %T3 %T15 EDGOPER1 DFLB54-D34
31, 4.397e-07, 0.0037, 0.6457, %T3 EMM2CCFDGF ERECA3/A4 EDGOPER1 OPER-15
32, 4.346e-07, 0.0037, 0.6494, %T3 EMM2CCFDGF EDGOPER1 ERECB5/B6 OPER-15
33, 4.214e-07, 0.0036, 0.6530, EDG2DG1XXF %T3 ESV228222N EDG2DGAACF DFLB54-D34
34, 4.098e-07, 0.0035, 0.6565, %T12 %T15 DFLB54-D34
35, 4.098e-07, 0.0035, 0.6600, %T10 %T15 DFLB54-D34
36, 4.098e-07, 0.0035, 0.6635, %T11 %T14 DFLB54-D34
37, 4.098e-07, 0.0035, 0.6670, %T13 %T14 DFLB54-D34
38, 3.856e-07, 0.0033, 0.6703, SMV215031N %T3 SMV215042N EDGOPER1 DFLB54-D34
39, 3.417e-07, 0.0029, 0.6732, EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXA ERECA3/A4 EDGOPER1 DFLB54-D34
40, 3.417e-07, 0.0029, 0.6761, EDG2DG1XXA %T3 EDG2DG2XXF ERECA3/A4 EDGOPER1 DFLB54-D34
41, 3.378e-07, 0.0029, 0.6790, EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXA EDGOPER1 ERECB5/B6 DFLB54-D34
42, 3.378e-07, 0.0029, 0.6818, EDG2DG1XXA %T3 EDG2DG2XXF EDGOPER1 ERECB5/B6 DFLB54-D34
43, 3.346e-07, 0.0029, 0.6847, %T3 EDG2DG2XXF %T14 EDG2DGAACF DFLB54-D34
44, 3.346e-07, 0.0029, 0.6875, EDG2DG1XXF %T3 %T15 EDG2DGAACF DFLB54-D34
45, 3.342e-07, 0.0028, 0.6904, %T3 EMM2CCFDGF ERECA3/A4 EDG2DGAACF OPER-15
46, 3.304e-07, 0.0028, 0.6932, %T3 EMM2CCFDGF EDG2DGAACF ERECB5/B6 OPER-15
47, 3.253e-07, 0.0028, 0.6960, %T3 EMM2CCFDGF ERECA3/A4 EMC27100XN DFLB54-D34
48, 3.216e-07, 0.0027, 0.6987, %T3 EMM2CCFDGF EMC27100XN ERECB5/B6 DFLB54-D34
49, 3.214e-07, 0.0027, 0.7014, %T3 T7REC %T7 EDGOPER1 DFLB54-D34
50, 2.941e-07, 0.0025, 0.7039, EDG2DG1XXF %T3 ELS228242H EDG2DGAACF DFLB54-D34
51, 2.941e-07, 0.0025, 0.7065, EDG2DG1XXF %T3 ELS228212H EDG2DGAACF DFLB54-D34
52, 2.796e-07, 0.0024, 0.7088, %T14 DBC202D32F DFLB54-D34
53, 2.730e-07, 0.0023, 0.7112, %T3 EDG2DG2XXF ECB2A308XD EDGOPER1 DFLB54-D34
54, 2.730e-07, 0.0023, 0.7135, %T3 EDG2DG2XXF ECB2A309XD EDGOPER1 DFLB54-D34
55, 2.730e-07, 0.0023, 0.7158, EDG2DG1XXF %T3 ECB2A408XD EDGOPER1 DFLB54-D34
56, 2.730e-07, 0.0023, 0.7181, EDG2DG1XXF %T3 ECB2A409XD EDGOPER1 DFLB54-D34
57, 2.598e-07, 0.0022, 0.7203, EDG2DG1XXA %T3 EDG2DG2XXF ERECA3/A4 EDG2DGAACF DFLB54-D34
58, 2.598e-07, 0.0022, 0.7226, EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF ERECA3/A4 EDG2DGAACA DFLB54-D34
59, 2.582e-07, 0.0022, 0.7248, EDG2DG1XXF SFL2P4BIS %T3 SMP2-2P4CA ERECA3/A4 EDGOPER1 DFLB54-D34
60, 2.582e-07, 0.0022, 0.7270, EDG2DG1XXF %T3 EMP2P16BXA ERECA3/A4 EDGOPER1 DFLB54-D34
61, 2.582e-07, 0.0022, 0.7292, EMP2P16AXA %T3 EDG2DG2XXF ERECA3/A4 EDGOPER1 DFLB54-D34
62, 2.568e-07, 0.0022, 0.7313, EDG2DG1XXA %T3 EDG2DG2XXF EDG2DGAACF ERECB5/B6 DFLB54-D34
63, 2.568e-07, 0.0022, 0.7335, EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF EDG2DGAACA ERECB5/B6 DFLB54-D34
64, 2.553e-07, 0.0022, 0.7357, EDG2DG1XXF SFL2P4BIS %T3 SMP2-2P4CA EDGOPER1 ERECB5/B6 DFLB54-D34
65, 2.553e-07, 0.0022, 0.7379, EDG2DG1XXF %T3 EMP2P16BXA EDGOPER1 ERECB5/B6 DFLB54-D34
66, 2.553e-07, 0.0022, 0.7401, EMP2P16AXA %T3 EDG2DG2XXF EDGOPER1 ERECB5/B6 DFLB54-D34
67, 2.346e-07, 0.0020, 0.7421, EDG2DG1XXF %T3 SMV215042N EDG2DGAACF OPER-15
68, 2.099e-07, 0.0018, 0.7438, %T3 EMM2CCFFXA ERECA3/A4 EDG2DGAACF DFLB54-D34
69, 2.075e-07, 0.0018, 0.7456, %T3 EMM2CCFFXA EDG2DGAACF ERECB5/B6 DFLB54-D34
70, 2.075e-07, 0.0018, 0.7474, %T3 EDG2DG2XXF ECB2A308XD EDG2DGAACF DFLB54-D34
71, 2.075e-07, 0.0018, 0.7491, %T3 EDG2DG2XXF ECB2A309XD EDG2DGAACF DFLB54-D34
72, 2.075e-07, 0.0018, 0.7509, EDG2DG1XXF SFL2P4BIS %T3 SCB22A402D EDG2DGAACF DFLB54-D34

```

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
Rare event approximation from final cut set: 1.173411e-04
Final CS from MCS set selection in : 1.20 sec.

```

B3 DCPOWER

 Fault Tree after compaction...

Number of gates : 478
 Number of events : 447
 Number of edges : 1617
 Top gate name : G2196

TOP event BDD nodes : 97840
 TOP event cutset set size : 1.369647e+32
 TOP event BDD build (sec) : 3.11
 MCS set BDD nodes : 274012
 MCS set size : 152148878846392
 MCS set BDD build (sec) : 1.62

Total time to finish computations (sec) : 4.92

size	mcs_counters
1 :	0
2 :	4
3 :	0
4 :	637
5 :	29662
6 :	691895
7 :	19490392
8 :	782362520
9 :	13364816323
10 :	128745982037
11+:	152005965472922

Total : 152148878846392

RELIABILITY PARAMETERS

=====

TOP probability from CSs: 1.560879e-07
 MCSs upper bound : 1.560882e-07
 Rare event upper bound : 1.560882e-07

Event Importance Information

Pos	Variable (BE)	Prob.	QTOP(BE=1)	QTOP(BE=0)	FV.	RRW.	RAW.	PD.
1,	%T11,	3.940e-04,	3.95080e-04,	4.26686e-10,	0.9972664,	365.81,	2531.14,	0.0003951
2,	%T10,	3.940e-04,	3.95080e-04,	4.26686e-10,	0.9972664,	365.81,	2531.14,	0.0003951
3,	DBD202D02F,	1.080e-06,	3.95080e-04,	1.55661e-07,	0.0027325,	1.00,	2531.14,	0.0003949
4,	DBD202D01F,	1.080e-06,	3.95080e-04,	1.55661e-07,	0.0027325,	1.00,	2531.14,	0.0003949
5,	DFLD34-D01,	0.000e+00,	2.26178e-07,	1.56088e-07,	0.0000000,	1.00,	1.45,	0.0000001
6,	DFLD34-D02,	0.000e+00,	2.26188e-07,	1.56088e-07,	0.0000000,	1.00,	1.45,	0.0000001

Finished Importance analysis computation in : 67.39 sec.

Average probability computation : 75 ms.

Final Cut Sets

Rezultati vrednovanja - BDD pristup

#MCS#	p(MCS)	F.V.	Acc.	Events....
-------	--------	------	------	------------

1,	1.552e-07,	0.9945,	0.9945,	%T11 %T10
----	------------	---------	---------	-----------

2,	4.255e-10,	0.0027,	0.9973,	%T11 DBD202D01F
----	------------	---------	---------	-----------------

3,	4.255e-10,	0.0027,	1.0000,	%T10 DBD202D02F
----	------------	---------	---------	-----------------

4,	1.166e-12,	0.0000,	1.0000,	DBD202D02F DBD202D01F
----	------------	---------	---------	-----------------------

--	--	--	--	--

Rare event approximation from final cut set: 1.560882e-07

Final CS from MCS set selection in : 0.06 sec.

B4 EFW

Fault Tree after compaction...

Number of gates : 654
 Number of events : 692
 Number of edges : 2233
 Top gate name : G2191

TOP event BDD nodes : 838345
 TOP event cutset set size : 8.611793e+55
 TOP event BDD build (sec) : 7.73
 MCS set BDD nodes : 322850
 MCS set size : 1769960840506752
 MCS set BDD build (sec) : 7.34

Total time to finish computations (sec) : 15.34

size	mcs_counters
1 :	0
2 :	264
3 :	16019
4 :	258709
5 :	19874391
6 :	1043675258
7 :	13982047104
8 :	101681493456
9 :	527540310893
10 :	2050687759746
11+ :	1767265885070912

Total : 1769960840506752

RELIABILITY PARAMETERS

=====

TOP probability from CSs: 1.061859e-03
 MCSs upper bound : 1.107140e-03
 Rare event upper bound : 1.107683e-03

Event Importance Information

Pos	Variable (BE)	Prob.	QTOP (BE=1)	QTOP (BE=0)	FV.	RRW.	RAW.	PD.
1,	QTP202P7AF,	1.434e-01,	6.35327e-03,	1.76045e-04,	0.8342105,	6.03,	5.98,	0.0061772
2,	QMP202P7BA,	2.317e-03,	1.63815e-01,	6.83884e-04,	0.3559563,	1.55,	154.27,	0.1631314
3,	QMP202P7BF,	6.430e-04,	1.63815e-01,	9.57141e-04,	0.0986174,	1.11,	154.27,	0.1628582
4,	QXV2EFW3BK,	5.652e-04,	1.63815e-01,	9.69819e-04,	0.0866784,	1.09,	154.27,	0.1628455
5,	QCV2EFW4BN,	4.929e-04,	1.63815e-01,	9.81598e-04,	0.0755851,	1.08,	154.27,	0.1628337
6,	QHF2REFILL,	1.200e-02,	7.41823e-03,	9.84656e-04,	0.0727054,	1.08,	6.99,	0.0064336
7,	%T3,	3.680e-02,	2.78485e-03,	9.96030e-04,	0.0619937,	1.07,	2.62,	0.0017888
8,	%T10,	3.940e-04,	1.63888e-01,	9.97680e-04,	0.0604399,	1.06,	154.34,	0.1628900
9,	%T12,	3.940e-04,	1.63887e-01,	9.97681e-04,	0.0604398,	1.06,	154.34,	0.1628896
10,	QCB20A311R,	3.352e-04,	1.63815e-01,	1.00729e-03,	0.0513941,	1.05,	154.27,	0.1628080
11,	PMV2CV340N,	9.188e-03,	6.35327e-03,	1.01279e-03,	0.0462098,	1.05,	5.98,	0.0053405
12,	EDG2DG1XXF,	9.350e-02,	1.49882e-03,	1.01679e-03,	0.0424444,	1.04,	1.41,	0.0004820

Rezultati vrednovanja - BDD pristup

13,	QTP202P7AA,	7.244e-03,	6.35327e-03,	1.02325e-03,	0.0363614,	1.04,	5.98,	0.0053300
14,	SXV2SW39AK,	1.017e-02,	4.81925e-03,	1.02325e-03,	0.0363563,	1.04,	4.54,	0.0037960
15,	ERECa3/A4,	2.630e-01,	1.16205e-03,	1.02610e-03,	0.0336722,	1.03,	1.09,	0.0001360
16,	QMV200716N,	9.188e-03,	4.81925e-03,	1.02702e-03,	0.0328133,	1.03,	4.54,	0.0037922
17,	QMV200789C,	9.188e-03,	4.81925e-03,	1.02702e-03,	0.0328133,	1.03,	4.54,	0.0037922
18,	EDGOPER1,	1.230e-01,	1.29863e-03,	1.02865e-03,	0.0312727,	1.03,	1.22,	0.0002700
19,	EDG2DGAACF,	9.350e-02,	1.29898e-03,	1.03740e-03,	0.0230324,	1.02,	1.22,	0.0002616
20,	QMV200789K,	3.823e-03,	6.10607e-03,	1.04250e-03,	0.0182303,	1.02,	5.75,	0.0050636
21,	DCD22304XR,	9.120e-05,	1.63835e-01,	1.04701e-03,	0.0139814,	1.01,	154.29,	0.1627881
22,	QMV2CV707K,	1.915e-03,	7.41823e-03,	1.04966e-03,	0.0114853,	1.01,	6.99,	0.0063686
23,	QCV2EFW4BK,	7.344e-05,	1.63815e-01,	1.04991e-03,	0.0112571,	1.01,	154.27,	0.1627654
24,	EDG2DG2XXF,	9.350e-02,	1.17614e-03,	1.05007e-03,	0.0111004,	1.01,	1.11,	0.0001261
25,	QSV2SV317N,	1.309e-03,	6.35327e-03,	1.05492e-03,	0.0065315,	1.01,	5.98,	0.0052983
26,	PSV2SV205N,	1.309e-03,	6.35327e-03,	1.05492e-03,	0.0065315,	1.01,	5.98,	0.0052983
27,	EMM2CCFDGF,	4.675e-03,	2.48457e-03,	1.05518e-03,	0.0062931,	1.01,	2.34,	0.0014294
28,	SXV2SW39BK,	1.017e-02,	1.58081e-03,	1.05653e-03,	0.0050213,	1.01,	1.49,	0.0005243
29,	QMV200795C,	9.188e-03,	1.58081e-03,	1.05705e-03,	0.0045320,	1.00,	1.49,	0.0005238
30,	QMV200711N,	9.188e-03,	1.58081e-03,	1.05705e-03,	0.0045320,	1.00,	1.49,	0.0005238
31,	%T14,	1.040e-03,	5.28119e-03,	1.05747e-03,	0.0041368,	1.00,	4.97,	0.0042237
32,	SMV215031N,	9.230e-03,	1.49908e-03,	1.05779e-03,	0.0038359,	1.00,	1.41,	0.0004413
33,	OPER-18RM,	7.200e-03,	1.56523e-03,	1.05821e-03,	0.0034379,	1.00,	1.47,	0.0005070
34,	OPER-18M,	7.200e-03,	1.56523e-03,	1.05821e-03,	0.0034379,	1.00,	1.47,	0.0005070
35,	QXV2CT005K,	5.652e-04,	7.41823e-03,	1.05826e-03,	0.0033852,	1.00,	6.99,	0.0063600
36,	QXV200802K,	5.652e-04,	7.41823e-03,	1.05826e-03,	0.0033852,	1.00,	6.99,	0.0063600
37,	SFL2P4BIS,	1.000e+00,	1.06186e-03,	1.05851e-03,	0.0031521,	1.00,	1.00,	0.0000033
38,	QCV2EFW01N,	4.929e-04,	7.41823e-03,	1.05872e-03,	0.0029520,	1.00,	6.99,	0.0063595
39,	QCV2EFW16N,	4.929e-04,	7.41823e-03,	1.05872e-03,	0.0029520,	1.00,	6.99,	0.0063595
40,	QCV200801N,	4.929e-04,	7.41823e-03,	1.05872e-03,	0.0029520,	1.00,	6.99,	0.0063595
41,	QXV2EFW21K,	5.652e-04,	6.35327e-03,	1.05887e-03,	0.0028181,	1.00,	5.98,	0.0052944
42,	QXV2EFW20K,	5.652e-04,	6.35327e-03,	1.05887e-03,	0.0028181,	1.00,	5.98,	0.0052944
43,	QXV2EFW3AK,	5.652e-04,	6.35327e-03,	1.05887e-03,	0.0028181,	1.00,	5.98,	0.0052944
44,	QCV2EFW4AN,	4.929e-04,	6.35327e-03,	1.05925e-03,	0.0024574,	1.00,	5.98,	0.0052940
45,	QXV2EF789K,	6.215e-04,	4.81925e-03,	1.05952e-03,	0.0022005,	1.00,	4.54,	0.0037597
46,	%T11,	3.940e-04,	6.95962e-03,	1.05953e-03,	0.0021892,	1.00,	6.55,	0.0059001
47,	QXV2CV706R,	3.109e-04,	7.41823e-03,	1.05988e-03,	0.0018617,	1.00,	6.99,	0.0063583
48,	QCV2EFW2BN,	4.929e-04,	4.81925e-03,	1.06001e-03,	0.0017450,	1.00,	4.54,	0.0037592
49,	STF2SCRNSP,	9.768e-05,	1.99384e-02,	1.06002e-03,	0.0017366,	1.00,	18.78,	0.0188784
50,	EMC27100XN,	7.190e-03,	1.29863e-03,	1.06014e-03,	0.0016148,	1.00,	1.22,	0.0002385
51,	ERE2A3LXXK,	9.456e-06,	1.63887e-01,	1.06032e-03,	0.0014500,	1.00,	154.34,	0.1628270
52,	FAV2CV748C,	2.110e-02,	1.13056e-03,	1.06038e-03,	0.0013945,	1.00,	1.06,	0.0000702
53,	FAV2CV753C,	2.110e-02,	1.13056e-03,	1.06038e-03,	0.0013945,	1.00,	1.06,	0.0000702
54,	FAV2CV740C,	2.110e-02,	1.13056e-03,	1.06038e-03,	0.0013945,	1.00,	1.06,	0.0000702
55,	FAV2CV744C,	2.110e-02,	1.13056e-03,	1.06038e-03,	0.0013945,	1.00,	1.06,	0.0000702
56,	EDG2DG1XXA,	3.070e-03,	1.49908e-03,	1.06051e-03,	0.0012680,	1.00,	1.41,	0.0004386
57,	%T7,	1.000e-03,	2.40300e-03,	1.06052e-03,	0.0012643,	1.00,	2.26,	0.0013425
58,	T7REC,	7.100e-02,	1.07942e-03,	1.06052e-03,	0.0012643,	1.00,	1.02,	0.0000189
59,	QCB2B53D2R,	3.352e-04,	4.81925e-03,	1.06060e-03,	0.0011865,	1.00,	4.54,	0.0037587
60,	QCB2B53D1R,	3.352e-04,	4.81925e-03,	1.06060e-03,	0.0011865,	1.00,	4.54,	0.0037587
61,	%T9,	3.160e-02,	1.09614e-03,	1.06074e-03,	0.0010534,	1.00,	1.03,	0.0000354
62,	T9PREREC,	5.600e-02,	1.08072e-03,	1.06074e-03,	0.0010534,	1.00,	1.02,	0.0000200
63,	SMV215042N,	9.230e-03,	1.17869e-03,	1.06077e-03,	0.0010250,	1.00,	1.11,	0.0001179
64,	EMP2P16AXA,	2.320e-03,	1.49908e-03,	1.06084e-03,	0.0009575,	1.00,	1.41,	0.0004382
65,	ECB2A309XD,	6.450e-04,	2.47960e-03,	1.06094e-03,	0.0008617,	1.00,	2.34,	0.0014187
66,	ECB2A308XD,	6.450e-04,	2.47960e-03,	1.06094e-03,	0.0008617,	1.00,	2.34,	0.0014187
67,	ECB2A112XD,	6.450e-04,	2.43171e-03,	1.06097e-03,	0.0008326,	1.00,	2.29,	0.0013707
68,	QTK2CT41AJ,	1.325e-04,	7.41823e-03,	1.06102e-03,	0.0007933,	1.00,	6.99,	0.0063572

Rezultati vrednovanja - BDD pristup

69,	EDG2DGAACA,	3.070e-03,	1.29863e-03,	1.06113e-03,	0.0006866,	1.00,	1.22,	0.0002375
70,	QCD2D26B1R,	1.368e-04,	6.35327e-03,	1.06114e-03,	0.0006818,	1.00,	5.98,	0.0052921
71,	PMV2CV340K,	1.277e-04,	6.35327e-03,	1.06118e-03,	0.0006364,	1.00,	5.98,	0.0052921
72,	ESV228021N,	1.310e-03,	1.49908e-03,	1.06129e-03,	0.0005401,	1.00,	1.41,	0.0004378
73,	SWREC,	2.100e-02,	1.08826e-03,	1.06129e-03,	0.0005334,	1.00,	1.02,	0.0000270
74,	QMV2CV795K,	1.915e-03,	1.35117e-03,	1.06130e-03,	0.0005228,	1.00,	1.27,	0.0002899
75,	%T8,	3.160e-02,	1.07826e-03,	1.06132e-03,	0.0005041,	1.00,	1.02,	0.0000169
76,	T8PREREC,	1.400e-01,	1.06515e-03,	1.06132e-03,	0.0005041,	1.00,	1.00,	0.0000038
77,	DCD200221R,	9.120e-05,	6.35327e-03,	1.06138e-03,	0.0004545,	1.00,	5.98,	0.0052919
78,	QMV200716K,	1.277e-04,	4.81925e-03,	1.06138e-03,	0.0004519,	1.00,	4.54,	0.0037579
79,	QCV2EFW01K,	7.344e-05,	7.41823e-03,	1.06139e-03,	0.0004396,	1.00,	6.99,	0.0063568
80,	QCV200801K,	7.344e-05,	7.41823e-03,	1.06139e-03,	0.0004396,	1.00,	6.99,	0.0063568
81,	QCV2EFW16K,	7.344e-05,	7.41823e-03,	1.06139e-03,	0.0004396,	1.00,	6.99,	0.0063568
82,	QSV2SV317K,	8.760e-05,	6.35327e-03,	1.06140e-03,	0.0004366,	1.00,	5.98,	0.0052919
83,	SMP2-2P4CF,	6.430e-04,	1.69030e-03,	1.06145e-03,	0.0003808,	1.00,	1.59,	0.0006288
84,	SST2-2F6CP,	6.382e-04,	1.69030e-03,	1.06146e-03,	0.0003779,	1.00,	1.59,	0.0006288
85,	ELS228011H,	9.143e-04,	1.49908e-03,	1.06146e-03,	0.0003768,	1.00,	1.41,	0.0004376
86,	ELS228041H,	9.143e-04,	1.49908e-03,	1.06146e-03,	0.0003768,	1.00,	1.41,	0.0004376
87,	QCV2EFW4AK,	7.344e-05,	6.35327e-03,	1.06147e-03,	0.0003660,	1.00,	5.98,	0.0052918
88,	QMM2CCF003,	7.064e-04,	1.58081e-03,	1.06149e-03,	0.0003455,	1.00,	1.49,	0.0005193
89,	EDG2DG2XXA,	3.070e-03,	1.17869e-03,	1.06150e-03,	0.0003388,	1.00,	1.11,	0.0001172
90,	EMM2CCFFXA,	2.320e-04,	2.51487e-03,	1.06152e-03,	0.0003175,	1.00,	2.37,	0.0014533
91,	QXV2EF795K,	6.215e-04,	1.58081e-03,	1.06154e-03,	0.0003039,	1.00,	1.49,	0.0005193
92,	ERECB5/B6,	2.600e-01,	1.06276e-03,	1.06154e-03,	0.0002978,	1.00,	1.00,	0.0000012
93,	SMP2-2P4CA,	2.320e-03,	1.19594e-03,	1.06155e-03,	0.0002936,	1.00,	1.13,	0.0001344
94,	ESV27150XN,	1.310e-03,	1.29863e-03,	1.06155e-03,	0.0002925,	1.00,	1.22,	0.0002371
95,	ESV27245XN,	1.310e-03,	1.29863e-03,	1.06155e-03,	0.0002925,	1.00,	1.22,	0.0002371
96,	ESV27162XN,	1.310e-03,	1.29863e-03,	1.06155e-03,	0.0002925,	1.00,	1.22,	0.0002371
97,	EMP2P16AXF,	6.430e-04,	1.49882e-03,	1.06158e-03,	0.0002648,	1.00,	1.41,	0.0004372
98,	QCV2EFW2BK,	7.344e-05,	4.81925e-03,	1.06158e-03,	0.0002599,	1.00,	4.54,	0.0037577
99,	EXV24AXXXX,	6.215e-04,	1.49908e-03,	1.06159e-03,	0.0002561,	1.00,	1.41,	0.0004375
100,	EXV22AXXXX,	6.215e-04,	1.49908e-03,	1.06159e-03,	0.0002561,	1.00,	1.41,	0.0004375

Finished Importance analysis computation in : 160.78 sec.

Average probability computation : 116 ms.

Final Cut Sets

#MCS#	p(MCS)	F.V.	Acc.	Events...
1,	3.323e-04,	0.3000,	0.3000,	QMP202P7BA QTP202P7AF
2,	9.221e-05,	0.0832,	0.3832,	QMP202P7BF QTP202P7AF
3,	8.105e-05,	0.0732,	0.4564,	QXV2EFW3BK QTP202P7AF
4,	7.068e-05,	0.0638,	0.5202,	QCV2EFW4BN QTP202P7AF
5,	5.650e-05,	0.0510,	0.5712,	%T10 QTP202P7AF
6,	5.650e-05,	0.0510,	0.6222,	%T12 QTP202P7AF
7,	4.807e-05,	0.0434,	0.6656,	QCB20A311R QTP202P7AF
8,	2.129e-05,	0.0192,	0.6848,	QMP202P7BA PMV2CV340N
9,	1.750e-05,	0.0158,	0.7006,	QHF2REFILL SXV2SW39AK QTP202P7AF
10,	1.678e-05,	0.0152,	0.7158,	QMP202P7BA QTP202P7AA
11,	1.596e-05,	0.0144,	0.7302,	EDG2DG1XXF %T3 ERECA3/A4 EDGOPER1 QTP202P7AF
12,	1.581e-05,	0.0143,	0.7444,	QHF2REFILL QMV200789C QTP202P7AF
13,	1.581e-05,	0.0143,	0.7587,	QHF2REFILL QMV200716N QTP202P7AF
14,	1.308e-05,	0.0118,	0.7705,	DCD22304XR QTP202P7AF
15,	1.213e-05,	0.0110,	0.7815,	EDG2DG1XXF %T3 ERECA3/A4 EDG2DGAACF QTP202P7AF
16,	1.053e-05,	0.0095,	0.7910,	QCV2EFW4BK QTP202P7AF

17, 5.908e-06, 0.0053, 0.7963, QMP202P7BF PMV2CV340N
18, 5.674e-06, 0.0051, 0.8014, EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF EDGOPER1 QTP202P7AF
19, 5.575e-06, 0.0050, 0.8065, QMV200789K SXV2SW39AK QTP202P7AF
20, 5.193e-06, 0.0047, 0.8112, QXV2EFW3BK PMV2CV340N
21, 5.037e-06, 0.0045, 0.8157, QMV200789K QMV200716N QTP202P7AF
22, 5.037e-06, 0.0045, 0.8203, QMV200789K QMV200789C QTP202P7AF
23, 4.658e-06, 0.0042, 0.8245, QMP202P7BF QTP202P7AA
24, 4.529e-06, 0.0041, 0.8286, QCV2EFW4BN PMV2CV340N
25, 4.314e-06, 0.0039, 0.8324, EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF EDG2DGAACF QTP202P7AF
26, 4.094e-06, 0.0037, 0.8361, QXV2EFW3BK QTP202P7AA
27, 3.620e-06, 0.0033, 0.8394, %T10 PMV2CV340N
28, 3.620e-06, 0.0033, 0.8427, %T12 PMV2CV340N
29, 3.571e-06, 0.0032, 0.8459, QCV2EFW4BN QTP202P7AA
30, 3.080e-06, 0.0028, 0.8487, QCB20A311R PMV2CV340N
31, 3.034e-06, 0.0027, 0.8514, %T3 EMM2CCFDGF EDGOPER1 QTP202P7AF
32, 3.033e-06, 0.0027, 0.8542, QMP202P7BA PSV2SV205N
33, 3.033e-06, 0.0027, 0.8569, QMP202P7BA QSV2SV317N
34, 2.854e-06, 0.0026, 0.8595, %T10 QTP202P7AA
35, 2.854e-06, 0.0026, 0.8621, %T12 QTP202P7AA
36, 2.793e-06, 0.0025, 0.8646, QMV2CV707K SXV2SW39AK QTP202P7AF
37, 2.523e-06, 0.0023, 0.8669, QMV2CV707K QMV200789C QTP202P7AF
38, 2.523e-06, 0.0023, 0.8691, QMV2CV707K QMV200716N QTP202P7AF
39, 2.428e-06, 0.0022, 0.8713, QCB20A311R QTP202P7AA
40, 2.307e-06, 0.0021, 0.8734, %T3 EMM2CCFDGF EDG2DGAACF QTP202P7AF
41, 1.790e-06, 0.0016, 0.8750, QHF2REFILL %T14 QTP202P7AF
42, 1.576e-06, 0.0014, 0.8764, SMV215031N %T3 ERECA3/A4 EDGOPER1 QTP202P7AF
43, 1.356e-06, 0.0012, 0.8777, ERE2A3LXXK QTP202P7AF
44, 1.310e-06, 0.0012, 0.8788, QMP202P7BA QXV2EFW3AK
45, 1.310e-06, 0.0012, 0.8800, QMP202P7BA QXV2EFW20K
46, 1.310e-06, 0.0012, 0.8812, QMP202P7BA QXV2EFW21K
47, 1.241e-06, 0.0011, 0.8823, SXV2SW39BK QHF2REFILL SXV2SW39AK
48, 1.198e-06, 0.0011, 0.8834, SMV215031N %T3 ERECA3/A4 EDG2DGAACF QTP202P7AF
49, 1.172e-06, 0.0011, 0.8845, QHF2REFILL STF2SCRNSP
50, 1.142e-06, 0.0010, 0.8855, QMP202P7BA QCV2EFW4AN
51, 1.121e-06, 0.0010, 0.8865, QHF2REFILL SXV2SW39AK PMV2CV340N
52, 1.121e-06, 0.0010, 0.8875, SXV2SW39BK QHF2REFILL QMV200716N
53, 1.121e-06, 0.0010, 0.8885, SXV2SW39BK QHF2REFILL QMV200789C
54, 1.121e-06, 0.0010, 0.8896, QMV200711N QHF2REFILL SXV2SW39AK
55, 1.121e-06, 0.0010, 0.8906, QMV200795C QHF2REFILL SXV2SW39AK
56, 1.069e-06, 0.0010, 0.8915, QHF2REFILL QXV2EF789K QTP202P7AF
57, 1.023e-06, 0.0009, 0.8925, EDG2DG1XXF %T3 ERECA3/A4 EDGOPER1 PMV2CV340N
58, 1.013e-06, 0.0009, 0.8934, QHF2REFILL QMV200789C PMV2CV340N
59, 1.013e-06, 0.0009, 0.8943, QHF2REFILL QMV200716N PMV2CV340N
60, 1.013e-06, 0.0009, 0.8952, QMV200711N QHF2REFILL QMV200716N
61, 1.013e-06, 0.0009, 0.8961, QMV200795C QHF2REFILL QMV200716N
62, 1.013e-06, 0.0009, 0.8970, QMV200711N QHF2REFILL QMV200789C
63, 1.013e-06, 0.0009, 0.8979, QMV200795C QHF2REFILL QMV200789C
64, 9.330e-07, 0.0008, 0.8988, EDG2DG1XXF %T3 ERECA3/A4 EMC27100XN QTP202P7AF
65, 9.129e-07, 0.0008, 0.8996, %T11 QMP202P7BA
66, 8.841e-07, 0.0008, 0.9004, QHF2REFILL SXV2SW39AK QTP202P7AA
67, 8.520e-07, 0.0008, 0.9012, QHF2REFILL T7REC %T7
68, 8.482e-07, 0.0008, 0.9019, QHF2REFILL QCV2EFW2BN QTP202P7AF
69, 8.417e-07, 0.0008, 0.9027, QMP202P7BF PSV2SV205N
70, 8.417e-07, 0.0008, 0.9035, QMP202P7BF QSV2SV317N
71, 8.379e-07, 0.0008, 0.9042, DCD22304XR PMV2CV340N
72, 8.243e-07, 0.0007, 0.9050, QXV2CT005K SXV2SW39AK QTP202P7AF

Final CS from MCS set selection in : 1.86 sec.

B5 HPSI

Fault Tree after compaction...

Number of gates : 623
 Number of events : 674
 Number of edges : 2183
 Top gate name : G2186

TOP event BDD nodes : 30540
 TOP event cutset set size : 5.212877e+44
 TOP event BDD build (sec) : 5.75
 MCS set BDD nodes : 28114
 MCS set size : 371554422700
 MCS set BDD build (sec) : 0.14

Total time to finish computations (sec) : 6.15

size	mcs_counters
1 :	3
2 :	2015
3 :	27583
4 :	793161
5 :	43164536
6 :	551820807
7 :	3276615606
8 :	11728520408
9 :	27549408350
10 :	44708731558
11+:	283695338673

Total : 371554422700

RELIABILITY PARAMETERS

=====

TOP probability from CSs: 8.901640e-04
 MCSs upper bound : 9.212913e-04
 Rare event upper bound : 9.217017e-04

Event Importance Information

Pos	Variable (BE)	Prob.	QTOP(BE=1)	QTOP(BE=0)	FV.	RRW.	RAW.	PD.
1,	YMV256491N,	9.188e-03,	2.63719e-02,	6.53866e-04,	0.2654539,	1.36,	29.63,	0.0257181
2,	YMV256502N,	9.188e-03,	2.25347e-02,	6.89449e-04,	0.2254805,	1.29,	25.32,	0.0218453
3,	%T3,	3.680e-02,	5.35866e-03,	7.19441e-04,	0.1917887,	1.24,	6.02,	0.0046392
4,	STF2SCRNSP,	9.768e-05,	1.00000e+00,	7.92561e-04,	0.1096456,	1.12,	1123.39,	0.9992074
5,	EDG2DG1XXF,	9.350e-02,	1.79192e-03,	7.97154e-04,	0.1044868,	1.12,	2.01,	0.0009948
6,	EDG2DG2XXF,	9.350e-02,	1.75077e-03,	8.01398e-04,	0.0997188,	1.11,	1.97,	0.0009494
7,	SFL2P4BIS,	1.000e+00,	8.90164e-04,	8.05827e-04,	0.0947435,	1.10,	1.00,	0.0000843
8,	EDGOPER1,	1.230e-01,	1.48184e-03,	8.07181e-04,	0.0932220,	1.10,	1.66,	0.0006747
9,	%T7,	1.000e-03,	7.17611e-02,	8.19222e-04,	0.0796952,	1.09,	80.62,	0.0709418
10,	T7REC,	7.100e-02,	1.81840e-03,	8.19222e-04,	0.0796952,	1.09,	2.04,	0.0009992
11,	EDG2DGAACF,	9.350e-02,	1.48184e-03,	8.29136e-04,	0.0685578,	1.07,	1.66,	0.0006527
12,	HHF22P89AX,	3.000e-03,	1.76080e-02,	8.39859e-04,	0.0565115,	1.06,	19.78,	0.0167682

Rezultati vrednovanja - BDD pristup

13,	%T15,	1.040e-03,	4.15348e-02,	8.47850e-04,	0.0475355,	1.05,	46.66,	0.0406869
14,	HHF22P89BX,	3.000e-03,	1.43593e-02,	8.49635e-04,	0.0455297,	1.05,	16.13,	0.0135096
15,	%T9,	3.160e-02,	2.09770e-03,	8.50761e-04,	0.0442654,	1.05,	2.36,	0.0012469
16,	T9PREREC,	5.600e-02,	1.55439e-03,	8.50761e-04,	0.0442654,	1.05,	1.75,	0.0007036
17,	HMP22P89AA,	2.320e-03,	1.76080e-02,	8.51288e-04,	0.0436724,	1.05,	19.78,	0.0167567
18,	EMM2CCFDGF,	4.675e-03,	8.80488e-03,	8.52989e-04,	0.0417621,	1.04,	9.89,	0.0079519
19,	%T14,	1.040e-03,	3.62730e-02,	8.53328e-04,	0.0413816,	1.04,	40.75,	0.0354197
20,	HMP22P89BA,	2.320e-03,	1.43593e-02,	8.58843e-04,	0.0351856,	1.04,	16.13,	0.0135004
21,	YMV256282C,	9.188e-03,	3.30215e-03,	8.67797e-04,	0.0251267,	1.03,	3.71,	0.0024344
22,	YMV256731C,	9.188e-03,	2.67375e-03,	8.73624e-04,	0.0185803,	1.02,	3.00,	0.0018001
23,	HMV251261C,	9.230e-03,	2.50652e-03,	8.75106e-04,	0.0169159,	1.02,	2.82,	0.0016314
24,	SMP2-2P4CF,	6.430e-04,	2.31176e-02,	8.75863e-04,	0.0160661,	1.02,	25.97,	0.0222418
25,	SST2-2F6CP,	6.382e-04,	2.31176e-02,	8.75969e-04,	0.0159461,	1.02,	25.97,	0.0222416
26,	HCV2SI-7AN,	4.930e-04,	2.63719e-02,	8.77595e-04,	0.0141195,	1.01,	29.63,	0.0254943
27,	YCV2BS-1AN,	4.929e-04,	2.63719e-02,	8.77598e-04,	0.0141167,	1.01,	29.63,	0.0254943
28,	%T10,	3.940e-04,	2.93997e-02,	8.78927e-04,	0.0126237,	1.01,	33.03,	0.0285208
29,	%T12,	3.940e-04,	2.93954e-02,	8.78928e-04,	0.0126218,	1.01,	33.02,	0.0285165
30,	HCB252306D,	6.450e-04,	1.76080e-02,	8.79374e-04,	0.0121213,	1.01,	19.78,	0.0167286
31,	HMP22P89AF,	6.432e-04,	1.76080e-02,	8.79404e-04,	0.0120875,	1.01,	19.78,	0.0167286
32,	HCV2SI-7BN,	4.930e-04,	2.25347e-02,	8.79488e-04,	0.0119933,	1.01,	25.32,	0.0216553
33,	YCV2BS-1BN,	4.929e-04,	2.25347e-02,	8.79490e-04,	0.0119909,	1.01,	25.32,	0.0216553
34,	%T11,	3.940e-04,	2.79296e-02,	8.79506e-04,	0.0119728,	1.01,	31.38,	0.0270501
35,	%T13,	3.940e-04,	2.79296e-02,	8.79506e-04,	0.0119728,	1.01,	31.38,	0.0270501
36,	SXV2SW128K,	6.215e-04,	1.76080e-02,	8.79767e-04,	0.0116794,	1.01,	19.78,	0.0167283
37,	EREC A3/A4,	2.630e-01,	9.18587e-04,	8.80021e-04,	0.0113943,	1.01,	1.03,	0.0000386
38,	HXV2SI-8AK,	5.652e-04,	1.76080e-02,	8.80710e-04,	0.0106208,	1.01,	19.78,	0.0167273
39,	YCB2052G3R,	3.686e-04,	2.63719e-02,	8.80768e-04,	0.0105554,	1.01,	29.63,	0.0254912
40,	HCB252406D,	6.450e-04,	1.43593e-02,	8.81471e-04,	0.0097658,	1.01,	16.13,	0.0134778
41,	HMP22P89BF,	6.432e-04,	1.43593e-02,	8.81495e-04,	0.0097385,	1.01,	16.13,	0.0134778
42,	SMV215031N,	9.230e-03,	1.79192e-03,	8.81763e-04,	0.0094373,	1.01,	2.01,	0.0009102
43,	SXV2SW129K,	6.215e-04,	1.43593e-02,	8.81788e-04,	0.0094098,	1.01,	16.13,	0.0134775
44,	SXV2SW131K,	6.215e-04,	1.43593e-02,	8.81788e-04,	0.0094098,	1.01,	16.13,	0.0134775
45,	ALT256404D,	1.408e-02,	1.46778e-03,	8.81915e-04,	0.0092669,	1.01,	1.65,	0.0005859
46,	ALT256393D,	1.408e-02,	1.46778e-03,	8.81915e-04,	0.0092669,	1.01,	1.65,	0.0005859
47,	ALT256361D,	1.408e-02,	1.46778e-03,	8.81915e-04,	0.0092669,	1.01,	1.65,	0.0005859
48,	ALT256372D,	1.408e-02,	1.46778e-03,	8.81915e-04,	0.0092669,	1.01,	1.65,	0.0005859
49,	HCV2SI10AN,	4.930e-04,	1.76080e-02,	8.81918e-04,	0.0092634,	1.01,	19.78,	0.0167261
50,	SMV215042N,	9.230e-03,	1.75077e-03,	8.82147e-04,	0.0090066,	1.01,	1.97,	0.0008686
51,	YCB2062G3R,	3.686e-04,	2.25347e-02,	8.82183e-04,	0.0089659,	1.01,	25.32,	0.0216526
52,	EREC B5/B6,	2.600e-01,	9.12169e-04,	8.82432e-04,	0.0086856,	1.01,	1.02,	0.0000297
53,	HXV2SI-8BK,	5.652e-04,	1.43593e-02,	8.82547e-04,	0.0085569,	1.01,	16.13,	0.0134767
54,	HCV2SI10BN,	4.930e-04,	1.43593e-02,	8.83520e-04,	0.0074633,	1.01,	16.13,	0.0134757
55,	YTK2RW2T3J,	5.520e-06,	1.00000e+00,	8.84649e-04,	0.0061956,	1.01,	1123.39,	0.9991154
56,	EMC27100XN,	7.190e-03,	1.48184e-03,	8.85879e-04,	0.0048137,	1.00,	1.66,	0.0005960
57,	AHFCALRASL,	4.200e-06,	1.00000e+00,	8.85968e-04,	0.0047141,	1.00,	1123.39,	0.9991140
58,	SWREC,	2.100e-02,	1.06538e-03,	8.86405e-04,	0.0042223,	1.00,	1.20,	0.0001790
59,	SMP2-2P4CA,	2.320e-03,	2.46444e-03,	8.86503e-04,	0.0041125,	1.00,	2.77,	0.0015779
60,	YMV256721C,	9.188e-03,	1.25872e-03,	8.86746e-04,	0.0038394,	1.00,	1.41,	0.0003720
61,	%T8,	3.160e-02,	9.92539e-04,	8.86823e-04,	0.0037528,	1.00,	1.12,	0.0001057
62,	T8PREREC,	1.400e-01,	9.10685e-04,	8.86823e-04,	0.0037528,	1.00,	1.02,	0.0000239
63,	YMV256471K,	1.277e-04,	2.63719e-02,	8.86910e-04,	0.0036560,	1.00,	29.63,	0.0254850
64,	YMV256491K,	1.277e-04,	2.63719e-02,	8.86910e-04,	0.0036560,	1.00,	29.63,	0.0254850
65,	SMV214001K,	1.277e-04,	2.63719e-02,	8.86910e-04,	0.0036560,	1.00,	29.63,	0.0254850
66,	SMV214742K,	1.277e-04,	2.31176e-02,	8.87325e-04,	0.0031891,	1.00,	25.97,	0.0222303
67,	EDG2DG1XXA,	3.070e-03,	1.79192e-03,	8.87387e-04,	0.0031195,	1.00,	2.01,	0.0009045
68,	SMV214062K,	1.277e-04,	2.25347e-02,	8.87400e-04,	0.0031055,	1.00,	25.32,	0.0216473

Rezultati vrednovanja - BDD pristup

69,	YMV256502K,	1.277e-04,	2.25347e-02,	8.87400e-04,	0.0031055,	1.00,	25.32,	0.0216473
70,	YMV256482K,	1.277e-04,	2.25347e-02,	8.87400e-04,	0.0031055,	1.00,	25.32,	0.0216473
71,	ARE2K104AB,	7.650e-05,	3.57044e-02,	8.87500e-04,	0.0029921,	1.00,	40.11,	0.0348169
72,	EDG2DG2XXA,	3.070e-03,	1.75077e-03,	8.87514e-04,	0.0029772,	1.00,	1.97,	0.0008633
73,	ET12X26XXF,	6.048e-05,	4.15348e-02,	8.87706e-04,	0.0027617,	1.00,	46.66,	0.0406471
74,	DCD22304XR,	9.120e-05,	2.69819e-02,	8.87784e-04,	0.0026734,	1.00,	30.31,	0.0260941
75,	ET12X25XXF,	6.048e-05,	3.62730e-02,	8.88024e-04,	0.0024041,	1.00,	40.75,	0.0353850
76,	EMP2P16AXA,	2.320e-03,	1.79192e-03,	8.88067e-04,	0.0023557,	1.00,	2.01,	0.0009039
77,	DCD22404XR,	9.120e-05,	2.32996e-02,	8.88120e-04,	0.0022961,	1.00,	26.17,	0.0224115
78,	EMP2P16BXA,	2.320e-03,	1.75077e-03,	8.88163e-04,	0.0022482,	1.00,	1.97,	0.0008626
79,	HMV251281C,	9.230e-03,	1.09704e-03,	8.88237e-04,	0.0021650,	1.00,	1.23,	0.0002088
80,	YCV2BS-1AK,	7.344e-05,	2.63719e-02,	8.88292e-04,	0.0021024,	1.00,	29.63,	0.0254836
81,	SCV2SW12AK,	7.344e-05,	2.63719e-02,	8.88292e-04,	0.0021024,	1.00,	29.63,	0.0254836
82,	HCV2SI-7AK,	7.344e-05,	2.63719e-02,	8.88292e-04,	0.0021024,	1.00,	29.63,	0.0254836
83,	EMM2CCFFXA,	2.320e-04,	8.80488e-03,	8.88327e-04,	0.0020633,	1.00,	9.89,	0.0079166
84,	EDG2DGAACA,	3.070e-03,	1.48184e-03,	8.88342e-04,	0.0020469,	1.00,	1.66,	0.0005935
85,	ARE2K104BB,	7.650e-05,	2.25347e-02,	8.88508e-04,	0.0018603,	1.00,	25.32,	0.0216462
86,	SCV22SW2CK,	7.344e-05,	2.31176e-02,	8.88531e-04,	0.0018339,	1.00,	25.97,	0.0222291
87,	HCV2SI-7BK,	7.344e-05,	2.25347e-02,	8.88574e-04,	0.0017858,	1.00,	25.32,	0.0216462
88,	SCV2SW12BK,	7.344e-05,	2.25347e-02,	8.88574e-04,	0.0017858,	1.00,	25.32,	0.0216462
89,	YCV2BS-1BK,	7.344e-05,	2.25347e-02,	8.88574e-04,	0.0017858,	1.00,	25.32,	0.0216462
90,	ARE2K110AB,	7.650e-05,	1.76080e-02,	8.88885e-04,	0.0014368,	1.00,	19.78,	0.0167191
91,	HCV2SI10AK,	7.344e-05,	1.76080e-02,	8.88936e-04,	0.0013794,	1.00,	19.78,	0.0167191
92,	EMM2CCFDGA,	1.535e-04,	8.80488e-03,	8.88949e-04,	0.0013650,	1.00,	9.89,	0.0079159
93,	ESV228021N,	1.310e-03,	1.79192e-03,	8.88981e-04,	0.0013288,	1.00,	2.01,	0.0009029
94,	ECB2A408XD,	6.450e-04,	2.64940e-03,	8.89029e-04,	0.0012755,	1.00,	2.98,	0.0017604
95,	ECB2A409XD,	6.450e-04,	2.64940e-03,	8.89029e-04,	0.0012755,	1.00,	2.98,	0.0017604
96,	ESV228222N,	1.310e-03,	1.75077e-03,	8.89035e-04,	0.0012682,	1.00,	1.97,	0.0008617
97,	ARE2K102BB,	7.650e-05,	1.43593e-02,	8.89133e-04,	0.0011576,	1.00,	16.13,	0.0134701
98,	SCB22A402D,	6.450e-04,	2.46444e-03,	8.89148e-04,	0.0011414,	1.00,	2.77,	0.0015753
99,	HCV2SI10BK,	7.344e-05,	1.43593e-02,	8.89175e-04,	0.0011113,	1.00,	16.13,	0.0134701
100,	SMM2CCFMDP,	1.929e-05,	5.13346e-02,	8.89191e-04,	0.0010932,	1.00,	57.67,	0.0504454

Finished Importance analysis computation in : 95.30 sec.

Average probability computation : 70 ms.

Final Cut Sets

#MCS#	p(MCS)	F.V.	Acc.	Events...
1,	9.768e-05,	0.1060,	0.1060,	STF2SCRNSP
2,	8.442e-05,	0.0916,	0.1976,	YMV256491N YMV256502N
3,	7.100e-05,	0.0770,	0.2746,	%T7 T7REC
4,	3.957e-05,	0.0429,	0.3175,	EDGOPER1 EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF
5,	3.008e-05,	0.0326,	0.3502,	EDG2DGAACF EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF
6,	2.756e-05,	0.0299,	0.3801,	YMV256491N HHF22P89BX
7,	2.756e-05,	0.0299,	0.4100,	YMV256502N HHF22P89AX
8,	2.132e-05,	0.0231,	0.4331,	YMV256491N HMP22P89BA
9,	2.132e-05,	0.0231,	0.4562,	YMV256502N HMP22P89AA
10,	2.116e-05,	0.0230,	0.4792,	EDGOPER1 %T3 EMM2CCFDGF
11,	1.626e-05,	0.0176,	0.4968,	%T9 T9PREREC SFL2P4BIS YMV256491N
12,	1.609e-05,	0.0175,	0.5143,	EDG2DGAACF %T3 EMM2CCFDGF
13,	9.599e-06,	0.0104,	0.5247,	%T15 HMV251261C
14,	9.556e-06,	0.0104,	0.5351,	%T14 YMV256282C
15,	9.556e-06,	0.0104,	0.5454,	%T14 YMV256502N
16,	9.556e-06,	0.0104,	0.5558,	%T15 YMV256731C

17, 9.556e-06, 0.0104, 0.5662, %T15 YMV256491N
 18, 5.926e-06, 0.0064, 0.5726, YMV256491N HCB252406D
 19, 5.926e-06, 0.0064, 0.5790, YMV256502N HCB252306D
 20, 5.910e-06, 0.0064, 0.5854, YMV256491N HMP22P89BF
 21, 5.910e-06, 0.0064, 0.5919, YMV256502N HMP22P89AF
 22, 5.908e-06, 0.0064, 0.5983, SMP2-2P4CF SFL2P4BIS YMV256491N
 23, 5.864e-06, 0.0064, 0.6046, SST2-2F6CP SFL2P4BIS YMV256491N
 24, 5.710e-06, 0.0062, 0.6108, YMV256491N SXV2SW131K
 25, 5.710e-06, 0.0062, 0.6170, YMV256491N SXV2SW129K
 26, 5.710e-06, 0.0062, 0.6232, YMV256502N SXV2SW128K
 27, 5.520e-06, 0.0060, 0.6292, YTK2RW2T3J
 28, 5.309e-06, 0.0058, 0.6350, %T9 T9PREREC SFL2P4BIS HHF22P89AX
 29, 5.193e-06, 0.0056, 0.6406, YMV256491N HXV2SI-8BK
 30, 5.193e-06, 0.0056, 0.6462, YMV256502N HXV2SI-8AK
 31, 4.530e-06, 0.0049, 0.6511, HCV2SI-7AN YMV256502N
 32, 4.530e-06, 0.0049, 0.6561, YMV256491N HCV2SI10BN
 33, 4.530e-06, 0.0049, 0.6610, YMV256491N HCV2SI-7BN
 34, 4.530e-06, 0.0049, 0.6659, YMV256502N HCV2SI10AN
 35, 4.529e-06, 0.0049, 0.6708, YCV2BS-1AN YMV256502N
 36, 4.529e-06, 0.0049, 0.6757, YMV256491N YCV2BS-1BN
 37, 4.200e-06, 0.0046, 0.6803, AHFCALRASL
 38, 4.105e-06, 0.0045, 0.6847, %T9 T9PREREC SFL2P4BIS HMP22P89AA
 39, 3.906e-06, 0.0042, 0.6890, EDGOPER1 SMV215031N %T3 EDG2DG2XXF
 40, 3.906e-06, 0.0042, 0.6932, EDGOPER1 EDG2DG1XXF %T3 SMV215042N
 41, 3.620e-06, 0.0039, 0.6971, %T12 YMV256502N
 42, 3.620e-06, 0.0039, 0.7011, %T13 YMV256491N
 43, 3.620e-06, 0.0039, 0.7050, %T10 YMV256502N
 44, 3.620e-06, 0.0039, 0.7089, %T11 YMV256491N
 45, 3.387e-06, 0.0037, 0.7126, YCB2052G3R YMV256502N
 46, 3.387e-06, 0.0037, 0.7163, YMV256491N YCB2062G3R
 47, 3.120e-06, 0.0034, 0.7196, %T14 HHF22P89BX
 48, 3.120e-06, 0.0034, 0.7230, %T15 HHF22P89AX
 49, 2.969e-06, 0.0032, 0.7262, EDG2DGAACF EDG2DG1XXF %T3 SMV215042N
 50, 2.969e-06, 0.0032, 0.7295, EDG2DGAACF SMV215031N %T3 EDG2DG2XXF
 51, 2.791e-06, 0.0030, 0.7325, ALT256404D ALT256393D ALT256372D
 52, 2.791e-06, 0.0030, 0.7355, ALT256404D ALT256393D ALT256361D
 53, 2.791e-06, 0.0030, 0.7386, ALT256404D ALT256372D ALT256361D
 54, 2.791e-06, 0.0030, 0.7416, ALT256393D ALT256372D ALT256361D
 55, 2.413e-06, 0.0026, 0.7442, %T14 HMP22P89BA
 56, 2.413e-06, 0.0026, 0.7468, %T15 HMP22P89AA
 57, 2.313e-06, 0.0025, 0.7493, EMC27100XN EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXF
 58, 1.929e-06, 0.0021, 0.7514, SMP2-2P4CF SFL2P4BIS HHF22P89AX
 59, 1.915e-06, 0.0021, 0.7535, SST2-2F6CP SFL2P4BIS HHF22P89AX
 60, 1.840e-06, 0.0020, 0.7555, %T14 %T9 T9PREREC SFL2P4BIS
 61, 1.492e-06, 0.0016, 0.7571, SMP2-2P4CF SFL2P4BIS HMP22P89AA
 62, 1.481e-06, 0.0016, 0.7587, SST2-2F6CP SFL2P4BIS HMP22P89AA
 63, 1.479e-06, 0.0016, 0.7603, HCV2SI-7AN HHF22P89BX
 64, 1.479e-06, 0.0016, 0.7619, HCV2SI-7BN HHF22P89AX
 65, 1.479e-06, 0.0016, 0.7635, YCV2BS-1AN HHF22P89BX
 66, 1.479e-06, 0.0016, 0.7651, YCV2BS-1BN HHF22P89AX
 67, 1.299e-06, 0.0014, 0.7665, EDGOPER1 EDG2DG1XXF %T3 EDG2DG2XXA
 68, 1.299e-06, 0.0014, 0.7680, EDGOPER1 EDG2DG1XXA %T3 EDG2DG2XXF
 69, 1.237e-06, 0.0013, 0.7693, EMC27100XN %T3 EMM2CCFDGF
 70, 1.182e-06, 0.0013, 0.7706, %T12 HHF22P89BX
 71, 1.182e-06, 0.0013, 0.7719, %T13 HHF22P89AX
 72, 1.182e-06, 0.0013, 0.7731, %T10 HHF22P89BX

Final CS from MCS set selection in : 1.42 sec.

B6 LPSI

Fault Tree after compaction...

Number of gates : 514
 Number of events : 525
 Number of edges : 1756
 Top gate name : G2190

TOP event BDD nodes : 24918
 TOP event cutset set size : 2.471941e+35
 TOP event BDD build (sec) : 9.75
 MCS set BDD nodes : 27089
 MCS set size : 479582239771
 MCS set BDD build (sec) : 0.16

Total time to finish computations (sec) : 10.11

size	mcs_counters
1 :	2
2 :	541
3 :	7812
4 :	679511
5 :	39550351
6 :	491653735
7 :	2877184052
8 :	10955295637
9 :	29224201380
10 :	54644123732
11+:	381349543018

Total : 479582239771

RELIABILITY PARAMETERS

=====

TOP probability from CSs: 5.879171e-04
 MCSs upper bound : 6.079915e-04
 Rare event upper bound : 6.081216e-04

Event Importance Information

Pos	Variable (BE)	Prob.	QTOP (BE=1)	QTOP (BE=0)	FV.	RRW.	RAW.	PD.
1,	LMM2CCF001,	3.259e-04,	1.00000e+00,	2.62103e-04,	0.5541845,	2.24,	1700.92,	0.9997379
2,	%T3,	3.680e-02,	4.83903e-03,	4.25499e-04,	0.2762596,	1.38,	8.23,	0.0044135
3,	EDG2DG1XXF,	9.350e-02,	1.47093e-03,	4.96840e-04,	0.1549152,	1.18,	2.50,	0.0009741
4,	EDG2DG2XXF,	9.350e-02,	1.42513e-03,	5.01563e-04,	0.1468810,	1.17,	2.42,	0.0009236
5,	EDGOPER1,	1.230e-01,	1.16322e-03,	5.07231e-04,	0.1372409,	1.16,	1.98,	0.0006560
6,	EDG2DGAACF,	9.350e-02,	1.16322e-03,	5.28578e-04,	0.1009304,	1.11,	1.98,	0.0006346
7,	EMM2CCFDGF,	4.675e-03,	8.50833e-03,	5.50715e-04,	0.0632774,	1.07,	14.47,	0.0079576
8,	LHF2HE001L,	3.000e-03,	1.04645e-02,	5.58198e-04,	0.0505495,	1.05,	17.80,	0.0099063
9,	LHF2HE002L,	3.000e-03,	1.04033e-02,	5.58382e-04,	0.0502362,	1.05,	17.70,	0.0098449
10,	LMP20P60AA,	2.320e-03,	1.04645e-02,	5.64950e-04,	0.0390650,	1.04,	17.80,	0.0098996
11,	LMP20P60BA,	2.320e-03,	1.04033e-02,	5.65093e-04,	0.0388229,	1.04,	17.70,	0.0098382
12,	LSC20SI3AN,	8.580e-04,	1.04645e-02,	5.79436e-04,	0.0144262,	1.01,	17.80,	0.0098851

Rezultati vrednovanja - BDD pristup

13,	LSC20SI3BN,	8.580e-04,	1.04033e-02,	5.79488e-04,	0.0143368,	1.01,	17.70,	0.0098238
14,	SMV215031N,	9.230e-03,	1.47093e-03,	5.79691e-04,	0.0139920,	1.01,	2.50,	0.0008912
15,	SMV215042N,	9.230e-03,	1.42513e-03,	5.80118e-04,	0.0132663,	1.01,	2.42,	0.0008450
16,	LCB20A305D,	6.450e-04,	1.04645e-02,	5.81543e-04,	0.0108425,	1.01,	17.80,	0.0098830
17,	LMP20P60AF,	6.430e-04,	1.04645e-02,	5.81562e-04,	0.0108089,	1.01,	17.80,	0.0098830
18,	LCB20A405D,	6.450e-04,	1.04033e-02,	5.81582e-04,	0.0107753,	1.01,	17.70,	0.0098217
19,	LMP20P60BF,	6.430e-04,	1.04033e-02,	5.81602e-04,	0.0107419,	1.01,	17.70,	0.0098217
20,	LXV20SI2AK,	6.215e-04,	1.04645e-02,	5.81775e-04,	0.0104473,	1.01,	17.80,	0.0098827
21,	LXV20SI2BK,	6.215e-04,	1.04033e-02,	5.81813e-04,	0.0103825,	1.01,	17.70,	0.0098215
22,	SFL2P4BIS,	1.000e+00,	5.87917e-04,	5.81983e-04,	0.0100934,	1.01,	1.00,	0.0000059
23,	YTK2RW2T3J,	5.520e-06,	1.00000e+00,	5.82400e-04,	0.0093836,	1.01,	1700.92,	0.9994176
24,	YCV2BS-1AN,	4.929e-04,	1.04645e-02,	5.83047e-04,	0.0082845,	1.01,	17.80,	0.0098815
25,	YCV2BS-1BN,	4.929e-04,	1.04033e-02,	5.83077e-04,	0.0082331,	1.01,	17.70,	0.0098202
26,	EMC27100XN,	7.190e-03,	1.16322e-03,	5.83751e-04,	0.0070866,	1.01,	1.98,	0.0005795
27,	%T10,	3.940e-04,	1.11088e-02,	5.83770e-04,	0.0070535,	1.01,	18.90,	0.0105250
28,	%T12,	3.940e-04,	1.11042e-02,	5.83772e-04,	0.0070504,	1.01,	18.89,	0.0105205
29,	%T11,	3.940e-04,	1.10073e-02,	5.83810e-04,	0.0069854,	1.01,	18.72,	0.0104235
30,	%T13,	3.940e-04,	1.10073e-02,	5.83810e-04,	0.0069854,	1.01,	18.72,	0.0104235
31,	ERECa3/A4,	2.630e-01,	5.98871e-04,	5.84008e-04,	0.0066489,	1.01,	1.02,	0.0000149
32,	EDG2DG1XXA,	3.070e-03,	1.47093e-03,	5.85198e-04,	0.0046251,	1.00,	2.50,	0.0008857
33,	EDG2DG2XXA,	3.070e-03,	1.42513e-03,	5.85339e-04,	0.0043853,	1.00,	2.42,	0.0008398
34,	EMP2P16AXA,	2.320e-03,	1.47093e-03,	5.85864e-04,	0.0034926,	1.00,	2.50,	0.0008851
35,	EMP2P16BXA,	2.320e-03,	1.42513e-03,	5.85970e-04,	0.0033115,	1.00,	2.42,	0.0008392
36,	SMP2-2P4CA,	2.320e-03,	1.42457e-03,	5.85972e-04,	0.0033092,	1.00,	2.42,	0.0008386
37,	EMM2CCFFXA,	2.320e-04,	8.50833e-03,	5.86079e-04,	0.0031262,	1.00,	14.47,	0.0079223
38,	EDG2DGAACA,	3.070e-03,	1.16322e-03,	5.86146e-04,	0.0030134,	1.00,	1.98,	0.0005771
39,	%T9,	3.160e-02,	6.33400e-04,	5.86433e-04,	0.0025244,	1.00,	1.08,	0.0000470
40,	T9PREREC,	5.600e-02,	6.12936e-04,	5.86433e-04,	0.0025244,	1.00,	1.04,	0.0000265
41,	EMM2CCFDGA,	1.535e-04,	8.50833e-03,	5.86701e-04,	0.0020683,	1.00,	14.47,	0.0079216
42,	ESV228021N,	1.310e-03,	1.47093e-03,	5.86759e-04,	0.0019701,	1.00,	2.50,	0.0008842
43,	ESV228222N,	1.310e-03,	1.42513e-03,	5.86819e-04,	0.0018679,	1.00,	2.42,	0.0008383
44,	DCD22304XR,	9.120e-05,	1.11042e-02,	5.86958e-04,	0.0016315,	1.00,	18.89,	0.0105173
45,	DCD22404XR,	9.120e-05,	1.10073e-02,	5.86967e-04,	0.0016164,	1.00,	18.72,	0.0104203
46,	%T14,	1.040e-03,	1.47269e-03,	5.86996e-04,	0.0015668,	1.00,	2.50,	0.0008857
47,	%T15,	1.040e-03,	1.42688e-03,	5.87044e-04,	0.0014856,	1.00,	2.43,	0.0008398
48,	ELS228011H,	9.143e-04,	1.47093e-03,	5.87109e-04,	0.0013745,	1.00,	2.50,	0.0008838
49,	ELS228041H,	9.143e-04,	1.47093e-03,	5.87109e-04,	0.0013745,	1.00,	2.50,	0.0008838
50,	STF2SCRNSP,	9.768e-05,	8.50833e-03,	5.87143e-04,	0.0013161,	1.00,	14.47,	0.0079212
51,	ELS228212H,	9.143e-04,	1.42513e-03,	5.87151e-04,	0.0013032,	1.00,	2.42,	0.0008380
52,	ELS228242H,	9.143e-04,	1.42513e-03,	5.87151e-04,	0.0013032,	1.00,	2.42,	0.0008380
53,	ARE2K109AB,	7.650e-05,	1.04645e-02,	5.87162e-04,	0.0012852,	1.00,	17.80,	0.0098774
54,	ESV27245XN,	1.310e-03,	1.16322e-03,	5.87163e-04,	0.0012836,	1.00,	1.98,	0.0005761
55,	ESV27150XN,	1.310e-03,	1.16322e-03,	5.87163e-04,	0.0012836,	1.00,	1.98,	0.0005761
56,	ESV27162XN,	1.310e-03,	1.16322e-03,	5.87163e-04,	0.0012836,	1.00,	1.98,	0.0005761
57,	ECB2A409XD,	6.450e-04,	1.75295e-03,	5.87165e-04,	0.0012790,	1.00,	2.98,	0.0011658
58,	ECB2A408XD,	6.450e-04,	1.75295e-03,	5.87165e-04,	0.0012790,	1.00,	2.98,	0.0011658
59,	ARE2K110BB,	7.650e-05,	1.04033e-02,	5.87166e-04,	0.0012773,	1.00,	17.70,	0.0098161
60,	YCV2BS-1AK,	7.344e-05,	1.04645e-02,	5.87192e-04,	0.0012338,	1.00,	17.80,	0.0098773
61,	LCV20SI3AK,	7.344e-05,	1.04645e-02,	5.87192e-04,	0.0012338,	1.00,	17.80,	0.0098773
62,	LCV20SI3BK,	7.344e-05,	1.04033e-02,	5.87196e-04,	0.0012262,	1.00,	17.70,	0.0098161
63,	YCV2BS-1BK,	7.344e-05,	1.04033e-02,	5.87196e-04,	0.0012262,	1.00,	17.70,	0.0098161
64,	ECB2A308XD,	6.450e-04,	1.52410e-03,	5.87313e-04,	0.0010277,	1.00,	2.59,	0.0009368
65,	ECB2A309XD,	6.450e-04,	1.52410e-03,	5.87313e-04,	0.0010277,	1.00,	2.59,	0.0009368
66,	EMP2P16AXF,	6.430e-04,	1.47093e-03,	5.87349e-04,	0.0009664,	1.00,	2.50,	0.0008836
67,	%T7,	1.000e-03,	1.14974e-03,	5.87355e-04,	0.0009566,	1.00,	1.96,	0.0005624
68,	T7REC,	7.100e-02,	5.95276e-04,	5.87355e-04,	0.0009566,	1.00,	1.01,	0.0000079

Rezultati vrednovanja - BDD pristup

69,	EXV22AXXXK,	6.215e-04,	1.47093e-03,	5.87368e-04,	0.0009340,	1.00,	2.50,	0.0008836
70,	EXV24AXXXK,	6.215e-04,	1.47093e-03,	5.87368e-04,	0.0009340,	1.00,	2.50,	0.0008836
71,	SVX224AXXXK,	6.215e-04,	1.47093e-03,	5.87368e-04,	0.0009340,	1.00,	2.50,	0.0008836
72,	SCB22A402D,	6.450e-04,	1.42457e-03,	5.87377e-04,	0.0009185,	1.00,	2.42,	0.0008372
73,	EMP2P16BXF,	6.430e-04,	1.42513e-03,	5.87378e-04,	0.0009162,	1.00,	2.42,	0.0008378
74,	SMP2-2P4CF,	6.430e-04,	1.42513e-03,	5.87378e-04,	0.0009162,	1.00,	2.42,	0.0008378
75,	SST2-2F6CP,	6.382e-04,	1.42513e-03,	5.87382e-04,	0.0009094,	1.00,	2.42,	0.0008378
76,	EXV22BXXXXK,	6.215e-04,	1.42513e-03,	5.87396e-04,	0.0008856,	1.00,	2.42,	0.0008377
77,	SVX224BXXXXK,	6.215e-04,	1.42513e-03,	5.87396e-04,	0.0008856,	1.00,	2.42,	0.0008377
78,	EXV24BXXXXK,	6.215e-04,	1.42513e-03,	5.87396e-04,	0.0008856,	1.00,	2.42,	0.0008377
79,	EMM2CCFFXF,	6.430e-05,	8.50833e-03,	5.87408e-04,	0.0008663,	1.00,	14.47,	0.0079209
80,	ECV23AXXXN,	4.930e-04,	1.47093e-03,	5.87482e-04,	0.0007408,	1.00,	2.50,	0.0008834
81,	ECV23BXXXXN,	4.930e-04,	1.42513e-03,	5.87504e-04,	0.0007024,	1.00,	2.42,	0.0008376
82,	SCV22SW2CN,	4.930e-04,	1.42457e-03,	5.87504e-04,	0.0007019,	1.00,	2.42,	0.0008371
83,	ECB2A1001D,	6.450e-04,	1.16322e-03,	5.87546e-04,	0.0006316,	1.00,	1.98,	0.0005757
84,	EHX2E9XXXJ,	6.262e-04,	1.16322e-03,	5.87557e-04,	0.0006131,	1.00,	1.98,	0.0005757
85,	ECB251M2XR,	3.686e-04,	1.47093e-03,	5.87592e-04,	0.0005538,	1.00,	2.50,	0.0008833
86,	EMF2VEF17F,	5.638e-04,	1.16322e-03,	5.87593e-04,	0.0005520,	1.00,	1.98,	0.0005756
87,	EMF2VEF18F,	5.638e-04,	1.16322e-03,	5.87593e-04,	0.0005520,	1.00,	1.98,	0.0005756
88,	ECB261M2XR,	3.686e-04,	1.42513e-03,	5.87608e-04,	0.0005251,	1.00,	2.42,	0.0008375
89,	EHX2E9XXXF,	5.039e-04,	1.16322e-03,	5.87627e-04,	0.0004933,	1.00,	1.98,	0.0005756
90,	EAV27239BN,	2.110e-02,	5.99805e-04,	5.87661e-04,	0.0004358,	1.00,	1.02,	0.0000121
91,	EAV27239AN,	2.110e-02,	5.99805e-04,	5.87661e-04,	0.0004358,	1.00,	1.02,	0.0000121
92,	EDGOPER2,	8.510e-02,	5.90331e-04,	5.87693e-04,	0.0003819,	1.00,	1.00,	0.0000026
93,	LCB20A305R,	2.234e-05,	1.04645e-02,	5.87697e-04,	0.0003753,	1.00,	17.80,	0.0098768
94,	LCB20A405R,	2.234e-05,	1.04033e-02,	5.87698e-04,	0.0003730,	1.00,	17.70,	0.0098156
95,	ERE2409PRK,	1.560e-04,	1.75295e-03,	5.87735e-04,	0.0003092,	1.00,	2.98,	0.0011652
96,	SWREC,	2.100e-02,	5.96108e-04,	5.87741e-04,	0.0002988,	1.00,	1.01,	0.0000084
97,	ERE2309PRK,	1.560e-04,	1.52410e-03,	5.87771e-04,	0.0002484,	1.00,	2.59,	0.0009363
98,	DBT2D12A0F,	1.010e-04,	1.75295e-03,	5.87799e-04,	0.0002002,	1.00,	2.98,	0.0011652
99,	ETK2T57AXG,	1.325e-04,	1.47093e-03,	5.87800e-04,	0.0001990,	1.00,	2.50,	0.0008831
100,	ETK2T30AXG,	1.325e-04,	1.47093e-03,	5.87800e-04,	0.0001990,	1.00,	2.50,	0.0008831

Finished Importance analysis computation in : 73.81 sec.

Average probability computation : 70 ms.

Final Cut Sets

#MCS#	p(MCS)	F.V.	Acc.	Events...
1,	3.259e-04,	0.5359,	0.5359,	LMM2CCF001
2,	3.957e-05,	0.0651,	0.6010,	EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF %T3 EDGOPER1
3,	3.008e-05,	0.0495,	0.6504,	EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF %T3 EDG2DGAACF
4,	2.116e-05,	0.0348,	0.6852,	EMM2CCFDGF %T3 EDGOPER1
5,	1.609e-05,	0.0265,	0.7117,	EMM2CCFDGF %T3 EDG2DGAACF
6,	9.000e-06,	0.0148,	0.7265,	LHF2HE002L LHF2HE001L
7,	6.960e-06,	0.0114,	0.7379,	LMP20P60BA LHF2HE001L
8,	6.960e-06,	0.0114,	0.7494,	LHF2HE002L LMP20P60AA
9,	5.520e-06,	0.0091,	0.7585,	YTK2RW2T3J
10,	5.382e-06,	0.0089,	0.7673,	LMP20P60BA LMP20P60AA
11,	3.906e-06,	0.0064,	0.7737,	SMV215042N EDG2DG1XXF %T3 EDGOPER1
12,	3.906e-06,	0.0064,	0.7802,	EDG2DG2XXF SMV215031N %T3 EDGOPER1
13,	2.969e-06,	0.0049,	0.7850,	SMV215042N EDG2DG1XXF %T3 EDG2DGAACF
14,	2.969e-06,	0.0049,	0.7899,	EDG2DG2XXF SMV215031N %T3 EDG2DGAACF
15,	2.574e-06,	0.0042,	0.7942,	LHF2HE002L LSC20SI3AN
16,	2.574e-06,	0.0042,	0.7984,	LSC20SI3BN LHF2HE001L

17, 2.313e-06, 0.0038, 0.8022, EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF %T3 EMC27100XN
18, 1.991e-06, 0.0033, 0.8055, LMP20P60BA LSC20SI3AN
19, 1.991e-06, 0.0033, 0.8087, LSC20SI3BN LMP20P60AA
20, 1.935e-06, 0.0032, 0.8119, LCB20A405D LHF2HE001L
21, 1.935e-06, 0.0032, 0.8151, LHF2HE002L LCB20A305D
22, 1.929e-06, 0.0032, 0.8183, LMP20P60BF LHF2HE001L
23, 1.929e-06, 0.0032, 0.8215, LHF2HE002L LMP20P60AF
24, 1.865e-06, 0.0031, 0.8245, LXV20SI2BK LHF2HE001L
25, 1.865e-06, 0.0031, 0.8276, LHF2HE002L LXV20SI2AK
26, 1.496e-06, 0.0025, 0.8300, LCB20A405D LMP20P60AA
27, 1.496e-06, 0.0025, 0.8325, LMP20P60BA LCB20A305D
28, 1.492e-06, 0.0025, 0.8350, LMP20P60BF LMP20P60AA
29, 1.492e-06, 0.0025, 0.8374, LMP20P60BA LMP20P60AF
30, 1.479e-06, 0.0024, 0.8398, YCV2BS-1BN LHF2HE001L
31, 1.479e-06, 0.0024, 0.8423, LHF2HE002L YCV2BS-1AN
32, 1.442e-06, 0.0024, 0.8446, LXV20SI2BK LMP20P60AA
33, 1.442e-06, 0.0024, 0.8470, LMP20P60BA LXV20SI2AK
34, 1.299e-06, 0.0021, 0.8492, EDG2DG2XXA EDG2DG1XXF %T3 EDGOPER1
35, 1.299e-06, 0.0021, 0.8513, EDG2DG2XXF EDG2DG1XXA %T3 EDGOPER1
36, 1.237e-06, 0.0020, 0.8533, EMM2CCFDGF %T3 EMC27100XN
37, 1.182e-06, 0.0019, 0.8553, %T13 LHF2HE001L
38, 1.182e-06, 0.0019, 0.8572, %T11 LHF2HE001L
39, 1.182e-06, 0.0019, 0.8592, %T12 LHF2HE002L
40, 1.182e-06, 0.0019, 0.8611, %T10 LHF2HE002L
41, 1.144e-06, 0.0019, 0.8630, YCV2BS-1BN LMP20P60AA
42, 1.144e-06, 0.0019, 0.8649, LMP20P60BA YCV2BS-1AN
43, 1.050e-06, 0.0017, 0.8666, EMM2CCFFXA %T3 EDGOPER1
44, 9.877e-07, 0.0016, 0.8682, EDG2DG2XXA EDG2DG1XXF %T3 EDG2DGAACF
45, 9.877e-07, 0.0016, 0.8698, EDG2DG2XXF EDG2DG1XXA %T3 EDG2DGAACF
46, 9.877e-07, 0.0016, 0.8715, EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF %T3 EDG2DGAACA
47, 9.819e-07, 0.0016, 0.8731, EDG2DG1XXF SFL2P4BIS %T3 SMP2-2P4CA EDGOPER1
48, 9.819e-07, 0.0016, 0.8747, EMP2P16BXA EDG2DG1XXF %T3 EDGOPER1
49, 9.819e-07, 0.0016, 0.8763, EDG2DG2XXF EMP2P16AXA %T3 EDGOPER1
50, 9.141e-07, 0.0015, 0.8778, %T13 LMP20P60AA
51, 9.141e-07, 0.0015, 0.8793, %T11 LMP20P60AA
52, 9.141e-07, 0.0015, 0.8808, %T12 LMP20P60BA
53, 9.141e-07, 0.0015, 0.8823, %T10 LMP20P60BA
54, 7.983e-07, 0.0013, 0.8836, EMM2CCFFXA %T3 EDG2DGAACF
55, 7.489e-07, 0.0012, 0.8849, EDG2DG1XXF SFL2P4BIS %T3 T9PREREC %T9 EDGOPER1
56, 7.464e-07, 0.0012, 0.8861, EDG2DG1XXF SFL2P4BIS %T3 SMP2-2P4CA EDG2DGAACF
57, 7.464e-07, 0.0012, 0.8873, EMP2P16BXA EDG2DG1XXF %T3 EDG2DGAACF
58, 7.464e-07, 0.0012, 0.8885, EDG2DG2XXF EMP2P16AXA %T3 EDG2DGAACF
59, 7.362e-07, 0.0012, 0.8898, LSC20SI3BN LSC20SI3AN
60, 6.948e-07, 0.0011, 0.8909, EMM2CCFDGA %T3 EDGOPER1
61, 5.693e-07, 0.0009, 0.8918, EDG2DG1XXF SFL2P4BIS %T3 T9PREREC %T9 EDG2DGAACF
62, 5.544e-07, 0.0009, 0.8927, ESV228222N EDG2DG1XXF %T3 EDGOPER1
63, 5.544e-07, 0.0009, 0.8937, EDG2DG2XXF ESV228021N %T3 EDGOPER1
64, 5.534e-07, 0.0009, 0.8946, LCB20A405D LSC20SI3AN
65, 5.534e-07, 0.0009, 0.8955, LSC20SI3BN LCB20A305D
66, 5.517e-07, 0.0009, 0.8964, LMP20P60BF LSC20SI3AN
67, 5.517e-07, 0.0009, 0.8973, LSC20SI3BN LMP20P60AF
68, 5.332e-07, 0.0009, 0.8982, LXV20SI2BK LSC20SI3AN
69, 5.332e-07, 0.0009, 0.8990, LSC20SI3BN LXV20SI2AK
70, 5.282e-07, 0.0009, 0.8999, EMM2CCFDGF %T3 EDG2DGAACA
71, 5.282e-07, 0.0009, 0.9008, EMM2CCFDGA %T3 EDG2DGAACF
72, 4.421e-07, 0.0007, 0.9015, STF2SCRNSP %T3 EDGOPER1

Final CS from MCS set selection in : 0.89 sec.

B7 SW

 Fault Tree after compaction...

Number of gates : 488
 Number of events : 444
 Number of edges : 1667
 Top gate name : G2200

TOP event BDD nodes : 38252
 TOP event cutset set size : 1.952354e+30
 TOP event BDD build (sec) : 7.53
 MCS set BDD nodes : 122604
 MCS set size : 58952275075664
 MCS set BDD build (sec) : 0.40

Total time to finish computations (sec) : 8.11

size	mcs_counters
1 :	0
2 :	23
3 :	351
4 :	1178
5 :	11888
6 :	1447184
7 :	36148942
8 :	1166594773
9 :	17612857672
10 :	136789685151
11+:	58796668328502

Total : 58952275075664

RELIABILITY PARAMETERS

=====

TOP probability from CSs: 1.980311e-04
 MCSs upper bound : 1.996855e-04
 Rare event upper bound : 1.997006e-04

Event Importance Information

Pos	Variable (BE)	Prob.	QTOP(BE=1)	QTOP(BE=0)	FV.	RRW.	RAW.	PD.
1,	SFL2P4BIS,	1.000e+00,	1.98031e-04,	0.00000e+00,	1.0000000,	-nan(ind),	1.00,	0.0001980
2,	T8PREREC,	1.400e-01,	9.98684e-04,	6.76922e-05,	0.6581737,	2.93,	5.04,	0.0009310
3,	%T8,	3.160e-02,	4.19234e-03,	6.76922e-05,	0.6581737,	2.93,	21.17,	0.0041246
4,	SWREC,	2.100e-02,	6.12211e-03,	7.09569e-05,	0.6416880,	2.79,	30.91,	0.0060511
5,	%T3,	3.680e-02,	7.60919e-04,	1.76525e-04,	0.1085976,	1.12,	3.84,	0.0005844
6,	SMP2-2P4AF,	6.430e-04,	2.95295e-02,	1.79159e-04,	0.0952994,	1.11,	149.12,	0.0293503
7,	SST2-2F6AP,	6.382e-04,	2.95295e-02,	1.79300e-04,	0.0945875,	1.10,	149.12,	0.0293502
8,	SHF2-2P4BL,	3.000e-03,	6.12211e-03,	1.80205e-04,	0.0900147,	1.10,	30.91,	0.0059419
9,	%T10,	3.940e-04,	4.25580e-02,	1.81335e-04,	0.0843120,	1.09,	214.91,	0.0423766
10,	SMP2-2P4BA,	2.320e-03,	6.12211e-03,	1.84255e-04,	0.0695639,	1.07,	30.91,	0.0059379
11,	DCD22304XR,	9.120e-05,	4.25580e-02,	1.94167e-04,	0.0195100,	1.02,	214.91,	0.0423638
12,	SCB22A303D,	6.450e-04,	6.12211e-03,	1.94208e-04,	0.0193076,	1.02,	30.91,	0.0059279

Rezultati vrednovanja - BDD pristup

13,	SMP2-2P4BF,	6.430e-04,	6.12211e-03,	1.94219e-04,	0.0192476,	1.02,	30.91,	0.0059279
14,	SST2-2F6BP,	6.382e-04,	6.12211e-03,	1.94248e-04,	0.0191039,	1.02,	30.91,	0.0059279
15,	SMV214701K,	1.277e-04,	2.95295e-02,	1.94285e-04,	0.0189167,	1.02,	149.12,	0.0293352
16,	SCV22SW2BN,	4.930e-04,	6.12211e-03,	1.95109e-04,	0.0147553,	1.01,	30.91,	0.0059270
17,	SMP2-2P4AA,	2.320e-03,	1.25674e-03,	1.95569e-04,	0.0124320,	1.01,	6.35,	0.0010612
18,	SCV22SW2AK,	7.344e-05,	2.95295e-02,	1.95877e-04,	0.0108784,	1.01,	149.12,	0.0293336
19,	SXV22SW3AK,	3.768e-05,	2.95295e-02,	1.96926e-04,	0.0055812,	1.01,	149.12,	0.0293325
20,	SMV214191K,	1.277e-04,	6.12211e-03,	1.97274e-04,	0.0038206,	1.00,	30.91,	0.0059248
21,	SMV214181K,	1.277e-04,	6.12211e-03,	1.97274e-04,	0.0038206,	1.00,	30.91,	0.0059248
22,	SMV214725K,	1.277e-04,	6.12211e-03,	1.97274e-04,	0.0038206,	1.00,	30.91,	0.0059248
23,	SCB22A302D,	6.450e-04,	1.25674e-03,	1.97348e-04,	0.0034505,	1.00,	6.35,	0.0010594
24,	SCB22A302R,	2.234e-05,	2.95295e-02,	1.97376e-04,	0.0033090,	1.00,	149.12,	0.0293321
25,	SMM2CCFMDP,	1.929e-05,	2.95295e-02,	1.97465e-04,	0.0028572,	1.00,	149.12,	0.0293321
26,	SCV22SW2AN,	4.930e-04,	1.25674e-03,	1.97509e-04,	0.0026370,	1.00,	6.35,	0.0010592
27,	SCV22SW2BK,	7.344e-05,	6.12211e-03,	1.97596e-04,	0.0021971,	1.00,	30.91,	0.0059245
28,	SXV22SW3BK,	3.768e-05,	6.12211e-03,	1.97808e-04,	0.0011272,	1.00,	30.91,	0.0059243
29,	SCB22A303R,	2.234e-05,	6.12211e-03,	1.97899e-04,	0.0006683,	1.00,	30.91,	0.0059242
30,	DBD202D23F,	1.080e-06,	4.25580e-02,	1.97985e-04,	0.0002310,	1.00,	214.91,	0.0423600
31,	DCD200133R,	9.120e-05,	4.76073e-04,	1.98006e-04,	0.0001281,	1.00,	2.40,	0.0002781
32,	DCD200142R,	9.120e-05,	4.76073e-04,	1.98006e-04,	0.0001281,	1.00,	2.40,	0.0002781
33,	EDG2DG1XXF,	9.350e-02,	1.98223e-04,	1.98011e-04,	0.0000999,	1.00,	1.00,	0.0000002
34,	EDG2DGAACF,	9.350e-02,	1.98170e-04,	1.98017e-04,	0.0000723,	1.00,	1.00,	0.0000002
35,	ERECB5/B6,	2.600e-01,	1.98071e-04,	1.98017e-04,	0.0000713,	1.00,	1.00,	0.0000001
36,	EDGOPER1,	1.230e-01,	1.98126e-04,	1.98018e-04,	0.0000675,	1.00,	1.00,	0.0000001
37,	EREC A3/A4,	2.630e-01,	1.98067e-04,	1.98018e-04,	0.0000647,	1.00,	1.00,	0.0000000
38,	EDG2DG2XXF,	9.350e-02,	1.98127e-04,	1.98021e-04,	0.0000502,	1.00,	1.00,	0.0000001
39,	%T14,	1.040e-03,	2.05752e-04,	1.98023e-04,	0.0000406,	1.00,	1.04,	0.0000077
40,	DCD200142D,	8.830e-04,	2.05752e-04,	1.98024e-04,	0.0000345,	1.00,	1.04,	0.0000077
41,	EMM2CCFDGF,	4.675e-03,	1.99038e-04,	1.98026e-04,	0.0000239,	1.00,	1.01,	0.0000010
42,	DBC202D31F,	2.688e-04,	2.05752e-04,	1.98029e-04,	0.0000105,	1.00,	1.04,	0.0000077
43,	SMV215031N,	9.230e-03,	1.98245e-04,	1.98029e-04,	0.0000100,	1.00,	1.00,	0.0000002
44,	SMV215042N,	9.230e-03,	1.98127e-04,	1.98030e-04,	0.0000045,	1.00,	1.00,	0.0000001
45,	%T12,	3.940e-04,	2.00178e-04,	1.98030e-04,	0.0000043,	1.00,	1.01,	0.0000021
46,	EMC27100XN,	7.190e-03,	1.98126e-04,	1.98030e-04,	0.0000035,	1.00,	1.00,	0.0000001
47,	EDG2DG1XXA,	3.070e-03,	1.98245e-04,	1.98030e-04,	0.0000033,	1.00,	1.00,	0.0000002
48,	DRE200142E,	7.650e-05,	2.05752e-04,	1.98030e-04,	0.0000030,	1.00,	1.04,	0.0000077
49,	EMP2P16AXA,	2.320e-03,	1.98245e-04,	1.98031e-04,	0.0000025,	1.00,	1.00,	0.0000002
50,	ET12X25XXF,	6.048e-05,	2.05752e-04,	1.98031e-04,	0.0000024,	1.00,	1.04,	0.0000077
51,	ECB2A308XD,	6.450e-04,	1.98527e-04,	1.98031e-04,	0.0000016,	1.00,	1.00,	0.0000005
52,	ECB2A309XD,	6.450e-04,	1.98527e-04,	1.98031e-04,	0.0000016,	1.00,	1.00,	0.0000005
53,	DBD202D01F,	1.080e-06,	4.76073e-04,	1.98031e-04,	0.0000015,	1.00,	2.40,	0.0002780
54,	EDG2DG2XXA,	3.070e-03,	1.98127e-04,	1.98031e-04,	0.0000015,	1.00,	1.00,	0.0000001
55,	EDG2DGAACA,	3.070e-03,	1.98126e-04,	1.98031e-04,	0.0000015,	1.00,	1.00,	0.0000001
56,	ESV228021N,	1.310e-03,	1.98245e-04,	1.98031e-04,	0.0000014,	1.00,	1.00,	0.0000002
57,	EMM2CCFFXA,	2.320e-04,	1.99206e-04,	1.98031e-04,	0.0000014,	1.00,	1.01,	0.0000012
58,	EMP2P16BXA,	2.320e-03,	1.98127e-04,	1.98031e-04,	0.0000011,	1.00,	1.00,	0.0000001
59,	SMP2-2P4CA,	2.320e-03,	1.98127e-04,	1.98031e-04,	0.0000011,	1.00,	1.00,	0.0000001
60,	ELS228011H,	9.143e-04,	1.98245e-04,	1.98031e-04,	0.0000010,	1.00,	1.00,	0.0000002
61,	ELS228041H,	9.143e-04,	1.98245e-04,	1.98031e-04,	0.0000010,	1.00,	1.00,	0.0000002
62,	EMM2CCFDGA,	1.535e-04,	1.99206e-04,	1.98031e-04,	0.0000009,	1.00,	1.01,	0.0000012
63,	ECB2512XXR,	2.234e-05,	2.05752e-04,	1.98031e-04,	0.0000009,	1.00,	1.04,	0.0000077
64,	DCB2051M3R,	2.234e-05,	2.05752e-04,	1.98031e-04,	0.0000009,	1.00,	1.04,	0.0000077
65,	ECB2521XXR,	2.234e-05,	2.05752e-04,	1.98031e-04,	0.0000009,	1.00,	1.04,	0.0000077
66,	ECB2A301XR,	2.234e-05,	2.05752e-04,	1.98031e-04,	0.0000009,	1.00,	1.04,	0.0000077
67,	T9PREREC,	5.600e-02,	1.98034e-04,	1.98031e-04,	0.0000009,	1.00,	1.00,	0.0000000
68,	%T9,	3.160e-02,	1.98036e-04,	1.98031e-04,	0.0000009,	1.00,	1.00,	0.0000000

Rezultati vrednovanja - BDD pristup

69,	%T15,	1.040e-03,	1.98179e-04,	1.98031e-04,	0.0000008,	1.00,	1.00,	0.0000001
70,	EXV22AXXXK,	6.215e-04,	1.98245e-04,	1.98031e-04,	0.0000007,	1.00,	1.00,	0.0000002
71,	SXV224AXXXK,	6.215e-04,	1.98245e-04,	1.98031e-04,	0.0000007,	1.00,	1.00,	0.0000002
72,	EXV24AXXXK,	6.215e-04,	1.98245e-04,	1.98031e-04,	0.0000007,	1.00,	1.00,	0.0000002
73,	ESV228222N,	1.310e-03,	1.98127e-04,	1.98031e-04,	0.0000006,	1.00,	1.00,	0.0000001
74,	ESV27245XN,	1.310e-03,	1.98126e-04,	1.98031e-04,	0.0000006,	1.00,	1.00,	0.0000001
75,	ESV27162XN,	1.310e-03,	1.98126e-04,	1.98031e-04,	0.0000006,	1.00,	1.00,	0.0000001
76,	ESV27150XN,	1.310e-03,	1.98126e-04,	1.98031e-04,	0.0000006,	1.00,	1.00,	0.0000001
77,	EMP2P16AXF,	6.430e-04,	1.98223e-04,	1.98031e-04,	0.0000006,	1.00,	1.00,	0.0000002
78,	ECV23AXXXN,	4.930e-04,	1.98245e-04,	1.98031e-04,	0.0000005,	1.00,	1.00,	0.0000002
79,	STF2SCRNSP,	9.768e-05,	1.99038e-04,	1.98031e-04,	0.0000005,	1.00,	1.01,	0.0000010
80,	ECB2A408XD,	6.450e-04,	1.98178e-04,	1.98031e-04,	0.0000005,	1.00,	1.00,	0.0000001
81,	ECB2A409XD,	6.450e-04,	1.98178e-04,	1.98031e-04,	0.0000005,	1.00,	1.00,	0.0000001
82,	ELS228212H,	9.143e-04,	1.98127e-04,	1.98031e-04,	0.0000004,	1.00,	1.00,	0.0000001
83,	ELS228242H,	9.143e-04,	1.98127e-04,	1.98031e-04,	0.0000004,	1.00,	1.00,	0.0000001
84,	EHX2E9XXXJ,	6.262e-04,	1.98170e-04,	1.98031e-04,	0.0000004,	1.00,	1.00,	0.0000001
85,	%T7,	1.000e-03,	1.98114e-04,	1.98031e-04,	0.0000004,	1.00,	1.00,	0.0000001
86,	ECB251M2XR,	3.686e-04,	1.98245e-04,	1.98031e-04,	0.0000004,	1.00,	1.00,	0.0000002
87,	EMF2VEF17F,	5.638e-04,	1.98170e-04,	1.98031e-04,	0.0000004,	1.00,	1.00,	0.0000001
88,	EMF2VEF18F,	5.638e-04,	1.98170e-04,	1.98031e-04,	0.0000004,	1.00,	1.00,	0.0000001
89,	ERE2309PRK,	1.560e-04,	1.98527e-04,	1.98031e-04,	0.0000004,	1.00,	1.00,	0.0000005
90,	EHX2E9XXXF,	5.039e-04,	1.98170e-04,	1.98031e-04,	0.0000004,	1.00,	1.00,	0.0000001
91,	EMM2CCFFXF,	6.430e-05,	1.99038e-04,	1.98031e-04,	0.0000003,	1.00,	1.01,	0.0000010
92,	SCB22A402D,	6.450e-04,	1.98127e-04,	1.98031e-04,	0.0000003,	1.00,	1.00,	0.0000001
93,	EMP2P16BXF,	6.430e-04,	1.98127e-04,	1.98031e-04,	0.0000003,	1.00,	1.00,	0.0000001
94,	SMP2-2P4CF,	6.430e-04,	1.98127e-04,	1.98031e-04,	0.0000003,	1.00,	1.00,	0.0000001
95,	SST2-2F6CP,	6.382e-04,	1.98127e-04,	1.98031e-04,	0.0000003,	1.00,	1.00,	0.0000001
96,	ECB2A1001D,	6.450e-04,	1.98126e-04,	1.98031e-04,	0.0000003,	1.00,	1.00,	0.0000001
97,	SXV224BXXK,	6.215e-04,	1.98127e-04,	1.98031e-04,	0.0000003,	1.00,	1.00,	0.0000001
98,	EXV22BXXK,	6.215e-04,	1.98127e-04,	1.98031e-04,	0.0000003,	1.00,	1.00,	0.0000001
99,	EXV24BXXK,	6.215e-04,	1.98127e-04,	1.98031e-04,	0.0000003,	1.00,	1.00,	0.0000001
100,	%T11,	3.940e-04,	1.98179e-04,	1.98031e-04,	0.0000003,	1.00,	1.00,	0.0000001

Finished Importance analysis computation in : 64.68 sec.

Average probability computation : 72 ms.

Final Cut Sets

#MCS#	p(MCS)	F.V.	Acc.	Events...
-------	--------	------	------	-----------

1,	9.290e-05,	0.4652,	0.4652,	SFL2P4BIS SWREC T8PREREC %T8
2,	1.450e-05,	0.0726,	0.5378,	SFL2P4BIS %T3 %T10
3,	1.350e-05,	0.0676,	0.6054,	SMP2-2P4AF SFL2P4BIS SWREC
4,	1.340e-05,	0.0671,	0.6725,	SST2-2F6AP SFL2P4BIS SWREC
5,	1.327e-05,	0.0665,	0.7390,	SFL2P4BIS SHF2-2P4BL T8PREREC %T8
6,	1.026e-05,	0.0514,	0.7904,	SFL2P4BIS SMP2-2P4BA T8PREREC %T8
7,	3.356e-06,	0.0168,	0.8072,	SFL2P4BIS %T3 DCD22304XR
8,	2.853e-06,	0.0143,	0.8215,	SFL2P4BIS SCB22A303D T8PREREC %T8
9,	2.845e-06,	0.0142,	0.8357,	SMP2-2P4BF SFL2P4BIS T8PREREC %T8
10,	2.823e-06,	0.0141,	0.8499,	SST2-2F6BP SFL2P4BIS T8PREREC %T8
11,	2.682e-06,	0.0134,	0.8633,	SMV214701K SFL2P4BIS SWREC
12,	2.181e-06,	0.0109,	0.8742,	SFL2P4BIS SCV22SW2BN T8PREREC %T8
13,	1.929e-06,	0.0097,	0.8839,	SMP2-2P4AF SFL2P4BIS SHF2-2P4BL
14,	1.915e-06,	0.0096,	0.8935,	SST2-2F6AP SFL2P4BIS SHF2-2P4BL
15,	1.793e-06,	0.0090,	0.9025,	SMP2-2P4AA SFL2P4BIS %T3 SWREC
16,	1.743e-06,	0.0087,	0.9112,	SFL2P4BIS T8PREREC %T8 %T10

17, 1.542e-06, 0.0077, 0.9189, SCV22SW2AK SFL2P4BIS SWREC
 18, 1.492e-06, 0.0075, 0.9264, SMP2-2P4AF SFL2P4BIS SMP2-2P4BA
 19, 1.481e-06, 0.0074, 0.9338, SST2-2F6AP SFL2P4BIS SMP2-2P4BA
 20, 7.913e-07, 0.0040, 0.9378, SXV22SW3AK SFL2P4BIS SWREC
 21, 5.649e-07, 0.0028, 0.9406, SMV214191K SFL2P4BIS T8PREREC %T8
 22, 5.649e-07, 0.0028, 0.9434, SMV214181K SFL2P4BIS T8PREREC %T8
 23, 5.649e-07, 0.0028, 0.9462, SMV214725K SFL2P4BIS T8PREREC %T8
 24, 4.985e-07, 0.0025, 0.9487, SCB22A302D SFL2P4BIS %T3 SWREC
 25, 4.691e-07, 0.0023, 0.9511, SCB22A302R SFL2P4BIS SWREC
 26, 4.147e-07, 0.0021, 0.9532, SMP2-2P4AF SFL2P4BIS SCB22A303D
 27, 4.134e-07, 0.0021, 0.9552, SMP2-2P4AF SMP2-2P4BF SFL2P4BIS
 28, 4.116e-07, 0.0021, 0.9573, SST2-2F6AP SFL2P4BIS SCB22A303D
 29, 4.104e-07, 0.0021, 0.9593, SMP2-2P4AF SST2-2F6BP SFL2P4BIS
 30, 4.104e-07, 0.0021, 0.9614, SST2-2F6AP SMP2-2P4BF SFL2P4BIS
 31, 4.073e-07, 0.0020, 0.9634, SST2-2F6AP SST2-2F6BP SFL2P4BIS
 32, 4.051e-07, 0.0020, 0.9655, SFL2P4BIS SWREC SMM2CCFMDP
 33, 4.035e-07, 0.0020, 0.9675, SFL2P4BIS T8PREREC %T8 DCD22304XR
 34, 3.831e-07, 0.0019, 0.9694, SMV214701K SFL2P4BIS SHF2-2P4BL
 35, 3.810e-07, 0.0019, 0.9713, SCV22SW2AN SFL2P4BIS %T3 SWREC
 36, 3.249e-07, 0.0016, 0.9729, SCV22SW2BK SFL2P4BIS T8PREREC %T8
 37, 3.170e-07, 0.0016, 0.9745, SMP2-2P4AF SFL2P4BIS SCV22SW2BN
 38, 3.146e-07, 0.0016, 0.9761, SST2-2F6AP SFL2P4BIS SCV22SW2BN
 39, 2.963e-07, 0.0015, 0.9776, SMV214701K SFL2P4BIS SMP2-2P4BA
 40, 2.561e-07, 0.0013, 0.9789, SMP2-2P4AA SFL2P4BIS SHF2-2P4BL %T3
 41, 2.533e-07, 0.0013, 0.9801, SMP2-2P4AF SFL2P4BIS %T10
 42, 2.515e-07, 0.0013, 0.9814, SST2-2F6AP SFL2P4BIS %T10
 43, 2.203e-07, 0.0011, 0.9825, SCV22SW2AK SFL2P4BIS SHF2-2P4BL
 44, 1.981e-07, 0.0010, 0.9835, SMP2-2P4AA SFL2P4BIS %T3 SMP2-2P4BA
 45, 1.704e-07, 0.0009, 0.9844, SCV22SW2AK SFL2P4BIS SMP2-2P4BA
 46, 1.667e-07, 0.0008, 0.9852, SXV22SW3BK SFL2P4BIS T8PREREC %T8
 47, 1.130e-07, 0.0006, 0.9858, SXV22SW3AK SFL2P4BIS SHF2-2P4BL
 48, 9.883e-08, 0.0005, 0.9862, SCB22A303R SFL2P4BIS T8PREREC %T8
 49, 8.742e-08, 0.0004, 0.9867, SXV22SW3AK SFL2P4BIS SMP2-2P4BA
 50, 8.237e-08, 0.0004, 0.9871, SMV214701K SFL2P4BIS SCB22A303D
 51, 8.211e-08, 0.0004, 0.9875, SMV214701K SMP2-2P4BF SFL2P4BIS
 52, 8.211e-08, 0.0004, 0.9879, SMP2-2P4AF SMV214725K SFL2P4BIS
 53, 8.211e-08, 0.0004, 0.9883, SMP2-2P4AF SMV214191K SFL2P4BIS
 54, 8.211e-08, 0.0004, 0.9887, SMP2-2P4AF SMV214181K SFL2P4BIS
 55, 8.150e-08, 0.0004, 0.9891, SMV214701K SST2-2F6BP SFL2P4BIS
 56, 8.150e-08, 0.0004, 0.9896, SST2-2F6AP SMV214725K SFL2P4BIS
 57, 8.150e-08, 0.0004, 0.9900, SST2-2F6AP SMV214191K SFL2P4BIS
 58, 8.150e-08, 0.0004, 0.9904, SST2-2F6AP SMV214181K SFL2P4BIS
 59, 7.121e-08, 0.0004, 0.9907, SCB22A302D SFL2P4BIS SHF2-2P4BL %T3
 60, 6.702e-08, 0.0003, 0.9911, SCB22A302R SFL2P4BIS SHF2-2P4BL
 61, 6.296e-08, 0.0003, 0.9914, SMV214701K SFL2P4BIS SCV22SW2BN
 62, 5.864e-08, 0.0003, 0.9917, SMP2-2P4AF SFL2P4BIS DCD22304XR
 63, 5.820e-08, 0.0003, 0.9920, SST2-2F6AP SFL2P4BIS DCD22304XR
 64, 5.787e-08, 0.0003, 0.9923, SFL2P4BIS SHF2-2P4BL SMM2CCFMDP
 65, 5.507e-08, 0.0003, 0.9925, SMP2-2P4AA SFL2P4BIS SCB22A303D %T3
 66, 5.507e-08, 0.0003, 0.9928, SCB22A302D SFL2P4BIS %T3 SMP2-2P4BA
 67, 5.490e-08, 0.0003, 0.9931, SMP2-2P4BF SMP2-2P4AA SFL2P4BIS %T3
 68, 5.449e-08, 0.0003, 0.9934, SST2-2F6BP SMP2-2P4AA SFL2P4BIS %T3
 69, 5.443e-08, 0.0003, 0.9936, SCV22SW2AN SFL2P4BIS SHF2-2P4BL %T3
 70, 5.183e-08, 0.0003, 0.9939, SCB22A302R SFL2P4BIS SMP2-2P4BA
 71, 5.031e-08, 0.0003, 0.9941, SMV214701K SFL2P4BIS %T10
 72, 4.737e-08, 0.0002, 0.9944, SCV22SW2AK SFL2P4BIS SCB22A303D

Final CS from MCS set selection in : 0.06 sec.

Dodatak C

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

U ovom dodatku prikazani su rezultati vrednovanja modela iz nuklearne elektrane primjenom konvencionalnog pristupa. Iz istog razloga, zbog duljine prikaza kao i za BDD pristup, kompletni rezultati vrednovanja modela su priloženi uz radnju u elektronskom obliku. Za konvencionalnu analizu, uzeti su rezultati **KIRAP** (puni naziv **KAERI Integrated Reliability Analysis Code Package**) programskog rješenja

```
KCUT Version 4.7h 1997.5.10
Boolean Equation Reduction Program
Copyright Han, S.H. KAERI
```

razvijenog od strane istraživačke grupe Korejskog instituta za nuklearnu energiju. Za osnovne modele iz tablice [A1.2](#) rezultati konvencionalnog pristupa su strukturirani na sljedeći način:

1. sekcija pokazuje parametre pokretanja KIRAP programskog rješenja. Za sve testne modele korišteni su isti parametri: granična vjerojatnost za međurezultate 10^{-12} , te prikaz izvješća za mjere važnosti za 100 osnovnih događaja i minimalnih presjeka
2. sekcija pokazuje vjerojatnost vršnog događaja izračunatog iz djelomičnog MCS skupa dobivenog iz primjene granične vjerojatnosti za međurezultate
3. sekcija pokazuje mjere važnosti za prvih 100 osnovnih događaja u padajućem redoslijedu prema $f-v$ mjeri važnosti. U stupcima su date vrijednosti za:
mean vjerojatnost osnovnog događaja
f-v Fussel-Vesely mjera važnosti za osnovni događaj,
rrw faktor smanjenja rizika za osnovni događaj,
raw faktor povećanja rizika za osnovni događaj,
pd parcijalna derivacija za osnovni događaj

4. sekcija pokazuje prvih 100 minimalnih presjeka u padajućem redoslijedu prema vjerojatnosti. U stupcima su zadane vrijednosti za:

value vjerojatnost minimalnog presjeka uz pretpostavljenu nezavisnost osnovnih događaja

f-v Fussel-Vesely mjera važnosti za minimalni presjek definirana s [B.1](#)

acc kumulativni zbroj FV mjera važnosti za sve prethodne minimalne presjeke uključujući tekući minimalni presjek

cut sets osnovni događaji u minimalnom presjeku

C1 ACPOWER – KIRAP

```
GENPRG ( ACPOWER / PROBA * 1.000e-012 / REPORT * 1.000e+002
  proba (ACPOWER) = 6.340e-003 (68106 cut sets)
  (68106 cut sets, 1 sec)
```

Reporting for ACPOWER

value = 6.340e-003

Event Importance Information

no	event	mean	f-v	rrw	raw	pd
1	EDG2DGAACF	9.350e-002	0.8343	6.0355	9.09	0.0566
2	%T3	3.680e-002	0.6507	2.8626	18.03	0.1121
3	EDG2DG1XXF	9.350e-002	0.2014	1.2521	2.95	0.0137
4	EDG2DG2XXF	9.350e-002	0.1961	1.2440	2.90	0.0133
5	EMM2CCFDGF	4.675e-003	0.0826	1.0900	18.59	0.1120
6	EMC27100XN	7.190e-003	0.0642	1.0686	9.86	0.0566
7	EDG2DGAACA	3.070e-003	0.0274	1.0282	9.90	0.0566
8	SMV215031N	9.230e-003	0.0199	1.0203	3.13	0.0137
9	SMV215042N	9.230e-003	0.0194	1.0197	3.08	0.0133
10	ESV27245XN	1.310e-003	0.0117	1.0118	9.91	0.0566
11	ESV27150XN	1.310e-003	0.0117	1.0118	9.91	0.0566
12	ESV27162XN	1.310e-003	0.0117	1.0118	9.91	0.0566
13	SFL2P4BIS	1.000e+000	0.0074	1.0074	1.00	0.0000
14	EDG2DG1XXA	3.070e-003	0.0066	1.0067	3.15	0.0137
15	EDG2DG2XXA	3.070e-003	0.0064	1.0065	3.09	0.0133
16	ECB2A1001D	6.450e-004	0.0058	1.0058	9.92	0.0566
17	EHX2E9XXXJ	6.262e-004	0.0056	1.0056	9.92	0.0566
18	EMF2VEF17F	5.638e-004	0.0050	1.0051	9.92	0.0566
19	EMF2VEF18F	5.638e-004	0.0050	1.0051	9.92	0.0566
20	EMP2P16AXA	2.320e-003	0.0050	1.0050	3.15	0.0137
21	EMP2P16BXA	2.320e-003	0.0049	1.0049	3.09	0.0133
22	EHX2E9XXXF	5.039e-004	0.0045	1.0045	9.92	0.0566
23	EMM2CCFFXA	2.320e-004	0.0041	1.0041	18.66	0.1120
24	EAV27239BN	2.110e-002	0.0040	1.0040	1.18	0.0012
25	EAV27239AN	2.110e-002	0.0040	1.0040	1.18	0.0012
26	T9PREREC	5.600e-002	0.0037	1.0037	1.06	0.0004
27	%T9	3.160e-002	0.0037	1.0037	1.11	0.0007
28	EDG0PER2	8.510e-002	0.0035	1.0035	1.04	0.0003
29	ESV228021N	1.310e-003	0.0028	1.0028	3.15	0.0137
30	ESV228222N	1.310e-003	0.0027	1.0028	3.10	0.0133
31	EMM2CCFDGA	1.535e-004	0.0027	1.0027	18.67	0.1120
32	%T14	1.040e-003	0.0022	1.0022	3.15	0.0137
33	%T15	1.040e-003	0.0022	1.0022	3.10	0.0133
34	ELS228011H	9.143e-004	0.0020	1.0020	3.15	0.0137
35	ELS228041H	9.143e-004	0.0020	1.0020	3.15	0.0137
36	ELS228242H	9.143e-004	0.0019	1.0019	3.10	0.0133
37	ELS228212H	9.143e-004	0.0019	1.0019	3.10	0.0133
38	EMP2P235XA	2.320e-003	0.0018	1.0018	1.76	0.0049
39	STF2SCRNSP	9.768e-005	0.0017	1.0017	18.67	0.1120
40	ECB2A112XD	6.450e-004	0.0014	1.0014	3.15	0.0137
41	EMP2P16AXF	6.430e-004	0.0014	1.0014	3.15	0.0137

42	ECB2A212XD	6.450e-004	0.0014	1.0014	3.10	0.0133
43	SMP2-2P4CF	6.430e-004	0.0013	1.0014	3.10	0.0133
44	EMP2P16BXF	6.430e-004	0.0013	1.0014	3.10	0.0133
45	SST2-2F6CP	6.382e-004	0.0013	1.0013	3.10	0.0133
46	EXV24AXXXK	6.215e-004	0.0013	1.0013	3.15	0.0137
47	EXV22AXXXK	6.215e-004	0.0013	1.0013	3.15	0.0137
48	SXV224AXXK	6.215e-004	0.0013	1.0013	3.15	0.0137
49	EXV22BXXK	6.215e-004	0.0013	1.0013	3.10	0.0133
50	SXV224BXXK	6.215e-004	0.0013	1.0013	3.10	0.0133
51	EXV24BXXK	6.215e-004	0.0013	1.0013	3.10	0.0133
52	%T7	1.000e-003	0.0013	1.0013	2.25	0.0080
53	T7REC	7.100e-002	0.0013	1.0013	1.02	0.0001
54	ETK2T25AXJ	1.325e-004	0.0012	1.0012	9.92	0.0566
55	EMM2CCFFXF	6.430e-005	0.0011	1.0011	18.67	0.1120
56	ECV23AXXXN	4.930e-004	0.0011	1.0011	3.15	0.0137
57	ECV23BXXN	4.930e-004	0.0010	1.0010	3.10	0.0133
58	ESV27100XN	1.310e-003	0.0010	1.0010	1.77	0.0049
59	DBT2D55AOF	1.010e-004	0.0009	1.0009	9.92	0.0566
60	%T10	3.940e-004	0.0008	1.0009	3.16	0.0137
61	%T12	3.940e-004	0.0008	1.0008	3.15	0.0137
62	%T13	3.940e-004	0.0008	1.0008	3.10	0.0133
63	%T11	3.940e-004	0.0008	1.0008	3.10	0.0133
64	ECB251M2XR	3.686e-004	0.0008	1.0008	3.15	0.0137
65	ECB261M2XR	3.686e-004	0.0008	1.0008	3.10	0.0133
66	ECV238XXXK	7.344e-005	0.0007	1.0007	9.92	0.0566
67	EMF2E9AXXA	7.500e-003	0.0005	1.0005	1.07	0.0005
68	EMF2E9BXXA	7.500e-003	0.0005	1.0005	1.07	0.0005
69	EMF2VEF18A	7.500e-003	0.0005	1.0005	1.07	0.0004
70	EMF2VEF17A	7.500e-003	0.0005	1.0005	1.07	0.0004
71	EMP2P235XF	6.430e-004	0.0005	1.0005	1.77	0.0049
72	ET12X46XXF	6.048e-005	0.0004	1.0004	6.80	0.0368
73	EXV212XXXK	3.768e-005	0.0003	1.0003	9.92	0.0566
74	EXV237XXXK	3.768e-005	0.0003	1.0003	9.92	0.0566
75	DCS20D55AR	3.384e-005	0.0003	1.0003	9.92	0.0566
76	ETK2T30AXG	1.325e-004	0.0003	1.0003	3.15	0.0137
77	ETK2T57AXG	1.325e-004	0.0003	1.0003	3.15	0.0137
78	ETK2T57BXG	1.325e-004	0.0003	1.0003	3.10	0.0133
79	ETK2T30BXG	1.325e-004	0.0003	1.0003	3.10	0.0133
80	SWREC	2.100e-002	0.0003	1.0003	1.01	0.0001
81	SMV215031K	1.277e-004	0.0003	1.0003	3.15	0.0137
82	%T8	3.160e-002	0.0003	1.0003	1.01	0.0001
83	T8PREREC	1.400e-001	0.0003	1.0003	1.00	0.0000
84	SMV214742K	1.277e-004	0.0003	1.0003	3.10	0.0133
85	SMV215042K	1.277e-004	0.0003	1.0003	3.10	0.0133
86	DBT2D11AOF	1.010e-004	0.0002	1.0002	3.15	0.0137
87	DBT2D12AOF	1.010e-004	0.0002	1.0002	3.10	0.0133
88	ECB2A1001R	2.234e-005	0.0002	1.0002	9.92	0.0566
89	ECD22103XR	9.120e-005	0.0002	1.0002	3.15	0.0137
90	DCD22304XR	9.120e-005	0.0002	1.0002	3.15	0.0137
91	ECD22308XR	9.120e-005	0.0002	1.0002	3.15	0.0137
92	ECD22203XR	9.120e-005	0.0002	1.0002	3.10	0.0133
93	DCD22404XR	9.120e-005	0.0002	1.0002	3.10	0.0133
94	ECD22408XR	9.120e-005	0.0002	1.0002	3.10	0.0133
95	ESV228021K	8.760e-005	0.0002	1.0002	3.15	0.0137
96	ESV228222K	8.760e-005	0.0002	1.0002	3.10	0.0133
97	ERE2A3X2UE	7.650e-005	0.0002	1.0002	3.15	0.0137

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

98	ERE2A4X2UE	7.650e-005	0.0002	1.0002	3.10	0.0133
99	ECV23AXXXK	7.344e-005	0.0002	1.0002	3.15	0.0137
100	SCV22SW2CK	7.344e-005	0.0002	1.0002	3.10	0.0133

Final Cut Sets

no	value	f-v	acc	cut sets
1	3.441e-003	0.5427	0.5427	%T3 EDG2DGAACF
2	8.174e-004	0.1289	0.6716	EDG2DGAACF EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
3	4.371e-004	0.0689	0.7406	EDG2DGAACF EMM2CCFDGF
4	2.646e-004	0.0417	0.7823	%T3 EMC27100XN
5	1.130e-004	0.0178	0.8001	%T3 EDG2DGAACA
6	8.069e-005	0.0127	0.8128	SMV215042N EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
7	8.069e-005	0.0127	0.8256	SMV215031N EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
8	6.286e-005	0.0099	0.8355	EMC27100XN EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
9	4.821e-005	0.0076	0.8431	%T3 ESV27245XN
10	4.821e-005	0.0076	0.8507	%T3 ESV27150XN
11	4.821e-005	0.0076	0.8583	%T3 ESV27162XN
12	3.361e-005	0.0053	0.8636	EMC27100XN EMM2CCFDGF
13	2.684e-005	0.0042	0.8678	EDG2DG2XXA EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
14	2.684e-005	0.0042	0.8721	EDG2DGAACA EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
15	2.684e-005	0.0042	0.8763	EDG2DG1XXA EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
16	2.374e-005	0.0037	0.8800	%T3 ECB2A1001D
17	2.304e-005	0.0036	0.8837	%T3 EHX2E9XXXJ
18	2.169e-005	0.0034	0.8871	EDG2DGAACF EMM2CCFFXA
19	2.075e-005	0.0033	0.8904	%T3 EMF2VEF18F
20	2.075e-005	0.0033	0.8936	%T3 EMF2VEF17F
21	2.028e-005	0.0032	0.8968	EMP2P16AXA EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
22	2.028e-005	0.0032	0.9000	EMP2P16BXA EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
23	1.854e-005	0.0029	0.9030	%T3 EHX2E9XXXF
24	1.638e-005	0.0026	0.9055	%T3 EAV27239BN EAV27239AN
25	1.547e-005	0.0024	0.9080	SFL2P4BIS T9PREREC %T9 EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
26	1.435e-005	0.0023	0.9102	EDG2DGAACF EMM2CCFDGA
27	1.435e-005	0.0023	0.9125	EDG2DGAACA EMM2CCFDGF
28	1.145e-005	0.0018	0.9143	ESV228021N EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
29	1.145e-005	0.0018	0.9161	ESV27245XN EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
30	1.145e-005	0.0018	0.9179	ESV228222N EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
31	1.145e-005	0.0018	0.9197	ESV27150XN EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
32	1.145e-005	0.0018	0.9215	ESV27162XN EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
33	9.133e-006	0.0014	0.9230	STF2SCRNSP EDG2DGAACF
34	9.092e-006	0.0014	0.9244	%T14 EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
35	9.092e-006	0.0014	0.9258	%T15 EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
36	7.993e-006	0.0013	0.9271	ELS228011H EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
37	7.993e-006	0.0013	0.9284	ELS228212H EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
38	7.993e-006	0.0013	0.9296	ELS228242H EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
39	7.993e-006	0.0013	0.9309	ELS228041H EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
40	7.966e-006	0.0013	0.9321	SMV215031N SMV215042N EDG2DGAACF
41	7.265e-006	0.0011	0.9333	%T3 EMP2P235XA EDG0PER2
42	6.639e-006	0.0010	0.9343	T7REC %T7 EDG2DGAACF
43	6.205e-006	0.0010	0.9353	SMV215042N EMC27100XN EDG2DG1XXF
44	6.205e-006	0.0010	0.9363	SMV215031N EMC27100XN EDG2DG2XXF
45	6.124e-006	0.0010	0.9373	ESV27162XN EMM2CCFDGF
46	6.124e-006	0.0010	0.9382	ESV27245XN EMM2CCFDGF
47	6.124e-006	0.0010	0.9392	ESV27150XN EMM2CCFDGF

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

```
48 6.012e-006 0.0009 0.9401 EDG2DGAACF EMM2CCFFXF
49 5.639e-006 0.0009 0.9410 ECB2A1001D EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
50 5.639e-006 0.0009 0.9419 ECB2A212XD EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
51 5.639e-006 0.0009 0.9428 ECB2A112XD EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
52 5.621e-006 0.0009 0.9437 EMP2P16BXF EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
53 5.621e-006 0.0009 0.9446 SFL2P4BIS SMP2-2P4CF EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
54 5.621e-006 0.0009 0.9455 EMP2P16AXF EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
55 5.579e-006 0.0009 0.9463 SFL2P4BIS SST2-2F6CP EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
56 5.474e-006 0.0009 0.9472 EHX2E9XXXJ EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
57 5.433e-006 0.0009 0.9481 EXV22BXXXX EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
58 5.433e-006 0.0009 0.9489 EXV22AXXXX EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
59 5.433e-006 0.0009 0.9498 EXV24BXXXX EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
60 5.433e-006 0.0009 0.9506 EXV24AXXXX EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
61 5.433e-006 0.0009 0.9515 SXV224AXXX EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
62 5.433e-006 0.0009 0.9524 SXV224BXXX EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
63 4.929e-006 0.0008 0.9531 EMF2VEF17F EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
64 4.929e-006 0.0008 0.9539 EMF2VEF18F EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
65 4.876e-006 0.0008 0.9547 %T3 ETK2T25AXJ
66 4.405e-006 0.0007 0.9554 EHX2E9XXXF EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
67 4.310e-006 0.0007 0.9561 ECV23BXXXN EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
68 4.310e-006 0.0007 0.9567 ECV23AXXXN EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
69 4.103e-006 0.0006 0.9574 %T3 ESV27100XN EDGOPER2
70 3.892e-006 0.0006 0.9580 EAV27239BN EAV27239AN EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
71 3.717e-006 0.0006 0.9586 %T3 DBT2D55A0F
72 3.444e-006 0.0005 0.9591 %T10 EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
73 3.444e-006 0.0005 0.9597 %T11 EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
74 3.444e-006 0.0005 0.9602 %T12 EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
75 3.444e-006 0.0005 0.9608 %T13 EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
76 3.222e-006 0.0005 0.9613 ECB251M2XR EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
77 3.222e-006 0.0005 0.9618 ECB261M2XR EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
78 3.015e-006 0.0005 0.9622 ECB2A1001D EMM2CCFDGF
79 2.927e-006 0.0005 0.9627 EHX2E9XXXJ EMM2CCFDGF
80 2.703e-006 0.0004 0.9631 %T3 ECV238XXXK
81 2.649e-006 0.0004 0.9636 SMV215042N EDG2DGAACA EDG2DG1XXF
82 2.649e-006 0.0004 0.9640 EDG2DG1XXA SMV215042N EDG2DGAACF
83 2.649e-006 0.0004 0.9644 SMV215031N EDG2DGAACA EDG2DG2XXF
84 2.649e-006 0.0004 0.9648 EDG2DG2XXA SMV215031N EDG2DGAACF
85 2.636e-006 0.0004 0.9652 EMF2VEF17F EMM2CCFDGF
86 2.636e-006 0.0004 0.9656 EMF2VEF18F EMM2CCFDGF
87 2.356e-006 0.0004 0.9660 EHX2E9XXXF EMM2CCFDGF
88 2.226e-006 0.0004 0.9664 %T3 ET12X46XXF
89 2.081e-006 0.0003 0.9667 EAV27239BN EAV27239AN EMM2CCFDGF
90 2.070e-006 0.0003 0.9670 %T3 EMF2VEF17A EMF2VEF18A
91 2.070e-006 0.0003 0.9673 %T3 EMF2E9BXXA EMF2E9AXXA
92 2.064e-006 0.0003 0.9677 EDG2DG2XXA EMC27100XN EDG2DG1XXF
93 2.064e-006 0.0003 0.9680 EDG2DG1XXA EMC27100XN EDG2DG2XXF
94 2.014e-006 0.0003 0.9683 %T3 EMP2P235XF EDGOPER2
95 2.002e-006 0.0003 0.9686 EMP2P16BXA SMV215031N EDG2DGAACF
96 2.002e-006 0.0003 0.9689 EMP2P16AXA SMV215042N EDG2DGAACF
97 1.726e-006 0.0003 0.9692 EMP2P235XA EDGOPER2 EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
98 1.668e-006 0.0003 0.9695 EMC27100XN EMM2CCFFXA
99 1.560e-006 0.0002 0.9697 EMP2P16BXA EMC27100XN EDG2DG1XXF
100 1.560e-006 0.0002 0.9700 EMP2P16AXA EMC27100XN EDG2DG2XXF
```

Execution time 2 seconds (gen:0, exp:0, abs:1), Return Code = 1

C2 CHRGR – KIRAP

GENPRG (CHRGR / PROBA * 1.000e-012 / REPORT * 1.000e+002
 proba (CHRGR) = 1.173e-004 (68990 cut sets)
 (68990 cut sets, 3 sec)

Reporting for CHRGR

value = 1.173e-004

Event Importance Information

no	event	mean	f-v	rrw	raw	pd
1	%T3	3.680e-002	0.9587	24.1926	26.09	0.0031
2	DFLB54-D34	1.000e+000	0.9245	13.2479	1.00	0.0001
3	EDG2DG1XXF	9.350e-002	0.5473	2.2091	6.31	0.0007
4	EDGOPER1	1.230e-001	0.4864	1.9469	4.47	0.0005
5	EDG2DG2XXF	9.350e-002	0.4825	1.9323	5.68	0.0006
6	EDG2DGAACF	9.350e-002	0.3975	1.6598	4.85	0.0005
7	ERECA3/A4	2.630e-001	0.3752	1.6005	2.05	0.0002
8	ERECB5/B6	2.600e-001	0.3717	1.5915	2.06	0.0002
9	EMM2CCFDGF	4.675e-003	0.2032	1.2549	44.25	0.0051
10	OPER-15	7.900e-002	0.0735	1.0793	1.86	0.0001
11	SMV215042N	9.230e-003	0.0669	1.0718	8.19	0.0009
12	SMV215031N	9.230e-003	0.0555	1.0588	6.96	0.0007
13	SFL2P4BIS	1.000e+000	0.0474	1.0498	1.00	0.0000
14	%T14	1.040e-003	0.0339	1.0351	33.58	0.0038
15	%T15	1.040e-003	0.0292	1.0301	29.08	0.0033
16	EMC27100XN	7.190e-003	0.0284	1.0292	4.92	0.0005
17	EDG2DG2XXA	3.070e-003	0.0223	1.0228	8.23	0.0009
18	EDG2DG1XXA	3.070e-003	0.0185	1.0188	6.99	0.0007
19	EMP2P16BXA	2.320e-003	0.0168	1.0171	8.23	0.0009
20	SMP2-2P4CA	2.320e-003	0.0168	1.0171	8.23	0.0009
21	EMM2CCFFXA	2.320e-004	0.0157	1.0160	68.76	0.0080
22	EMP2P16AXA	2.320e-003	0.0139	1.0141	7.00	0.0007
23	%T9	3.160e-002	0.0128	1.0130	1.39	0.0000
24	T9PREREC	5.600e-002	0.0128	1.0130	1.22	0.0000
25	EDG2DGAACA	3.070e-003	0.0121	1.0123	4.94	0.0005
26	%T10	3.940e-004	0.0118	1.0120	31.03	0.0035
27	%T12	3.940e-004	0.0118	1.0120	30.98	0.0035
28	%T13	3.940e-004	0.0111	1.0112	29.04	0.0033
29	%T11	3.940e-004	0.0111	1.0112	29.04	0.0033
30	EMM2CCFDGA	1.535e-004	0.0104	1.0105	68.76	0.0080
31	ESV228222N	1.310e-003	0.0095	1.0096	8.24	0.0009
32	ESV228021N	1.310e-003	0.0079	1.0079	7.00	0.0007
33	ECB2A309XD	6.450e-004	0.0068	1.0068	11.46	0.0012
34	ECB2A308XD	6.450e-004	0.0068	1.0068	11.46	0.0012
35	ECB2A408XD	6.450e-004	0.0067	1.0068	11.44	0.0012
36	ECB2A409XD	6.450e-004	0.0067	1.0068	11.44	0.0012
37	ELS228242H	9.143e-004	0.0066	1.0067	8.24	0.0009
38	ELS228212H	9.143e-004	0.0066	1.0067	8.24	0.0009
39	ELS228041H	9.143e-004	0.0055	1.0055	7.00	0.0007
40	ELS228011H	9.143e-004	0.0055	1.0055	7.00	0.0007
41	ESV27245XN	1.310e-003	0.0052	1.0052	4.94	0.0005

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

42	ESV27150XN	1.310e-003	0.0052	1.0052	4.94	0.0005
43	ESV27162XN	1.310e-003	0.0052	1.0052	4.94	0.0005
44	T7REC	7.100e-002	0.0048	1.0048	1.06	0.0000
45	%T7	1.000e-003	0.0048	1.0048	5.81	0.0006
46	SCB22A402D	6.450e-004	0.0047	1.0047	8.24	0.0008
47	SV224BXXK	6.215e-004	0.0045	1.0045	8.24	0.0008
48	EXV24BXXK	6.215e-004	0.0045	1.0045	8.24	0.0008
49	EXV22BXXK	6.215e-004	0.0045	1.0045	8.24	0.0008
50	STF2SCRNSP	9.768e-005	0.0042	1.0043	44.42	0.0051
51	DBC202D32F	2.688e-004	0.0038	1.0038	15.06	0.0016
52	EMP2P16AXF	6.430e-004	0.0038	1.0038	6.84	0.0007
53	EXV24AXXXK	6.215e-004	0.0037	1.0037	7.00	0.0007
54	EXV22AXXXK	6.215e-004	0.0037	1.0037	7.00	0.0007
55	SV224AXXK	6.215e-004	0.0037	1.0037	7.00	0.0007
56	ECV23BXXN	4.930e-004	0.0036	1.0036	8.24	0.0008
57	SCV22SW2CN	4.930e-004	0.0036	1.0036	8.24	0.0008
58	SMP2-2P4CF	6.430e-004	0.0033	1.0033	6.14	0.0006
59	EMP2P16BXF	6.430e-004	0.0033	1.0033	6.14	0.0006
60	SST2-2F6CP	6.382e-004	0.0033	1.0033	6.14	0.0006
61	ECV23AXXXN	4.930e-004	0.0030	1.0030	7.00	0.0007
62	EMM2CCFFXF	6.430e-005	0.0028	1.0028	44.40	0.0051
63	ECB261M2XR	3.686e-004	0.0027	1.0027	8.24	0.0008
64	EHX2E9XXXJ	6.262e-004	0.0027	1.0027	5.23	0.0005
65	ECB2A1001D	6.450e-004	0.0025	1.0025	4.94	0.0005
66	EMF2VEF18F	5.638e-004	0.0024	1.0024	5.23	0.0005
67	EMF2VEF17F	5.638e-004	0.0024	1.0024	5.23	0.0005
68	ECB251M2XR	3.686e-004	0.0022	1.0022	7.00	0.0007
69	EHX2E9XXXF	5.039e-004	0.0021	1.0021	5.23	0.0005
70	ET12X25XXF	6.048e-005	0.0020	1.0020	33.56	0.0038
71	EAV27239AN	2.110e-002	0.0018	1.0018	1.08	0.0000
72	EAV27239BN	2.110e-002	0.0018	1.0018	1.08	0.0000
73	ET12X26XXF	6.048e-005	0.0017	1.0017	29.06	0.0033
74	ERE2309PRK	1.560e-004	0.0016	1.0016	11.45	0.0012
75	ERE2409PRK	1.560e-004	0.0016	1.0016	11.43	0.0012
76	EDGOPER2	8.510e-002	0.0015	1.0015	1.02	0.0000
77	DCD200224R	9.120e-005	0.0013	1.0013	15.05	0.0016
78	SWREC	2.100e-002	0.0012	1.0012	1.06	0.0000
79	DBT2D11AOF	1.010e-004	0.0011	1.0011	11.44	0.0012
80	DBT2D12AOF	1.010e-004	0.0011	1.0011	11.43	0.0012
81	ECB2A410XD	6.450e-004	0.0010	1.0010	2.50	0.0002
82	DCD22304XR	9.120e-005	0.0010	1.0010	11.44	0.0012
83	DCD22404XR	9.120e-005	0.0010	1.0010	11.42	0.0012
84	SMV215042K	1.277e-004	0.0009	1.0009	8.22	0.0008
85	ECB2613XXD	6.450e-004	0.0009	1.0009	2.42	0.0002
86	ECB2513XXD	6.450e-004	0.0009	1.0009	2.42	0.0002
87	ECB2A310XD	6.450e-004	0.0009	1.0009	2.42	0.0002
88	DCD200111D	8.830e-004	0.0008	1.0008	1.91	0.0001
89	DCD200211D	8.830e-004	0.0008	1.0008	1.91	0.0001
90	EMP2P235XA	2.320e-003	0.0008	1.0008	1.34	0.0000
91	ETK2T30AXG	1.325e-004	0.0008	1.0008	6.81	0.0007
92	ETK2T57AXG	1.325e-004	0.0008	1.0008	6.81	0.0007
93	SMV215031K	1.277e-004	0.0008	1.0008	6.98	0.0007
94	T8PREREC	1.400e-001	0.0007	1.0007	1.00	0.0000
95	%T8	3.160e-002	0.0007	1.0007	1.02	0.0000
96	ECB2512XXR	2.234e-005	0.0007	1.0007	33.52	0.0038
97	ECB2A301XR	2.234e-005	0.0007	1.0007	33.52	0.0038

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

```

98 ETK2T30BXG 1.325e-004 0.0007 1.0007 6.12 0.0006
99 ETK2T57BXG 1.325e-004 0.0007 1.0007 6.12 0.0006
100 SMV214742K 1.277e-004 0.0007 1.0007 6.12 0.0006

```

Final Cut Sets

no	value	f-v	acc	cut sets
1	1.041e-005	0.0887	0.0887	%T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 EDGOPER1 EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
2	1.029e-005	0.0877	0.1764	%T3 DFLB54-D34 ERECB5/B6 EDGOPER1 EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
3	7.911e-006	0.0674	0.2438	%T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 EDG2DGAACF EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
4	7.821e-006	0.0667	0.3105	%T3 DFLB54-D34 EDG2DGAACF ERECB5/B6 EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
5	5.565e-006	0.0474	0.3579	%T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 EDGOPER1 EMM2CCFDGF
6	5.502e-006	0.0469	0.4048	%T3 DFLB54-D34 ERECB5/B6 EDGOPER1 EMM2CCFDGF
7	4.231e-006	0.0361	0.4408	%T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 EDG2DGAACF EMM2CCFDGF
8	4.182e-006	0.0356	0.4765	%T3 DFLB54-D34 EDG2DGAACF ERECB5/B6 EMM2CCFDGF
9	2.969e-006	0.0253	0.5018	%T3 DFLB54-D34 SMV215042N EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
10	1.082e-006	0.0092	0.5110	%T14 %T15 DFLB54-D34
11	1.050e-006	0.0090	0.5200	%T3 DFLB54-D34 EDGOPER1 EMM2CCFFXA
12	1.027e-006	0.0088	0.5287	%T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 SMV215031N EDGOPER1 EDG2DG2XXF
13	1.027e-006	0.0088	0.5375	%T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 SMV215042N EDGOPER1 EDG2DG1XXF
14	1.016e-006	0.0087	0.5461	%T3 DFLB54-D34 SMV215031N ERECB5/B6 EDGOPER1 EDG2DG2XXF
15	1.016e-006	0.0087	0.5548	%T3 DFLB54-D34 SMV215042N ERECB5/B6 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
16	9.877e-007	0.0084	0.5632	%T3 EDG2DG2XXA DFLB54-D34 EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
17	8.222e-007	0.0070	0.5702	%T3 ERECA3/A4 OPER-15 EDGOPER1 EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
18	8.128e-007	0.0069	0.5771	%T3 OPER-15 ERECB5/B6 EDGOPER1 EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
19	7.810e-007	0.0067	0.5838	%T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 SMV215031N EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
20	7.721e-007	0.0066	0.5904	%T3 DFLB54-D34 SMV215031N EDG2DGAACF ERECB5/B6 EDG2DG2XXF
21	7.464e-007	0.0064	0.5967	EMP2P16BXA %T3 DFLB54-D34 EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
22	7.464e-007	0.0064	0.6031	%T3 SFL2P4BIS DFLB54-D34 SMP2-2P4CA EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
23	6.948e-007	0.0059	0.6090	%T3 DFLB54-D34 EDGOPER1 EMM2CCFDGA
24	6.250e-007	0.0053	0.6143	%T3 ERECA3/A4 OPER-15 EDG2DGAACF EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
25	6.179e-007	0.0053	0.6196	%T3 OPER-15 EDG2DGAACF ERECB5/B6 EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
26	6.084e-007	0.0052	0.6248	%T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 EMC27100XN EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
27	6.014e-007	0.0051	0.6299	%T3 DFLB54-D34 EMC27100XN ERECB5/B6 EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
28	5.693e-007	0.0049	0.6348	%T3 SFL2P4BIS DFLB54-D34 T9PREREC %T9 EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
29	4.401e-007	0.0038	0.6385	%T3 %T15 DFLB54-D34 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
30	4.401e-007	0.0038	0.6423	%T3 %T14 DFLB54-D34 EDGOPER1 EDG2DG2XXF
31	4.397e-007	0.0037	0.6460	%T3 ERECA3/A4 OPER-15 EDGOPER1 EMM2CCFDGF
32	4.346e-007	0.0037	0.6497	%T3 OPER-15 ERECB5/B6 EDGOPER1 EMM2CCFDGF
33	4.214e-007	0.0036	0.6533	%T3 DFLB54-D34 ESV228222N EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
34	4.098e-007	0.0035	0.6568	%T15 DFLB54-D34 %T10
35	4.098e-007	0.0035	0.6603	%T14 DFLB54-D34 %T11
36	4.098e-007	0.0035	0.6638	%T14 DFLB54-D34 %T13
37	4.098e-007	0.0035	0.6673	%T15 DFLB54-D34 %T12
38	3.856e-007	0.0033	0.6706	%T3 DFLB54-D34 SMV215031N SMV215042N EDGOPER1
39	3.417e-007	0.0029	0.6735	%T3 ERECA3/A4 EDG2DG2XXA DFLB54-D34 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
40	3.417e-007	0.0029	0.6764	%T3 ERECA3/A4 EDG2DG1XXA DFLB54-D34 EDGOPER1 EDG2DG2XXF
41	3.378e-007	0.0029	0.6793	%T3 EDG2DG1XXA DFLB54-D34 ERECB5/B6 EDGOPER1 EDG2DG2XXF
42	3.378e-007	0.0029	0.6822	%T3 EDG2DG2XXA DFLB54-D34 ERECB5/B6 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
43	3.346e-007	0.0029	0.6850	%T3 %T15 DFLB54-D34 EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
44	3.346e-007	0.0029	0.6879	%T3 %T14 DFLB54-D34 EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
45	3.342e-007	0.0028	0.6907	%T3 ERECA3/A4 OPER-15 EDG2DGAACF EMM2CCFDGF
46	3.304e-007	0.0028	0.6935	%T3 OPER-15 EDG2DGAACF ERECB5/B6 EMM2CCFDGF
47	3.253e-007	0.0028	0.6963	%T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 EMC27100XN EMM2CCFDGF

```
48 3.216e-007 0.0027 0.6990 %T3 DFLB54-D34 EMC27100XN ERECB5/B6 EMM2CCFDGF
49 3.214e-007 0.0027 0.7018 %T3 DFLB54-D34 T7REC %T7 EDGOPER1
50 2.941e-007 0.0025 0.7043 %T3 DFLB54-D34 ELS228242H EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
51 2.941e-007 0.0025 0.7068 ELS228212H %T3 DFLB54-D34 EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
52 2.796e-007 0.0024 0.7092 %T14 DFLB54-D34 DBC202D32F
53 2.730e-007 0.0023 0.7115 %T3 DFLB54-D34 ECB2A408XD EDGOPER1 EDG2DG1XXF
54 2.730e-007 0.0023 0.7138 %T3 DFLB54-D34 ECB2A409XD EDGOPER1 EDG2DG1XXF
55 2.730e-007 0.0023 0.7162 %T3 DFLB54-D34 ECB2A309XD EDGOPER1 EDG2DG2XXF
56 2.730e-007 0.0023 0.7185 %T3 DFLB54-D34 ECB2A308XD EDGOPER1 EDG2DG2XXF
57 2.598e-007 0.0022 0.7207 %T3 ERECA3/A4 EDG2DG1XXA DFLB54-D34 EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
58 2.598e-007 0.0022 0.7229 %T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 EDG2DGAACA EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
59 2.582e-007 0.0022 0.7251 %T3 ERECA3/A4 SFL2P4BIS DFLB54-D34 SMP2-2P4CA EDGOPER1 EDG2DG1XXF
60 2.582e-007 0.0022 0.7273 EMP2P16BXA %T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
61 2.582e-007 0.0022 0.7295 EMP2P16AXA %T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 EDGOPER1 EDG2DG2XXF
62 2.568e-007 0.0022 0.7317 %T3 EDG2DG1XXA DFLB54-D34 EDG2DGAACF ERECB5/B6 EDG2DG2XXF
63 2.568e-007 0.0022 0.7339 %T3 DFLB54-D34 EDG2DGAACA ERECB5/B6 EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
64 2.553e-007 0.0022 0.7361 EMP2P16BXA %T3 DFLB54-D34 ERECB5/B6 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
65 2.553e-007 0.0022 0.7382 EMP2P16AXA %T3 DFLB54-D34 ERECB5/B6 EDGOPER1 EDG2DG2XXF
66 2.553e-007 0.0022 0.7404 %T3 SFL2P4BIS DFLB54-D34 SMP2-2P4CA ERECB5/B6 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
67 2.346e-007 0.0020 0.7424 %T3 OPER-15 SMV215042N EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
68 2.099e-007 0.0018 0.7442 %T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 EDG2DGAACF EMM2CCFFXA
69 2.075e-007 0.0018 0.7460 %T3 DFLB54-D34 EDG2DGAACF ERECB5/B6 EMM2CCFFXA
70 2.075e-007 0.0018 0.7477 %T3 DFLB54-D34 EDG2DGAACF ECB2A309XD EDG2DG2XXF
71 2.075e-007 0.0018 0.7495 %T3 DFLB54-D34 EDG2DGAACF ECB2A409XD EDG2DG1XXF
72 2.075e-007 0.0018 0.7513 %T3 DFLB54-D34 EDG2DGAACF ECB2A308XD EDG2DG2XXF
73 2.075e-007 0.0018 0.7531 %T3 DFLB54-D34 EDG2DGAACF ECB2A408XD EDG2DG1XXF
74 2.075e-007 0.0018 0.7548 %T3 SFL2P4BIS DFLB54-D34 SCB22A402D EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
75 1.999e-007 0.0017 0.7565 %T3 DFLB54-D34 SXV224BXXK EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
76 1.999e-007 0.0017 0.7582 %T3 DFLB54-D34 EXV22BXXXK EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
77 1.999e-007 0.0017 0.7599 EXV24BXXXK %T3 DFLB54-D34 EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
78 1.970e-007 0.0017 0.7616 %T3 ERECA3/A4 SFL2P4BIS DFLB54-D34 T9PREREC %T9 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
79 1.963e-007 0.0017 0.7633 EMP2P16AXA %T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
80 1.947e-007 0.0017 0.7649 %T3 SFL2P4BIS DFLB54-D34 T9PREREC %T9 ERECB5/B6 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
81 1.941e-007 0.0017 0.7666 EMP2P16AXA %T3 DFLB54-D34 EDG2DGAACF ERECB5/B6 EDG2DG2XXF
82 1.667e-007 0.0014 0.7680 %T3 DFLB54-D34 %T10 EDGOPER1 EDG2DG2XXF
83 1.667e-007 0.0014 0.7694 %T3 DFLB54-D34 %T11 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
84 1.667e-007 0.0014 0.7709 %T3 DFLB54-D34 %T13 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
85 1.667e-007 0.0014 0.7723 %T3 DFLB54-D34 %T12 EDGOPER1 EDG2DG2XXF
86 1.586e-007 0.0014 0.7736 %T3 DFLB54-D34 ECV23BXXXN EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
87 1.586e-007 0.0014 0.7750 %T3 SFL2P4BIS DFLB54-D34 SCV22SW2CN EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
88 1.552e-007 0.0013 0.7763 DFLB54-D34 %T12 %T13
89 1.552e-007 0.0013 0.7776 DFLB54-D34 %T12 %T11
90 1.552e-007 0.0013 0.7790 DFLB54-D34 %T11 %T10
91 1.552e-007 0.0013 0.7803 DFLB54-D34 %T10 %T13
92 1.485e-007 0.0013 0.7815 %T3 DFLB54-D34 SMV215042N EDG2DGAACF EMM2CCFDGF
93 1.458e-007 0.0012 0.7828 %T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 ESV228021N EDGOPER1 EDG2DG2XXF
94 1.458e-007 0.0012 0.7840 %T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 ESV228222N EDGOPER1 EDG2DG1XXF
95 1.441e-007 0.0012 0.7853 %T3 DFLB54-D34 ESV228021N ERECB5/B6 EDGOPER1 EDG2DG2XXF
96 1.441e-007 0.0012 0.7865 %T3 DFLB54-D34 ESV228222N ERECB5/B6 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
97 1.389e-007 0.0012 0.7877 %T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 EDG2DGAACF EMM2CCFDGA
98 1.389e-007 0.0012 0.7889 %T3 ERECA3/A4 DFLB54-D34 EDG2DGAACA EMM2CCFDGF
99 1.373e-007 0.0012 0.7900 %T3 DFLB54-D34 EDG2DGAACA ERECB5/B6 EMM2CCFDGF
100 1.373e-007 0.0012 0.7912 %T3 DFLB54-D34 EDG2DGAACF ERECB5/B6 EMM2CCFDGA
```

Execution time 4 seconds (gen:0, exp:1, abs:2), Return Code = 1

C3 DCPOWER – KIRAP

```
GENPRG ( DCPOWER / PROBA * 1.000e-012 / REPORT * 1.000e+002
  proba (DCPOWER) = 1.561e-007 (4 cut sets)
(4 cut sets, 0 sec)
```

Reporting for DCPOWER

value = 1.561e-007

Event Importance Information

no	event	mean	f-v	rrw	raw	pd
1	%T11	3.940e-004	0.9973	365.8195	2531.14	0.0004
2	%T10	3.940e-004	0.9973	365.8195	2531.14	0.0004
3	DBD202D02F	1.080e-006	0.0027	1.0027	2532.13	0.0004
4	DBD202D01F	1.080e-006	0.0027	1.0027	2532.13	0.0004

Final Cut Sets

no	value	f-v	acc	cut sets
1	1.552e-007	0.9945	0.9945	%T11 %T10
2	4.255e-010	0.0027	0.9973	DBD202D02F %T10
3	4.255e-010	0.0027	1.0000	%T11 DBD202D01F
4	1.166e-012	0.0000	1.0000	DBD202D02F DBD202D01F

Execution time 0 seconds (gen:0, exp:0, abs:0), Return Code = 1

C4 EFW – KIRAP

GENPRG (EFW / PROBA * 1.000e-012 / REPORT * 1.000e+002
 proba (EFW) = 1.107e-003 (114966 cut sets)
 (114966 cut sets, 5 sec)

Reporting for EFW

value = 1.107e-003

Event Importance Information

no	event	mean	f-v	rrw	raw	pd
1	QTP202P7AF	1.434e-001	0.8358	6.0913	5.99	0.0065
2	QMP202P7BA	2.317e-003	0.3506	1.5398	151.95	0.1675
3	QMP202P7BF	6.430e-004	0.0973	1.1078	152.21	0.1675
4	QXV2EFW3BK	5.652e-004	0.0855	1.0935	152.22	0.1675
5	QHF2REFILL	1.200e-002	0.0757	1.0819	7.23	0.0070
6	QCV2EFW4BN	4.929e-004	0.0746	1.0806	152.23	0.1675
7	%T3	3.680e-002	0.0735	1.0793	2.92	0.0022
8	%T10	3.940e-004	0.0596	1.0634	152.33	0.1676
9	%T12	3.940e-004	0.0596	1.0634	152.33	0.1676
10	PMV2CV340N	9.188e-003	0.0536	1.0566	6.78	0.0065
11	EDG2DG1XXF	9.350e-002	0.0512	1.0539	1.50	0.0006
12	QCB20A311R	3.352e-004	0.0507	1.0534	152.25	0.1675
13	QTP202P7AA	7.244e-003	0.0422	1.0441	6.79	0.0065
14	ERECA3/A4	2.630e-001	0.0418	1.0437	1.12	0.0002
15	EDGOPER1	1.230e-001	0.0389	1.0405	1.28	0.0004
16	SXV2SW39AK	1.017e-002	0.0377	1.0392	4.67	0.0041
17	QMV200716N	9.188e-003	0.0341	1.0353	4.68	0.0041
18	QMV200789C	9.188e-003	0.0341	1.0353	4.68	0.0041
19	EDG2DGAACF	9.350e-002	0.0296	1.0305	1.29	0.0004
20	QMV200789K	3.823e-003	0.0185	1.0189	5.82	0.0054
21	EDG2DG2XXF	9.350e-002	0.0167	1.0170	1.16	0.0002
22	DCD22304XR	9.120e-005	0.0138	1.0140	152.32	0.1675
23	QMV2CV707K	1.915e-003	0.0121	1.0122	7.30	0.0070
24	QCV2EFW4BK	7.344e-005	0.0111	1.0112	152.29	0.1675
25	PSV2SV205N	1.309e-003	0.0076	1.0077	6.82	0.0065
26	QSV2SV317N	1.309e-003	0.0076	1.0077	6.82	0.0065
27	EMM2CCFDGF	4.675e-003	0.0071	1.0072	2.52	0.0017
28	SXV2SW39BK	1.017e-002	0.0060	1.0061	1.59	0.0007
29	QMV200795C	9.188e-003	0.0054	1.0055	1.59	0.0007
30	QMV200711N	9.188e-003	0.0054	1.0055	1.59	0.0007
31	SMV215031N	9.230e-003	0.0051	1.0051	1.54	0.0006
32	%T14	1.040e-003	0.0045	1.0045	5.28	0.0047
33	OPER-18RM	7.200e-003	0.0043	1.0044	1.60	0.0007
34	OPER-18M	7.200e-003	0.0043	1.0044	1.60	0.0007
35	SFL2P4BIS	1.000e+000	0.0040	1.0041	1.00	0.0000
36	QXV200802K	5.652e-004	0.0036	1.0036	7.30	0.0070
37	QXV2CT005K	5.652e-004	0.0036	1.0036	7.30	0.0070
38	QXV2EFW3AK	5.652e-004	0.0033	1.0033	6.82	0.0065
39	QXV2EFW20K	5.652e-004	0.0033	1.0033	6.82	0.0065
40	QXV2EFW21K	5.652e-004	0.0033	1.0033	6.82	0.0065
41	QCV2EFW16N	4.929e-004	0.0031	1.0031	7.30	0.0070

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

42	QCV2EFW01N	4.929e-004	0.0031	1.0031	7.30	0.0070
43	QCV200801N	4.929e-004	0.0031	1.0031	7.30	0.0070
44	QCV2EFW4AN	4.929e-004	0.0029	1.0029	6.82	0.0065
45	%T11	3.940e-004	0.0025	1.0025	7.40	0.0071
46	QXV2EF789K	6.215e-004	0.0023	1.0023	4.71	0.0041
47	EMC27100XN	7.190e-003	0.0023	1.0023	1.31	0.0003
48	QXV2CV706R	3.109e-004	0.0020	1.0020	7.30	0.0070
49	QCV2EFW2BN	4.929e-004	0.0018	1.0018	4.71	0.0041
50	FAV2CV753C	2.110e-002	0.0018	1.0018	1.08	0.0001
51	FAV2CV740C	2.110e-002	0.0018	1.0018	1.08	0.0001
52	FAV2CV748C	2.110e-002	0.0018	1.0018	1.08	0.0001
53	FAV2CV744C	2.110e-002	0.0018	1.0018	1.08	0.0001
54	STF2SCRNSP	9.768e-005	0.0017	1.0017	18.50	0.0194
55	EDG2DG1XXA	3.070e-003	0.0017	1.0017	1.55	0.0006
56	SMV215042N	9.230e-003	0.0017	1.0017	1.18	0.0002
57	ERE2A3LXXK	9.456e-006	0.0014	1.0014	152.38	0.1676
58	%T9	3.160e-002	0.0014	1.0014	1.04	0.0000
59	T9PREREC	5.600e-002	0.0014	1.0014	1.02	0.0000
60	EMP2P16AXA	2.320e-003	0.0013	1.0013	1.55	0.0006
61	T7REC	7.100e-002	0.0012	1.0012	1.02	0.0000
62	%T7	1.000e-003	0.0012	1.0012	2.24	0.0014
63	QCB2B53D2R	3.352e-004	0.0012	1.0012	4.71	0.0041
64	QCB2B53D1R	3.352e-004	0.0012	1.0012	4.71	0.0041
65	EDG2DGAACA	3.070e-003	0.0010	1.0010	1.31	0.0003
66	ECB2A309XD	6.450e-004	0.0010	1.0010	2.47	0.0016
67	ECB2A308XD	6.450e-004	0.0010	1.0010	2.47	0.0016
68	ECB2A112XD	6.450e-004	0.0009	1.0009	2.42	0.0016
69	QTK2CT41AJ	1.325e-004	0.0008	1.0008	7.30	0.0070
70	QCD2D26B1R	1.368e-004	0.0008	1.0008	6.82	0.0064
71	PMV2CV340K	1.277e-004	0.0007	1.0007	6.82	0.0064
72	ESV228021N	1.310e-003	0.0007	1.0007	1.55	0.0006
73	QMV2CV795K	1.915e-003	0.0006	1.0007	1.34	0.0004
74	SWREC	2.100e-002	0.0006	1.0006	1.03	0.0000
75	ERECB5/B6	2.600e-001	0.0006	1.0006	1.00	0.0000
76	EDG2DG2XXA	3.070e-003	0.0006	1.0006	1.18	0.0002
77	T8PREREC	1.400e-001	0.0005	1.0005	1.00	0.0000
78	%T8	3.160e-002	0.0005	1.0005	1.02	0.0000
79	DCD200221R	9.120e-005	0.0005	1.0005	6.82	0.0064
80	QSV2SV317K	8.760e-005	0.0005	1.0005	6.82	0.0064
81	ELS228011H	9.143e-004	0.0005	1.0005	1.55	0.0006
82	ELS228041H	9.143e-004	0.0005	1.0005	1.55	0.0006
83	SMP2-2P4CF	6.430e-004	0.0005	1.0005	1.76	0.0008
84	SST2-2F6CP	6.382e-004	0.0005	1.0005	1.76	0.0008
85	QMV200716K	1.277e-004	0.0005	1.0005	4.71	0.0041
86	SMP2-2P4CA	2.320e-003	0.0005	1.0005	1.20	0.0002
87	QCV200801K	7.344e-005	0.0005	1.0005	7.30	0.0070
88	QCV2EFW16K	7.344e-005	0.0005	1.0005	7.30	0.0070
89	QCV2EFW01K	7.344e-005	0.0005	1.0005	7.30	0.0070
90	QCV2EFW4AK	7.344e-005	0.0004	1.0004	6.82	0.0064
91	EMP2P16BXA	2.320e-003	0.0004	1.0004	1.18	0.0002
92	QMM2CCF003	7.064e-004	0.0004	1.0004	1.59	0.0007
93	ESV27245XN	1.310e-003	0.0004	1.0004	1.31	0.0003
94	ESV27162XN	1.310e-003	0.0004	1.0004	1.31	0.0003
95	ESV27150XN	1.310e-003	0.0004	1.0004	1.31	0.0003
96	QXV2EF795K	6.215e-004	0.0004	1.0004	1.59	0.0007
97	EMM2CCFFXA	2.320e-004	0.0004	1.0004	2.55	0.0017

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

98	EMP2P16AXF	6.430e-004	0.0004	1.0004	1.54	0.0006
99	EXV22AXXXK	6.215e-004	0.0003	1.0003	1.54	0.0006
100	EXV24AXXXK	6.215e-004	0.0003	1.0003	1.54	0.0006

Final Cut Sets

no	value	f-v	acc	cut sets
1	3.323e-004	0.3001	0.3001	QTP202P7AF QMP202P7BA
2	9.221e-005	0.0833	0.3834	QTP202P7AF QMP202P7BF
3	8.105e-005	0.0732	0.4566	QTP202P7AF QXV2EFW3BK
4	7.068e-005	0.0638	0.5205	QTP202P7AF QCV2EFW4BN
5	5.650e-005	0.0510	0.5715	QTP202P7AF %T12
6	5.650e-005	0.0510	0.6225	QTP202P7AF %T10
7	4.807e-005	0.0434	0.6660	QTP202P7AF QCB20A311R
8	2.129e-005	0.0192	0.6852	PMV2CV340N QMP202P7BA
9	1.750e-005	0.0158	0.7010	SXV2SW39AK QTP202P7AF QHF2REFILL
10	1.678e-005	0.0152	0.7162	QTP202P7AA QMP202P7BA
11	1.596e-005	0.0144	0.7306	%T3 ERECA3/A4 QTP202P7AF EDGOPER1 EDG2DG1XXF
12	1.581e-005	0.0143	0.7449	QMV200789C QTP202P7AF QHF2REFILL
13	1.581e-005	0.0143	0.7591	QMV200716N QTP202P7AF QHF2REFILL
14	1.308e-005	0.0118	0.7710	DCD22304XR QTP202P7AF
15	1.213e-005	0.0110	0.7819	%T3 ERECA3/A4 QTP202P7AF EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
16	1.053e-005	0.0095	0.7914	QTP202P7AF QCV2EFW4BK
17	5.908e-006	0.0053	0.7968	PMV2CV340N QMP202P7BF
18	5.674e-006	0.0051	0.8019	%T3 QTP202P7AF EDGOPER1 EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
19	5.575e-006	0.0050	0.8069	SXV2SW39AK QTP202P7AF QMV200789K
20	5.193e-006	0.0047	0.8116	PMV2CV340N QXV2EFW3BK
21	5.037e-006	0.0045	0.8162	QMV200716N QTP202P7AF QMV200789K
22	5.037e-006	0.0045	0.8207	QMV200789C QTP202P7AF QMV200789K
23	4.658e-006	0.0042	0.8249	QTP202P7AA QMP202P7BF
24	4.529e-006	0.0041	0.8290	PMV2CV340N QCV2EFW4BN
25	4.314e-006	0.0039	0.8329	%T3 QTP202P7AF EDG2DGAACF EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
26	4.094e-006	0.0037	0.8366	QTP202P7AA QXV2EFW3BK
27	3.620e-006	0.0033	0.8399	PMV2CV340N %T12
28	3.620e-006	0.0033	0.8431	PMV2CV340N %T10
29	3.571e-006	0.0032	0.8464	QTP202P7AA QCV2EFW4BN
30	3.080e-006	0.0028	0.8492	PMV2CV340N QCB20A311R
31	3.034e-006	0.0027	0.8519	%T3 QTP202P7AF EDGOPER1 EMM2CCFDGF
32	3.033e-006	0.0027	0.8546	PSV2SV205N QMP202P7BA
33	3.033e-006	0.0027	0.8574	QSV2SV317N QMP202P7BA
34	2.854e-006	0.0026	0.8600	QTP202P7AA %T10
35	2.854e-006	0.0026	0.8625	QTP202P7AA %T12
36	2.793e-006	0.0025	0.8651	SXV2SW39AK QMV2CV707K QTP202P7AF
37	2.523e-006	0.0023	0.8673	QMV200789C QMV2CV707K QTP202P7AF
38	2.523e-006	0.0023	0.8696	QMV200716N QMV2CV707K QTP202P7AF
39	2.428e-006	0.0022	0.8718	QTP202P7AA QCB20A311R
40	2.307e-006	0.0021	0.8739	%T3 QTP202P7AF EDG2DGAACF EMM2CCFDGF
41	1.790e-006	0.0016	0.8755	%T14 QTP202P7AF QHF2REFILL
42	1.576e-006	0.0014	0.8769	%T3 ERECA3/A4 QTP202P7AF SMV215031N EDGOPER1
43	1.356e-006	0.0012	0.8782	QTP202P7AF ERE2A3LXXK
44	1.310e-006	0.0012	0.8793	QXV2EFW20K QMP202P7BA
45	1.310e-006	0.0012	0.8805	QXV2EFW21K QMP202P7BA
46	1.310e-006	0.0012	0.8817	QXV2EFW3AK QMP202P7BA
47	1.241e-006	0.0011	0.8828	SXV2SW39AK SXV2SW39BK QHF2REFILL

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

```
48 1.198e-006 0.0011 0.8839 %T3 ERECA3/A4 QTP202P7AF SMV215031N EDG2DGAACF
49 1.172e-006 0.0011 0.8850 STF2SCRNSP QHF2REFILL
50 1.142e-006 0.0010 0.8860 QCV2EFW4AN QMP202P7BA
51 1.121e-006 0.0010 0.8870 QMV200789C SXV2SW39BK QHF2REFILL
52 1.121e-006 0.0010 0.8880 SXV2SW39AK PMV2CV340N QHF2REFILL
53 1.121e-006 0.0010 0.8890 QMV200716N SXV2SW39BK QHF2REFILL
54 1.121e-006 0.0010 0.8900 SXV2SW39AK QMV200795C QHF2REFILL
55 1.121e-006 0.0010 0.8911 SXV2SW39AK QMV200711N QHF2REFILL
56 1.069e-006 0.0010 0.8920 QXV2EF789K QTP202P7AF QHF2REFILL
57 1.023e-006 0.0009 0.8929 %T3 ERECA3/A4 PMV2CV340N EDGOPER1 EDG2DG1XXF
58 1.013e-006 0.0009 0.8939 QMV200716N QMV200711N QHF2REFILL
59 1.013e-006 0.0009 0.8948 QMV200789C QMV200795C QHF2REFILL
60 1.013e-006 0.0009 0.8957 QMV200789C PMV2CV340N QHF2REFILL
61 1.013e-006 0.0009 0.8966 QMV200716N QMV200795C QHF2REFILL
62 1.013e-006 0.0009 0.8975 QMV200716N PMV2CV340N QHF2REFILL
63 1.013e-006 0.0009 0.8984 QMV200789C QMV200711N QHF2REFILL
64 9.330e-007 0.0008 0.8993 %T3 ERECA3/A4 QTP202P7AF EMC27100XN EDG2DG1XXF
65 9.129e-007 0.0008 0.9001 QMP202P7BA %T11
66 8.841e-007 0.0008 0.9009 SXV2SW39AK QTP202P7AA QHF2REFILL
67 8.520e-007 0.0008 0.9017 QHF2REFILL T7REC %T7
68 8.482e-007 0.0008 0.9024 QCV2EFW2BN QTP202P7AF QHF2REFILL
69 8.417e-007 0.0008 0.9032 QSV2SV317N QMP202P7BF
70 8.417e-007 0.0008 0.9040 PSV2SV205N QMP202P7BF
71 8.379e-007 0.0008 0.9047 DCD22304XR PMV2CV340N
72 8.243e-007 0.0007 0.9055 SXV2SW39AK QXV2CT005K QTP202P7AF
73 8.243e-007 0.0007 0.9062 SXV2SW39AK QXV200802K QTP202P7AF
74 8.063e-007 0.0007 0.9069 %T3 ERECA3/A4 QTP202P7AA EDGOPER1 EDG2DG1XXF
75 7.987e-007 0.0007 0.9077 QMV200789C QTP202P7AA QHF2REFILL
76 7.987e-007 0.0007 0.9084 QMV200716N QTP202P7AA QHF2REFILL
77 7.774e-007 0.0007 0.9091 %T3 ERECA3/A4 PMV2CV340N EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
78 7.447e-007 0.0007 0.9098 QMV200789C QXV200802K QTP202P7AF
79 7.447e-007 0.0007 0.9104 QMV200716N QXV2CT005K QTP202P7AF
80 7.447e-007 0.0007 0.9111 QMV200716N QXV200802K QTP202P7AF
81 7.447e-007 0.0007 0.9118 QMV200789C QXV2CT005K QTP202P7AF
82 7.398e-007 0.0007 0.9124 QSV2SV317N QXV2EFW3BK
83 7.398e-007 0.0007 0.9131 PSV2SV205N QXV2EFW3BK
84 7.188e-007 0.0006 0.9138 SXV2SW39AK QCV2EFW01N QTP202P7AF
85 7.188e-007 0.0006 0.9144 SXV2SW39AK QCV2EFW16N QTP202P7AF
86 7.188e-007 0.0006 0.9151 SXV2SW39AK QCV200801N QTP202P7AF
87 6.748e-007 0.0006 0.9157 PMV2CV340N QCV2EFW4BK
88 6.607e-007 0.0006 0.9163 DCD22304XR QTP202P7AA
89 6.494e-007 0.0006 0.9168 QMV200716N QCV200801N QTP202P7AF
90 6.494e-007 0.0006 0.9174 QMV200716N QCV2EFW01N QTP202P7AF
91 6.494e-007 0.0006 0.9180 QMV200789C QCV200801N QTP202P7AF
92 6.494e-007 0.0006 0.9186 QMV200789C QCV2EFW16N QTP202P7AF
93 6.494e-007 0.0006 0.9192 QMV200716N QCV2EFW16N QTP202P7AF
94 6.494e-007 0.0006 0.9198 QMV200789C QCV2EFW01N QTP202P7AF
95 6.452e-007 0.0006 0.9204 PSV2SV205N QCV2EFW4BN
96 6.452e-007 0.0006 0.9209 QSV2SV317N QCV2EFW4BN
97 6.129e-007 0.0006 0.9215 %T3 ERECA3/A4 QTP202P7AA EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
98 5.768e-007 0.0005 0.9220 QCB2B53D1R QTP202P7AF QHF2REFILL
99 5.768e-007 0.0005 0.9225 QCB2B53D2R QTP202P7AF QHF2REFILL
100 5.701e-007 0.0005 0.9231 %T14 QTP202P7AF QMV200789K
```

Execution time 5 seconds (gen:0, exp:1, abs:4), Return Code = 1

C5 HPSI – KIRAP

GENPRG (HPSI / PROBA * 1.000e-012 / REPORT * 1.000e+002
 proba (HPSI) = 9.214e-004 (82027 cut sets)
 (82027 cut sets, 8 sec)

Reporting for HPSI

value = 9.214e-004

Event Importance Information

no	event	mean	f-v	rrw	raw	pd
1	YMV256491N	9.188e-003	0.2630	1.3569	29.36	0.0264
2	YMV256502N	9.188e-003	0.2237	1.2881	25.12	0.0224
3	%T3	3.680e-002	0.2086	1.2637	6.46	0.0052
4	EDG2DG1XXF	9.350e-002	0.1162	1.1315	2.13	0.0011
5	EDG2DG2XXF	9.350e-002	0.1110	1.1248	2.08	0.0011
6	EDG0PER1	1.230e-001	0.1068	1.1195	1.76	0.0008
7	STF2SCRNSP	9.768e-005	0.1060	1.1186	1086.22	1.0000
8	SFL2P4BIS	1.000e+000	0.0960	1.1062	1.00	0.0001
9	EDG2DGAACF	9.350e-002	0.0812	1.0883	1.79	0.0008
10	%T7	1.000e-003	0.0771	1.0835	77.98	0.0710
11	T7REC	7.100e-002	0.0771	1.0835	2.01	0.0010
12	HHF22P89AX	3.000e-003	0.0563	1.0597	19.72	0.0173
13	%T15	1.040e-003	0.0476	1.0499	46.69	0.0421
14	HHF22P89BX	3.000e-003	0.0455	1.0476	16.11	0.0140
15	T9PREREC	5.600e-002	0.0445	1.0466	1.75	0.0007
16	%T9	3.160e-002	0.0445	1.0466	2.36	0.0013
17	EMM2CCFDGF	4.675e-003	0.0439	1.0459	10.35	0.0087
18	HMP22P89AA	2.320e-003	0.0436	1.0455	19.73	0.0173
19	%T14	1.040e-003	0.0414	1.0432	40.81	0.0367
20	HMP22P89BA	2.320e-003	0.0352	1.0364	16.12	0.0140
21	YMV256282C	9.188e-003	0.0254	1.0260	3.73	0.0025
22	YMV256731C	9.188e-003	0.0188	1.0192	3.03	0.0019
23	HMV251261C	9.230e-003	0.0171	1.0174	2.84	0.0017
24	SMP2-2P4CF	6.430e-004	0.0162	1.0164	26.14	0.0232
25	SST2-2F6CP	6.382e-004	0.0161	1.0163	26.14	0.0232
26	EREC A3/A4	2.630e-001	0.0142	1.0144	1.04	0.0000
27	HCV2SI-7AN	4.930e-004	0.0141	1.0143	29.61	0.0264
28	YCV2BS-1AN	4.929e-004	0.0141	1.0143	29.61	0.0264
29	%T10	3.940e-004	0.0127	1.0129	33.22	0.0297
30	%T12	3.940e-004	0.0127	1.0129	33.21	0.0297
31	HCB252306D	6.450e-004	0.0121	1.0123	19.76	0.0173
32	HMP22P89AF	6.432e-004	0.0121	1.0122	19.76	0.0173
33	%T11	3.940e-004	0.0121	1.0122	31.58	0.0282
34	%T13	3.940e-004	0.0121	1.0122	31.58	0.0282
35	HCV2SI-7BN	4.930e-004	0.0120	1.0121	25.33	0.0224
36	YCV2BS-1BN	4.929e-004	0.0120	1.0121	25.33	0.0224
37	SVX2SW128K	6.215e-004	0.0117	1.0118	19.76	0.0173
38	SMV215031N	9.230e-003	0.0115	1.0116	2.23	0.0011
39	SMV215042N	9.230e-003	0.0110	1.0111	2.18	0.0011
40	HXV2SI-8AK	5.652e-004	0.0106	1.0107	19.76	0.0173
41	YCB2052G3R	3.686e-004	0.0106	1.0107	29.62	0.0264

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

42	HCB252406D	6.450e-004	0.0098	1.0099	16.14	0.0140
43	HMP22P89BF	6.432e-004	0.0097	1.0098	16.14	0.0140
44	SXV2SW129K	6.215e-004	0.0094	1.0095	16.14	0.0140
45	SXV2SW131K	6.215e-004	0.0094	1.0095	16.14	0.0140
46	HCV2SI10AN	4.930e-004	0.0093	1.0093	19.76	0.0173
47	ERECB5/B6	2.600e-001	0.0092	1.0093	1.03	0.0000
48	ALT256393D	1.408e-002	0.0091	1.0092	1.64	0.0006
49	ALT256404D	1.408e-002	0.0091	1.0092	1.64	0.0006
50	ALT256372D	1.408e-002	0.0091	1.0092	1.64	0.0006
51	ALT256361D	1.408e-002	0.0091	1.0092	1.64	0.0006
52	YCB2062G3R	3.686e-004	0.0090	1.0091	25.33	0.0224
53	HXV2SI-8BK	5.652e-004	0.0086	1.0086	16.14	0.0140
54	HCV2SI10BN	4.930e-004	0.0075	1.0075	16.15	0.0140
55	EMC27100XN	7.190e-003	0.0062	1.0063	1.86	0.0008
56	YTK2RW2T3J	5.520e-006	0.0060	1.0060	1086.32	1.0000
57	SMP2-2P4CA	2.320e-003	0.0046	1.0047	3.00	0.0018
58	AHFCALRASL	4.200e-006	0.0046	1.0046	1086.32	1.0000
59	SWREC	2.100e-002	0.0043	1.0043	1.20	0.0002
60	YMV256721C	9.188e-003	0.0039	1.0039	1.42	0.0004
61	EDG2DG1XXA	3.070e-003	0.0038	1.0038	2.24	0.0011
62	%T8	3.160e-002	0.0038	1.0038	1.12	0.0001
63	T8PREREC	1.400e-001	0.0038	1.0038	1.02	0.0000
64	SMV214001K	1.277e-004	0.0037	1.0037	29.62	0.0264
65	YMV256471K	1.277e-004	0.0037	1.0037	29.62	0.0264
66	YMV256491K	1.277e-004	0.0037	1.0037	29.62	0.0264
67	EDG2DG2XXA	3.070e-003	0.0036	1.0037	2.18	0.0011
68	SMV214742K	1.277e-004	0.0032	1.0032	26.15	0.0232
69	YMV256482K	1.277e-004	0.0031	1.0031	25.34	0.0224
70	YMV256502K	1.277e-004	0.0031	1.0031	25.34	0.0224
71	SMV214062K	1.277e-004	0.0031	1.0031	25.34	0.0224
72	ARE2K104AB	7.650e-005	0.0030	1.0030	40.04	0.0360
73	EMP2P16AXA	2.320e-003	0.0029	1.0029	2.24	0.0011
74	ET12X26XXF	6.048e-005	0.0028	1.0028	46.74	0.0421
75	EMP2P16BXA	2.320e-003	0.0028	1.0028	2.18	0.0011
76	DCD22304XR	9.120e-005	0.0027	1.0027	30.47	0.0272
77	EDG2DGAACA	3.070e-003	0.0027	1.0027	1.86	0.0008
78	ET12X25XXF	6.048e-005	0.0024	1.0024	40.84	0.0367
79	DCD22404XR	9.120e-005	0.0023	1.0023	26.36	0.0234
80	HMV251281C	9.230e-003	0.0022	1.0022	1.24	0.0002
81	EMM2CCFFXA	2.320e-004	0.0022	1.0022	10.39	0.0087
82	YCV2BS-1AK	7.344e-005	0.0021	1.0021	29.62	0.0264
83	HCV2SI-7AK	7.344e-005	0.0021	1.0021	29.62	0.0264
84	SCV2SW12AK	7.344e-005	0.0021	1.0021	29.62	0.0264
85	ARE2K104BB	7.650e-005	0.0019	1.0019	25.34	0.0224
86	SCV22SW2CK	7.344e-005	0.0018	1.0019	26.15	0.0232
87	HCV2SI-7BK	7.344e-005	0.0018	1.0018	25.34	0.0224
88	YCV2BS-1BK	7.344e-005	0.0018	1.0018	25.34	0.0224
89	SCV2SW12BK	7.344e-005	0.0018	1.0018	25.34	0.0224
90	ESV228021N	1.310e-003	0.0016	1.0016	2.24	0.0011
91	ESV228222N	1.310e-003	0.0016	1.0016	2.18	0.0011
92	EMM2CCFDGA	1.535e-004	0.0014	1.0014	10.39	0.0087
93	ARE2K110AB	7.650e-005	0.0014	1.0014	19.77	0.0173
94	ECB2A408XD	6.450e-004	0.0014	1.0014	3.21	0.0020
95	ECB2A409XD	6.450e-004	0.0014	1.0014	3.21	0.0020
96	HCV2SI10AK	7.344e-005	0.0014	1.0014	19.77	0.0173
97	SCB22A402D	6.450e-004	0.0013	1.0013	3.00	0.0018

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

98	ARE2K102BB	7.650e-005	0.0012	1.0012	16.15	0.0140
99	ESV27162XN	1.310e-003	0.0011	1.0011	1.87	0.0008
100	ESV27245XN	1.310e-003	0.0011	1.0011	1.87	0.0008

Final Cut Sets

no	value	f-v	acc	cut sets
1	9.768e-005	0.1060	0.1060	STF2SCRNSP
2	8.442e-005	0.0916	0.1976	YMV256502N YMV256491N
3	7.100e-005	0.0771	0.2747	T7REC %T7
4	3.957e-005	0.0429	0.3176	%T3 EDGOPER1 EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
5	3.008e-005	0.0326	0.3503	%T3 EDG2DGAACF EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
6	2.756e-005	0.0299	0.3802	HHF22P89AX YMV256502N
7	2.756e-005	0.0299	0.4101	HHF22P89BX YMV256491N
8	2.132e-005	0.0231	0.4333	YMV256491N HMP22P89BA
9	2.132e-005	0.0231	0.4564	YMV256502N HMP22P89AA
10	2.116e-005	0.0230	0.4794	%T3 EDGOPER1 EMM2CCFDGF
11	1.626e-005	0.0176	0.4970	SFL2P4BIS T9PREREC %T9 YMV256491N
12	1.609e-005	0.0175	0.5145	%T3 EDG2DGAACF EMM2CCFDGF
13	9.599e-006	0.0104	0.5249	%T15 HMV251261C
14	9.556e-006	0.0104	0.5352	%T15 YMV256491N
15	9.556e-006	0.0104	0.5456	%T14 YMV256282C
16	9.556e-006	0.0104	0.5560	%T15 YMV256731C
17	9.556e-006	0.0104	0.5664	%T14 YMV256502N
18	5.926e-006	0.0064	0.5728	YMV256502N HCB252306D
19	5.926e-006	0.0064	0.5792	YMV256491N HCB252406D
20	5.910e-006	0.0064	0.5856	YMV256491N HMP22P89BF
21	5.910e-006	0.0064	0.5921	YMV256502N HMP22P89AF
22	5.908e-006	0.0064	0.5985	SFL2P4BIS YMV256491N SMP2-2P4CF
23	5.864e-006	0.0064	0.6048	SFL2P4BIS YMV256491N SST2-2F6CP
24	5.710e-006	0.0062	0.6110	SXV2SW131K YMV256491N
25	5.710e-006	0.0062	0.6172	SXV2SW129K YMV256491N
26	5.710e-006	0.0062	0.6234	SXV2SW128K YMV256502N
27	5.520e-006	0.0060	0.6294	YTK2RW2T3J
28	5.309e-006	0.0058	0.6352	HHF22P89AX SFL2P4BIS T9PREREC %T9
29	5.193e-006	0.0056	0.6408	YMV256491N HXV2SI-8BK
30	5.193e-006	0.0056	0.6464	YMV256502N HXV2SI-8AK
31	4.530e-006	0.0049	0.6514	HCV2SI-7BN YMV256491N
32	4.530e-006	0.0049	0.6563	HCV2SI10AN YMV256502N
33	4.530e-006	0.0049	0.6612	HCV2SI10BN YMV256491N
34	4.530e-006	0.0049	0.6661	HCV2SI-7AN YMV256502N
35	4.529e-006	0.0049	0.6710	YCV2BS-1BN YMV256491N
36	4.529e-006	0.0049	0.6759	YCV2BS-1AN YMV256502N
37	4.200e-006	0.0046	0.6805	AHFCALRASL
38	4.105e-006	0.0045	0.6850	SFL2P4BIS T9PREREC %T9 HMP22P89AA
39	3.906e-006	0.0042	0.6892	%T3 SMV215042N EDGOPER1 EDG2DG1XXF
40	3.906e-006	0.0042	0.6934	%T3 SMV215031N EDGOPER1 EDG2DG2XXF
41	3.620e-006	0.0039	0.6974	%T12 YMV256502N
42	3.620e-006	0.0039	0.7013	%T13 YMV256491N
43	3.620e-006	0.0039	0.7052	%T10 YMV256502N
44	3.620e-006	0.0039	0.7092	%T11 YMV256491N
45	3.387e-006	0.0037	0.7128	YMV256502N YCB2052G3R
46	3.387e-006	0.0037	0.7165	YCB2062G3R YMV256491N
47	3.120e-006	0.0034	0.7199	HHF22P89AX %T15

48 3.120e-006 0.0034 0.7233 HHF22P89BX %T14
49 2.969e-006 0.0032 0.7265 %T3 SMV215042N EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
50 2.969e-006 0.0032 0.7297 %T3 SMV215031N EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
51 2.791e-006 0.0030 0.7328 ALT256361D ALT256372D ALT256393D
52 2.791e-006 0.0030 0.7358 ALT256361D ALT256372D ALT256404D
53 2.791e-006 0.0030 0.7388 ALT256372D ALT256393D ALT256404D
54 2.791e-006 0.0030 0.7418 ALT256361D ALT256393D ALT256404D
55 2.413e-006 0.0026 0.7445 %T14 HMP22P89BA
56 2.413e-006 0.0026 0.7471 %T15 HMP22P89AA
57 2.313e-006 0.0025 0.7496 %T3 EMC27100XN EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
58 1.929e-006 0.0021 0.7517 HHF22P89AX SFL2P4BIS SMP2-2P4CF
59 1.915e-006 0.0021 0.7538 HHF22P89AX SFL2P4BIS SST2-2F6CP
60 1.840e-006 0.0020 0.7558 %T14 SFL2P4BIS T9PREREC %T9
61 1.492e-006 0.0016 0.7574 SFL2P4BIS SMP2-2P4CF HMP22P89AA
62 1.481e-006 0.0016 0.7590 SFL2P4BIS SST2-2F6CP HMP22P89AA
63 1.479e-006 0.0016 0.7606 HHF22P89BX HCV2SI-7AN
64 1.479e-006 0.0016 0.7622 HHF22P89AX HCV2SI-7BN
65 1.479e-006 0.0016 0.7638 HHF22P89BX YCV2BS-1AN
66 1.479e-006 0.0016 0.7654 HHF22P89AX YCV2BS-1BN
67 1.299e-006 0.0014 0.7668 %T3 EDG2DG2XXA EDGOPER1 EDG2DG1XXF
68 1.299e-006 0.0014 0.7682 %T3 EDG2DG1XXA EDGOPER1 EDG2DG2XXF
69 1.237e-006 0.0013 0.7696 %T3 EMC27100XN EMM2CCFDGF
70 1.182e-006 0.0013 0.7708 HHF22P89BX %T12
71 1.182e-006 0.0013 0.7721 HHF22P89AX %T13
72 1.182e-006 0.0013 0.7734 HHF22P89BX %T10
73 1.182e-006 0.0013 0.7747 HHF22P89AX %T11
74 1.173e-006 0.0013 0.7760 SMV214062K YMV256491N
75 1.173e-006 0.0013 0.7772 YMV256502N YMV256471K
76 1.173e-006 0.0013 0.7785 SFL2P4BIS YMV256491N SMV214742K
77 1.173e-006 0.0013 0.7798 YMV256502K YMV256491N
78 1.173e-006 0.0013 0.7811 YMV256502N YMV256491K
79 1.173e-006 0.0013 0.7823 YMV256482K YMV256491N
80 1.173e-006 0.0013 0.7836 SMV214001K YMV256502N
81 1.144e-006 0.0012 0.7849 HCV2SI-7BN HMP22P89AA
82 1.144e-006 0.0012 0.7861 HCV2SI-7AN HMP22P89BA
83 1.144e-006 0.0012 0.7873 YCV2BS-1AN HMP22P89BA
84 1.144e-006 0.0012 0.7886 YCV2BS-1BN HMP22P89AA
85 1.141e-006 0.0012 0.7898 SFL2P4BIS T9PREREC %T9 HCB252306D
86 1.138e-006 0.0012 0.7910 SFL2P4BIS T9PREREC %T9 HMP22P89AF
87 1.106e-006 0.0012 0.7922 HHF22P89AX YCB2062G3R
88 1.106e-006 0.0012 0.7934 HHF22P89BX YCB2052G3R
89 1.100e-006 0.0012 0.7946 SXV2SW128K SFL2P4BIS T9PREREC %T9
90 1.082e-006 0.0012 0.7958 %T14 %T15
91 1.050e-006 0.0011 0.7970 %T3 EDGOPER1 EMM2CCFFXA
92 1.023e-006 0.0011 0.7981 %T3 ERECA3/A4 YMV256491N EDGOPER1 EDG2DG2XXF
93 1.023e-006 0.0011 0.7992 %T3 ERECA3/A4 YMV256502N EDGOPER1 EDG2DG1XXF
94 1.000e-006 0.0011 0.8003 SFL2P4BIS T9PREREC %T9 HXV2SI-8AK
95 9.877e-007 0.0011 0.8013 %T3 EDG2DG1XXA EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
96 9.877e-007 0.0011 0.8024 %T3 EDG2DG2XXA EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
97 9.877e-007 0.0011 0.8035 %T3 EDG2DGAACA EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
98 9.819e-007 0.0011 0.8045 %T3 SFL2P4BIS SMP2-2P4CA EDGOPER1 EDG2DG1XXF
99 9.819e-007 0.0011 0.8056 EMP2P16BXA %T3 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
100 9.819e-007 0.0011 0.8067 EMP2P16AXA %T3 EDGOPER1 EDG2DG2XXF

Execution time 9 seconds (gen:0, exp:2, abs:4), Return Code = 1

C6 LPSI – KIRAP

GENPRG (LPSI / PROBA * 1.000e-012 / REPORT * 1.000e+002
 proba (LPSI) = 6.080e-004 (51329 cut sets)
 (51329 cut sets, 2 sec)

Reporting for LPSI

value = 6.080e-004

Event Importance Information

no	event	mean	f-v	rrw	raw	pd
1	LMM2CCF001	3.259e-004	0.5361	2.1554	1645.32	1.0000
2	%T3	3.680e-002	0.2990	1.4265	8.83	0.0049
3	EDG2DG1XXF	9.350e-002	0.1709	1.2062	2.66	0.0011
4	EDG2DG2XXF	9.350e-002	0.1623	1.1938	2.57	0.0011
5	EDG0PER1	1.230e-001	0.1561	1.1849	2.11	0.0008
6	EDG2DGAACF	9.350e-002	0.1186	1.1346	2.15	0.0008
7	EMM2CCFDGF	4.675e-003	0.0665	1.0713	15.17	0.0087
8	LHF2HE001L	3.000e-003	0.0498	1.0524	17.53	0.0101
9	LHF2HE002L	3.000e-003	0.0494	1.0520	17.43	0.0100
10	LMP20P60AA	2.320e-003	0.0385	1.0400	17.55	0.0101
11	LMP20P60BA	2.320e-003	0.0382	1.0397	17.44	0.0100
12	SMV215031N	9.230e-003	0.0169	1.0172	2.81	0.0011
13	SMV215042N	9.230e-003	0.0160	1.0163	2.72	0.0011
14	LSC20SI3AN	8.580e-004	0.0142	1.0144	17.57	0.0101
15	LSC20SI3BN	8.580e-004	0.0141	1.0143	17.46	0.0100
16	SFL2P4BIS	1.000e+000	0.0122	1.0124	1.00	0.0000
17	LCB20A305D	6.450e-004	0.0107	1.0108	17.57	0.0101
18	LMP20P60AF	6.430e-004	0.0107	1.0108	17.57	0.0101
19	LCB20A405D	6.450e-004	0.0106	1.0107	17.47	0.0100
20	LMP20P60BF	6.430e-004	0.0106	1.0107	17.47	0.0100
21	LXV20SI2AK	6.215e-004	0.0103	1.0104	17.57	0.0101
22	LXV20SI2BK	6.215e-004	0.0102	1.0103	17.47	0.0100
23	EMC27100XN	7.190e-003	0.0091	1.0092	2.26	0.0008
24	YTK2RW2T3J	5.520e-006	0.0091	1.0092	1645.84	1.0000
25	YCV2BS-1AN	4.929e-004	0.0082	1.0082	17.57	0.0101
26	EREC A3/A4	2.630e-001	0.0082	1.0082	1.02	0.0000
27	YCV2BS-1BN	4.929e-004	0.0081	1.0082	17.47	0.0100
28	%T10	3.940e-004	0.0071	1.0071	18.91	0.0109
29	%T12	3.940e-004	0.0071	1.0071	18.90	0.0109
30	%T13	3.940e-004	0.0070	1.0070	18.72	0.0108
31	%T11	3.940e-004	0.0070	1.0070	18.72	0.0108
32	EDG2DG1XXA	3.070e-003	0.0056	1.0056	2.82	0.0011
33	EDG2DG2XXA	3.070e-003	0.0053	1.0054	2.73	0.0011
34	EMP2P16AXA	2.320e-003	0.0042	1.0043	2.82	0.0011
35	EMP2P16BXA	2.320e-003	0.0040	1.0040	2.73	0.0011
36	SMP2-2P4CA	2.320e-003	0.0040	1.0040	2.73	0.0011
37	EDG2DGAACA	3.070e-003	0.0039	1.0039	2.26	0.0008
38	EMM2CCFFXA	2.320e-004	0.0033	1.0033	15.23	0.0087
39	%T9	3.160e-002	0.0031	1.0031	1.09	0.0001
40	T9PREREC	5.600e-002	0.0031	1.0031	1.05	0.0000
41	ESV228021N	1.310e-003	0.0024	1.0024	2.83	0.0011

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

42	ESV228222N	1.310e-003	0.0023	1.0023	2.73	0.0011
43	EMM2CCFDGA	1.535e-004	0.0022	1.0022	15.23	0.0087
44	%T14	1.040e-003	0.0019	1.0019	2.83	0.0011
45	%T15	1.040e-003	0.0018	1.0018	2.74	0.0011
46	ELS228041H	9.143e-004	0.0017	1.0017	2.83	0.0011
47	ELS228011H	9.143e-004	0.0017	1.0017	2.83	0.0011
48	ESV27162XN	1.310e-003	0.0017	1.0017	2.27	0.0008
49	ESV27245XN	1.310e-003	0.0017	1.0017	2.27	0.0008
50	ESV27150XN	1.310e-003	0.0017	1.0017	2.27	0.0008
51	DCD22304XR	9.120e-005	0.0016	1.0016	18.90	0.0109
52	DCD22404XR	9.120e-005	0.0016	1.0016	18.73	0.0108
53	ELS228212H	9.143e-004	0.0016	1.0016	2.73	0.0011
54	ELS228242H	9.143e-004	0.0016	1.0016	2.73	0.0011
55	ECB2A408XD	6.450e-004	0.0015	1.0015	3.29	0.0014
56	ECB2A409XD	6.450e-004	0.0015	1.0015	3.29	0.0014
57	STF2SCRNSP	9.768e-005	0.0014	1.0014	15.23	0.0087
58	ARE2K109AB	7.650e-005	0.0013	1.0013	17.58	0.0101
59	ARE2K110BB	7.650e-005	0.0013	1.0013	17.47	0.0100
60	ECB2A308XD	6.450e-004	0.0012	1.0012	2.93	0.0012
61	ECB2A309XD	6.450e-004	0.0012	1.0012	2.93	0.0012
62	YCV2BS-1AK	7.344e-005	0.0012	1.0012	17.58	0.0101
63	LCV20SI3AK	7.344e-005	0.0012	1.0012	17.58	0.0101
64	LCV20SI3BK	7.344e-005	0.0012	1.0012	17.47	0.0100
65	YCV2BS-1BK	7.344e-005	0.0012	1.0012	17.47	0.0100
66	EMP2P16AXF	6.430e-004	0.0012	1.0012	2.83	0.0011
67	SXV224AXXK	6.215e-004	0.0011	1.0011	2.83	0.0011
68	EXV24AXXXK	6.215e-004	0.0011	1.0011	2.83	0.0011
69	EXV22AXXXK	6.215e-004	0.0011	1.0011	2.83	0.0011
70	SCB22A402D	6.450e-004	0.0011	1.0011	2.73	0.0011
71	SMP2-2P4CF	6.430e-004	0.0011	1.0011	2.73	0.0011
72	EMP2P16BXF	6.430e-004	0.0011	1.0011	2.73	0.0011
73	SST2-2F6CP	6.382e-004	0.0011	1.0011	2.73	0.0011
74	SXV224BXXK	6.215e-004	0.0011	1.0011	2.73	0.0011
75	EXV22BXXK	6.215e-004	0.0011	1.0011	2.73	0.0011
76	EXV24BXXK	6.215e-004	0.0011	1.0011	2.73	0.0011
77	T7REC	7.100e-002	0.0010	1.0010	1.01	0.0000
78	%T7	1.000e-003	0.0010	1.0010	2.01	0.0006
79	EMM2CCFFXF	6.430e-005	0.0009	1.0009	15.23	0.0087
80	ECV23AXXXN	4.930e-004	0.0009	1.0009	2.83	0.0011
81	ECV23BXXN	4.930e-004	0.0009	1.0009	2.73	0.0011
82	SCV22SW2CN	4.930e-004	0.0009	1.0009	2.73	0.0011
83	ECB2A1001D	6.450e-004	0.0008	1.0008	2.27	0.0008
84	EHX2E9XXXJ	6.262e-004	0.0008	1.0008	2.27	0.0008
85	EMF2VEF17F	5.638e-004	0.0007	1.0007	2.27	0.0008
86	EMF2VEF18F	5.638e-004	0.0007	1.0007	2.27	0.0008
87	ECB251M2XR	3.686e-004	0.0007	1.0007	2.83	0.0011
88	ECB261M2XR	3.686e-004	0.0006	1.0006	2.73	0.0011
89	EHX2E9XXXF	5.039e-004	0.0006	1.0006	2.27	0.0008
90	EAV27239AN	2.110e-002	0.0006	1.0006	1.03	0.0000
91	EAV27239BN	2.110e-002	0.0006	1.0006	1.03	0.0000
92	EDGOPER2	8.510e-002	0.0005	1.0005	1.01	0.0000
93	LCB20A305R	2.234e-005	0.0004	1.0004	17.57	0.0101
94	LCB20A405R	2.234e-005	0.0004	1.0004	17.47	0.0100
95	SWREC	2.100e-002	0.0004	1.0004	1.02	0.0000
96	ERE2409PRK	1.560e-004	0.0004	1.0004	3.29	0.0014
97	ERE2309PRK	1.560e-004	0.0003	1.0003	2.93	0.0012

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

98	EMP2P235XA	2.320e-003	0.0003	1.0003	1.11	0.0001
99	ETK2T30AXG	1.325e-004	0.0002	1.0002	2.82	0.0011
100	ETK2T57AXG	1.325e-004	0.0002	1.0002	2.82	0.0011

Final Cut Sets

no	value	f-v	acc	cut sets
1	3.259e-004	0.5361	0.5361	LMM2CCF001
2	3.957e-005	0.0651	0.6011	%T3 EDGOPER1 EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
3	3.008e-005	0.0495	0.6506	%T3 EDG2DGAACF EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
4	2.116e-005	0.0348	0.6854	%T3 EDGOPER1 EMM2CCFDGF
5	1.609e-005	0.0265	0.7119	%T3 EDG2DGAACF EMM2CCFDGF
6	9.000e-006	0.0148	0.7267	LHF2HE002L LHF2HE001L
7	6.960e-006	0.0114	0.7381	LHF2HE002L LMP20P60AA
8	6.960e-006	0.0114	0.7496	LHF2HE001L LMP20P60BA
9	5.520e-006	0.0091	0.7587	YTK2RW2T3J
10	5.382e-006	0.0089	0.7675	LMP20P60AA LMP20P60BA
11	3.906e-006	0.0064	0.7739	%T3 SMV215031N EDGOPER1 EDG2DG2XXF
12	3.906e-006	0.0064	0.7804	%T3 SMV215042N EDGOPER1 EDG2DG1XXF
13	2.969e-006	0.0049	0.7853	%T3 SMV215031N EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
14	2.969e-006	0.0049	0.7901	%T3 SMV215042N EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
15	2.574e-006	0.0042	0.7944	LSC20SI3BN LHF2HE001L
16	2.574e-006	0.0042	0.7986	LSC20SI3AN LHF2HE002L
17	2.313e-006	0.0038	0.8024	%T3 EMC27100XN EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
18	1.991e-006	0.0033	0.8057	LSC20SI3BN LMP20P60AA
19	1.991e-006	0.0033	0.8090	LSC20SI3AN LMP20P60BA
20	1.935e-006	0.0032	0.8121	LHF2HE002L LCB20A305D
21	1.935e-006	0.0032	0.8153	LHF2HE001L LCB20A405D
22	1.929e-006	0.0032	0.8185	LHF2HE002L LMP20P60AF
23	1.929e-006	0.0032	0.8217	LHF2HE001L LMP20P60BF
24	1.865e-006	0.0031	0.8247	LXV20SI2AK LHF2HE002L
25	1.865e-006	0.0031	0.8278	LXV20SI2BK LHF2HE001L
26	1.496e-006	0.0025	0.8303	LMP20P60AA LCB20A405D
27	1.496e-006	0.0025	0.8327	LCB20A305D LMP20P60BA
28	1.492e-006	0.0025	0.8352	LMP20P60AF LMP20P60BA
29	1.492e-006	0.0025	0.8376	LMP20P60AA LMP20P60BF
30	1.479e-006	0.0024	0.8401	LHF2HE002L YCV2BS-1AN
31	1.479e-006	0.0024	0.8425	LHF2HE001L YCV2BS-1BN
32	1.442e-006	0.0024	0.8449	LXV20SI2BK LMP20P60AA
33	1.442e-006	0.0024	0.8472	LXV20SI2AK LMP20P60BA
34	1.299e-006	0.0021	0.8494	%T3 EDG2DG2XXA EDGOPER1 EDG2DG1XXF
35	1.299e-006	0.0021	0.8515	%T3 EDG2DG1XXA EDGOPER1 EDG2DG2XXF
36	1.237e-006	0.0020	0.8536	%T3 EMC27100XN EMM2CCFDGF
37	1.182e-006	0.0019	0.8555	LHF2HE001L %T13
38	1.182e-006	0.0019	0.8574	LHF2HE002L %T10
39	1.182e-006	0.0019	0.8594	LHF2HE002L %T12
40	1.182e-006	0.0019	0.8613	LHF2HE001L %T11
41	1.144e-006	0.0019	0.8632	LMP20P60AA YCV2BS-1BN
42	1.144e-006	0.0019	0.8651	LMP20P60BA YCV2BS-1AN
43	1.050e-006	0.0017	0.8668	%T3 EDGOPER1 EMM2CCFFXA
44	9.877e-007	0.0016	0.8684	%T3 EDG2DGAACA EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
45	9.877e-007	0.0016	0.8701	%T3 EDG2DG2XXA EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
46	9.877e-007	0.0016	0.8717	%T3 EDG2DG1XXA EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
47	9.819e-007	0.0016	0.8733	EMP2P16BXA %T3 EDGOPER1 EDG2DG1XXF

```
48 9.819e-007 0.0016 0.8749 %T3 SFL2P4BIS SMP2-2P4CA EDGOPER1 EDG2DG1XXF
49 9.819e-007 0.0016 0.8765 EMP2P16AXA %T3 EDGOPER1 EDG2DG2XXF
50 9.141e-007 0.0015 0.8780 LMP20P60BA %T10
51 9.141e-007 0.0015 0.8795 LMP20P60BA %T12
52 9.141e-007 0.0015 0.8810 LMP20P60AA %T13
53 9.141e-007 0.0015 0.8826 LMP20P60AA %T11
54 7.983e-007 0.0013 0.8839 %T3 EDG2DGAACF EMM2CCFFXA
55 7.489e-007 0.0012 0.8851 %T3 SFL2P4BIS T9PREREC %T9 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
56 7.464e-007 0.0012 0.8863 %T3 SFL2P4BIS SMP2-2P4CA EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
57 7.464e-007 0.0012 0.8876 EMP2P16BXA %T3 EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
58 7.464e-007 0.0012 0.8888 EMP2P16AXA %T3 EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
59 7.362e-007 0.0012 0.8900 LSC20SI3BN LSC20SI3AN
60 6.948e-007 0.0011 0.8911 %T3 EDGOPER1 EMM2CCFDGA
61 5.693e-007 0.0009 0.8921 %T3 SFL2P4BIS T9PREREC %T9 EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
62 5.544e-007 0.0009 0.8930 %T3 ESV228021N EDGOPER1 EDG2DG2XXF
63 5.544e-007 0.0009 0.8939 %T3 ESV228222N EDGOPER1 EDG2DG1XXF
64 5.534e-007 0.0009 0.8948 LSC20SI3BN LCB20A305D
65 5.534e-007 0.0009 0.8957 LSC20SI3AN LCB20A405D
66 5.517e-007 0.0009 0.8966 LSC20SI3BN LMP20P60AF
67 5.517e-007 0.0009 0.8975 LSC20SI3AN LMP20P60BF
68 5.332e-007 0.0009 0.8984 LSC20SI3BN LXV20SI2AK
69 5.332e-007 0.0009 0.8993 LSC20SI3AN LXV20SI2BK
70 5.282e-007 0.0009 0.9002 %T3 EDG2DGAACA EMM2CCFDGF
71 5.282e-007 0.0009 0.9010 %T3 EDG2DGAACF EMM2CCFDGA
72 4.421e-007 0.0007 0.9017 %T3 STF2SCRNSP EDGOPER1
73 4.401e-007 0.0007 0.9025 %T3 %T14 EDGOPER1 EDG2DG2XXF
74 4.401e-007 0.0007 0.9032 %T3 %T15 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
75 4.229e-007 0.0007 0.9039 LSC20SI3BN YCV2BS-1AN
76 4.229e-007 0.0007 0.9046 LSC20SI3AN YCV2BS-1BN
77 4.214e-007 0.0007 0.9053 %T3 ESV27245XN EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
78 4.214e-007 0.0007 0.9060 %T3 ESV27162XN EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
79 4.214e-007 0.0007 0.9067 %T3 ESV228222N EDG2DGAACF EDG2DG1XXF
80 4.214e-007 0.0007 0.9074 %T3 ESV27150XN EDG2DG2XXF EDG2DG1XXF
81 4.214e-007 0.0007 0.9081 %T3 ESV228021N EDG2DGAACF EDG2DG2XXF
82 4.160e-007 0.0007 0.9087 LCB20A305D LCB20A405D
83 4.147e-007 0.0007 0.9094 LMP20P60AF LCB20A405D
84 4.147e-007 0.0007 0.9101 LCB20A305D LMP20P60BF
85 4.134e-007 0.0007 0.9108 LMP20P60AF LMP20P60BF
86 4.009e-007 0.0007 0.9114 LXV20SI2AK LCB20A405D
87 4.009e-007 0.0007 0.9121 LXV20SI2BK LCB20A305D
88 3.996e-007 0.0007 0.9128 LXV20SI2BK LMP20P60AF
89 3.996e-007 0.0007 0.9134 LXV20SI2AK LMP20P60BF
90 3.869e-007 0.0006 0.9141 ELS228212H %T3 EDGOPER1 EDG2DG1XXF
91 3.869e-007 0.0006 0.9147 %T3 ELS228041H EDGOPER1 EDG2DG2XXF
92 3.869e-007 0.0006 0.9153 %T3 ELS228242H EDGOPER1 EDG2DG1XXF
93 3.869e-007 0.0006 0.9160 ELS228011H %T3 EDGOPER1 EDG2DG2XXF
94 3.863e-007 0.0006 0.9166 LXV20SI2BK LXV20SI2AK
95 3.856e-007 0.0006 0.9172 %T3 SMV215031N SMV215042N EDGOPER1
96 3.381e-007 0.0006 0.9178 LSC20SI3AN %T13
97 3.381e-007 0.0006 0.9183 LSC20SI3BN %T10
98 3.381e-007 0.0006 0.9189 LSC20SI3AN %T11
99 3.381e-007 0.0006 0.9195 LSC20SI3BN %T12
100 3.361e-007 0.0006 0.9200 %T3 STF2SCRNSP EDG2DGAACF
```

Execution time 2 seconds (gen:0, exp:0, abs:1), Return Code = 1

C7 SW – KIRAP

GENPRG (SW / PROBA * 1.000e-012 / REPORT * 1.000e+002
 proba (SW) = 1.997e-004 (1309 cut sets)
 (1309 cut sets, 1 sec)

Reporting for SW

value = 1.997e-004

Event Importance Information

no	event	mean	f-v	rrw	raw	pd
1	SFL2P4BIS	1.000e+000	1.0000	9999.0000	1.00	0.0002
2	T8PREREC	1.400e-001	0.6589	2.9317	5.05	0.0009
3	%T8	3.160e-002	0.6589	2.9317	21.19	0.0042
4	SWREC	2.100e-002	0.6428	2.7998	30.97	0.0061
5	%T3	3.680e-002	0.1085	1.1217	3.84	0.0006
6	SMP2-2P4AF	6.430e-004	0.0958	1.1059	149.84	0.0297
7	SST2-2F6AP	6.382e-004	0.0951	1.1050	149.84	0.0297
8	SHF2-2P4BL	3.000e-003	0.0918	1.1011	31.52	0.0061
9	%T10	3.940e-004	0.0844	1.0922	215.17	0.0428
10	SMP2-2P4BA	2.320e-003	0.0710	1.0764	31.54	0.0061
11	SCB22A303D	6.450e-004	0.0197	1.0201	31.59	0.0061
12	SMP2-2P4BF	6.430e-004	0.0197	1.0201	31.59	0.0061
13	DCD22304XR	9.120e-005	0.0195	1.0199	215.23	0.0428
14	SST2-2F6BP	6.382e-004	0.0195	1.0199	31.59	0.0061
15	SMV214701K	1.277e-004	0.0190	1.0194	149.92	0.0297
16	SCV22SW2BN	4.930e-004	0.0151	1.0153	31.60	0.0061
17	SMP2-2P4AA	2.320e-003	0.0125	1.0127	6.38	0.0011
18	SCV22SW2AK	7.344e-005	0.0109	1.0111	149.93	0.0297
19	SXV22SW3AK	3.768e-005	0.0056	1.0056	149.93	0.0297
20	SMV214191K	1.277e-004	0.0039	1.0039	31.61	0.0061
21	SMV214181K	1.277e-004	0.0039	1.0039	31.61	0.0061
22	SMV214725K	1.277e-004	0.0039	1.0039	31.61	0.0061
23	SCB22A302D	6.450e-004	0.0035	1.0035	6.39	0.0011
24	SCB22A302R	2.234e-005	0.0033	1.0033	149.93	0.0297
25	SMM2CCFMDP	1.929e-005	0.0029	1.0029	149.93	0.0297
26	SCV22SW2AN	4.930e-004	0.0027	1.0027	6.39	0.0011
27	SCV22SW2BK	7.344e-005	0.0022	1.0023	31.61	0.0061
28	SXV22SW3BK	3.768e-005	0.0012	1.0012	31.61	0.0061
29	SCB22A303R	2.234e-005	0.0007	1.0007	31.61	0.0061
30	DBD202D23F	1.080e-006	0.0002	1.0002	215.25	0.0428
31	DCD200133R	9.120e-005	0.0001	1.0001	2.53	0.0003
32	DCD200142R	9.120e-005	0.0001	1.0001	2.53	0.0003
33	EDG2DG1XXF	9.350e-002	0.0001	1.0001	1.00	0.0000
34	ERECB5/B6	2.600e-001	0.0001	1.0001	1.00	0.0000
35	EDGOPER1	1.230e-001	0.0001	1.0001	1.00	0.0000
36	ERECA3/A4	2.630e-001	0.0001	1.0001	1.00	0.0000
37	EDG2DGAACF	9.350e-002	0.0001	1.0001	1.00	0.0000
38	EDG2DG2XXF	9.350e-002	0.0001	1.0001	1.00	0.0000
39	%T14	1.040e-003	0.0000	1.0000	1.04	0.0000
40	DCD200142D	8.830e-004	0.0000	1.0000	1.04	0.0000
41	EMM2CCFDGF	4.675e-003	0.0000	1.0000	1.01	0.0000

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

42	SMV215031N	9.230e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
43	DBC202D31F	2.688e-004	0.0000	1.0000	1.04	0.0000
44	SMV215042N	9.230e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
45	EMC27100XN	7.190e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
46	%T12	3.940e-004	0.0000	1.0000	1.01	0.0000
47	EDG2DG1XXA	3.070e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
48	DRE200142E	7.650e-005	0.0000	1.0000	1.04	0.0000
49	EMP2P16AXA	2.320e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
50	ET12X25XXF	6.048e-005	0.0000	1.0000	1.04	0.0000
51	EDG2DG2XXA	3.070e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
52	ECB2A309XD	6.450e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
53	ECB2A308XD	6.450e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
54	EDG2DGAACA	3.070e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
55	ESV228021N	1.310e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
56	EMM2CCFFXA	2.320e-004	0.0000	1.0000	1.01	0.0000
57	EMP2P16BXA	2.320e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
58	SMP2-2P4CA	2.320e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
59	DBD202D01F	1.080e-006	0.0000	1.0000	2.25	0.0002
60	ELS228041H	9.143e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
61	ELS228011H	9.143e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
62	%T9	3.160e-002	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
63	T9PREREC	5.600e-002	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
64	EMM2CCFDGA	1.535e-004	0.0000	1.0000	1.01	0.0000
65	%T15	1.040e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
66	ECB2A301XR	2.234e-005	0.0000	1.0000	1.04	0.0000
67	ECB2512XXR	2.234e-005	0.0000	1.0000	1.04	0.0000
68	ECB2521XXR	2.234e-005	0.0000	1.0000	1.04	0.0000
69	DCB2051M3R	2.234e-005	0.0000	1.0000	1.04	0.0000
70	ESV228222N	1.310e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
71	SXV224AXXK	6.215e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
72	EXV22AXXXK	6.215e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
73	EXV24AXXXK	6.215e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
74	ESV27150XN	1.310e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
75	ESV27245XN	1.310e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
76	ESV27162XN	1.310e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
77	EMP2P16AXF	6.430e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
78	ECV23AXXXN	4.930e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
79	STF2SCRNSP	9.768e-005	0.0000	1.0000	1.01	0.0000
80	ECB2A408XD	6.450e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
81	ECB2A409XD	6.450e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
82	ELS228242H	9.143e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
83	ELS228212H	9.143e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
84	EHX2E9XXXJ	6.262e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
85	T7REC	7.100e-002	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
86	%T7	1.000e-003	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
87	EMF2VEF17F	5.638e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
88	EMF2VEF18F	5.638e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
89	ERE2309PRK	1.560e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
90	ECB251M2XR	3.686e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
91	EHX2E9XXXF	5.039e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
92	SCB22A402D	6.450e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
93	EMP2P16BXF	6.430e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
94	SMP2-2P4CF	6.430e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
95	EMM2CCFFXF	6.430e-005	0.0000	1.0000	1.01	0.0000
96	SST2-2F6CP	6.382e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
97	EXV22BXXXX	6.215e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

98	EXV24BXXXK	6.215e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
99	SXV224BXXK	6.215e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000
100	ECB2A1001D	6.450e-004	0.0000	1.0000	1.00	0.0000

Final Cut Sets

no	value	f-v	acc	cut sets
----	-------	-----	-----	----------

1	9.290e-005	0.4652	0.4652	SWREC SFL2P4BIS T8PREREC %T8
2	1.450e-005	0.0726	0.5378	%T3 SFL2P4BIS %T10
3	1.350e-005	0.0676	0.6054	SWREC SFL2P4BIS SMP2-2P4AF
4	1.340e-005	0.0671	0.6726	SWREC SFL2P4BIS SST2-2F6AP
5	1.327e-005	0.0665	0.7390	SFL2P4BIS T8PREREC %T8 SHF2-2P4BL
6	1.026e-005	0.0514	0.7904	SFL2P4BIS T8PREREC %T8 SMP2-2P4BA
7	3.356e-006	0.0168	0.8072	%T3 DCD22304XR SFL2P4BIS
8	2.853e-006	0.0143	0.8215	SCB22A303D SFL2P4BIS T8PREREC %T8
9	2.845e-006	0.0142	0.8358	SMP2-2P4BF SFL2P4BIS T8PREREC %T8
10	2.823e-006	0.0141	0.8499	SFL2P4BIS T8PREREC %T8 SST2-2F6BP
11	2.682e-006	0.0134	0.8633	SWREC SFL2P4BIS SMV214701K
12	2.181e-006	0.0109	0.8742	SFL2P4BIS T8PREREC %T8 SCV22SW2BN
13	1.929e-006	0.0097	0.8839	SFL2P4BIS SMP2-2P4AF SHF2-2P4BL
14	1.915e-006	0.0096	0.8935	SFL2P4BIS SST2-2F6AP SHF2-2P4BL
15	1.793e-006	0.0090	0.9025	%T3 SWREC SFL2P4BIS SMP2-2P4AA
16	1.743e-006	0.0087	0.9112	SFL2P4BIS %T10 T8PREREC %T8
17	1.542e-006	0.0077	0.9189	SWREC SFL2P4BIS SCV22SW2AK
18	1.492e-006	0.0075	0.9264	SFL2P4BIS SMP2-2P4BA SMP2-2P4AF
19	1.481e-006	0.0074	0.9338	SFL2P4BIS SMP2-2P4BA SST2-2F6AP
20	7.913e-007	0.0040	0.9378	SWREC SFL2P4BIS SXV22SW3AK
21	5.649e-007	0.0028	0.9406	SFL2P4BIS T8PREREC %T8 SMV214191K
22	5.649e-007	0.0028	0.9434	SFL2P4BIS T8PREREC %T8 SMV214725K
23	5.649e-007	0.0028	0.9463	SFL2P4BIS T8PREREC %T8 SMV214181K
24	4.985e-007	0.0025	0.9488	%T3 SWREC SFL2P4BIS SCB22A302D
25	4.691e-007	0.0023	0.9511	SWREC SFL2P4BIS SCB22A302R
26	4.147e-007	0.0021	0.9532	SCB22A303D SFL2P4BIS SMP2-2P4AF
27	4.134e-007	0.0021	0.9552	SMP2-2P4BF SFL2P4BIS SMP2-2P4AF
28	4.116e-007	0.0021	0.9573	SCB22A303D SFL2P4BIS SST2-2F6AP
29	4.104e-007	0.0021	0.9594	SMP2-2P4BF SFL2P4BIS SST2-2F6AP
30	4.104e-007	0.0021	0.9614	SFL2P4BIS SST2-2F6BP SMP2-2P4AF
31	4.073e-007	0.0020	0.9635	SFL2P4BIS SST2-2F6BP SST2-2F6AP
32	4.051e-007	0.0020	0.9655	SMM2CCFMDP SWREC SFL2P4BIS
33	4.035e-007	0.0020	0.9675	DCD22304XR SFL2P4BIS T8PREREC %T8
34	3.831e-007	0.0019	0.9694	SFL2P4BIS SMV214701K SHF2-2P4BL
35	3.810e-007	0.0019	0.9713	%T3 SWREC SFL2P4BIS SCV22SW2AN
36	3.249e-007	0.0016	0.9730	SFL2P4BIS T8PREREC %T8 SCV22SW2BK
37	3.170e-007	0.0016	0.9745	SFL2P4BIS SCV22SW2BN SMP2-2P4AF
38	3.146e-007	0.0016	0.9761	SFL2P4BIS SCV22SW2BN SST2-2F6AP
39	2.963e-007	0.0015	0.9776	SFL2P4BIS SMP2-2P4BA SMV214701K
40	2.561e-007	0.0013	0.9789	%T3 SFL2P4BIS SMP2-2P4AA SHF2-2P4BL
41	2.533e-007	0.0013	0.9802	SFL2P4BIS %T10 SMP2-2P4AF
42	2.515e-007	0.0013	0.9814	SFL2P4BIS %T10 SST2-2F6AP
43	2.203e-007	0.0011	0.9825	SFL2P4BIS SCV22SW2AK SHF2-2P4BL
44	1.981e-007	0.0010	0.9835	%T3 SFL2P4BIS SMP2-2P4AA SMP2-2P4BA
45	1.704e-007	0.0009	0.9844	SFL2P4BIS SMP2-2P4BA SCV22SW2AK
46	1.667e-007	0.0008	0.9852	SFL2P4BIS T8PREREC %T8 SXV22SW3BK
47	1.130e-007	0.0006	0.9858	SFL2P4BIS SXV22SW3AK SHF2-2P4BL

Rezultati vrednovanja - konvencionalni pristup

```
48 9.883e-008 0.0005 0.9863 SCB22A303R SFL2P4BIS T8PREREC %T8
49 8.742e-008 0.0004 0.9867 SFL2P4BIS SMP2-2P4BA SXV22SW3AK
50 8.237e-008 0.0004 0.9871 SCB22A303D SFL2P4BIS SMV214701K
51 8.211e-008 0.0004 0.9875 SFL2P4BIS SMV214181K SMP2-2P4AF
52 8.211e-008 0.0004 0.9879 SMP2-2P4BF SFL2P4BIS SMV214701K
53 8.211e-008 0.0004 0.9883 SFL2P4BIS SMV214191K SMP2-2P4AF
54 8.211e-008 0.0004 0.9888 SFL2P4BIS SMV214725K SMP2-2P4AF
55 8.150e-008 0.0004 0.9892 SFL2P4BIS SMV214725K SST2-2F6AP
56 8.150e-008 0.0004 0.9896 SFL2P4BIS SMV214191K SST2-2F6AP
57 8.150e-008 0.0004 0.9900 SFL2P4BIS SST2-2F6BP SMV214701K
58 8.150e-008 0.0004 0.9904 SFL2P4BIS SMV214181K SST2-2F6AP
59 7.121e-008 0.0004 0.9907 %T3 SFL2P4BIS SCB22A302D SHF2-2P4BL
60 6.702e-008 0.0003 0.9911 SFL2P4BIS SCB22A302R SHF2-2P4BL
61 6.296e-008 0.0003 0.9914 SFL2P4BIS SCV22SW2BN SMV214701K
62 5.864e-008 0.0003 0.9917 DCD22304XR SFL2P4BIS SMP2-2P4AF
63 5.820e-008 0.0003 0.9920 DCD22304XR SFL2P4BIS SST2-2F6AP
64 5.787e-008 0.0003 0.9923 SMM2CCFMDP SFL2P4BIS SHF2-2P4BL
65 5.507e-008 0.0003 0.9925 %T3 SFL2P4BIS SCB22A302D SMP2-2P4BA
66 5.507e-008 0.0003 0.9928 SCB22A303D %T3 SFL2P4BIS SMP2-2P4AA
67 5.490e-008 0.0003 0.9931 SMP2-2P4BF %T3 SFL2P4BIS SMP2-2P4AA
68 5.449e-008 0.0003 0.9934 %T3 SFL2P4BIS SST2-2F6BP SMP2-2P4AA
69 5.443e-008 0.0003 0.9936 %T3 SFL2P4BIS SCV22SW2AN SHF2-2P4BL
70 5.183e-008 0.0003 0.9939 SFL2P4BIS SMP2-2P4BA SCB22A302R
71 5.031e-008 0.0003 0.9942 SFL2P4BIS %T10 SMV214701K
72 4.737e-008 0.0002 0.9944 SCB22A303D SFL2P4BIS SCV22SW2AK
73 4.722e-008 0.0002 0.9946 SFL2P4BIS SCV22SW2BK SMP2-2P4AF
74 4.722e-008 0.0002 0.9949 SMP2-2P4BF SFL2P4BIS SCV22SW2AK
75 4.687e-008 0.0002 0.9951 SFL2P4BIS SST2-2F6BP SCV22SW2AK
76 4.687e-008 0.0002 0.9953 SFL2P4BIS SCV22SW2BK SST2-2F6AP
77 4.475e-008 0.0002 0.9956 SMM2CCFMDP SFL2P4BIS SMP2-2P4BA
78 4.209e-008 0.0002 0.9958 %T3 SFL2P4BIS SCV22SW2AN SMP2-2P4BA
79 4.209e-008 0.0002 0.9960 %T3 SFL2P4BIS SMP2-2P4AA SCV22SW2BN
80 3.974e-008 0.0002 0.9962 %T3 SFL2P4BIS DBD202D23F
81 3.621e-008 0.0002 0.9964 SFL2P4BIS SCV22SW2BN SCV22SW2AK
82 2.894e-008 0.0001 0.9965 SFL2P4BIS %T10 SCV22SW2AK
83 2.430e-008 0.0001 0.9966 SCB22A303D SFL2P4BIS SXV22SW3AK
84 2.423e-008 0.0001 0.9967 SMP2-2P4BF SFL2P4BIS SXV22SW3AK
85 2.423e-008 0.0001 0.9969 SFL2P4BIS SXV22SW3BK SMP2-2P4AF
86 2.405e-008 0.0001 0.9970 SFL2P4BIS SXV22SW3BK SST2-2F6AP
87 2.405e-008 0.0001 0.9971 SFL2P4BIS SST2-2F6BP SXV22SW3AK
88 1.858e-008 0.0001 0.9972 SFL2P4BIS SCV22SW2BN SXV22SW3AK
89 1.631e-008 0.0001 0.9973 SFL2P4BIS SMV214725K SMV214701K
90 1.631e-008 0.0001 0.9974 SFL2P4BIS SMV214191K SMV214701K
91 1.631e-008 0.0001 0.9974 SFL2P4BIS SMV214181K SMV214701K
92 1.531e-008 0.0001 0.9975 SCB22A303D %T3 SFL2P4BIS SCB22A302D
93 1.526e-008 0.0001 0.9976 SMP2-2P4BF %T3 SFL2P4BIS SCB22A302D
94 1.515e-008 0.0001 0.9977 %T3 SFL2P4BIS SST2-2F6BP SCB22A302D
95 1.485e-008 0.0001 0.9977 SFL2P4BIS %T10 SXV22SW3AK
96 1.441e-008 0.0001 0.9978 SCB22A303D SFL2P4BIS SCB22A302R
97 1.436e-008 0.0001 0.9979 SCB22A303R SFL2P4BIS SMP2-2P4AF
98 1.436e-008 0.0001 0.9980 SMP2-2P4BF SFL2P4BIS SCB22A302R
99 1.426e-008 0.0001 0.9980 SFL2P4BIS SST2-2F6BP SCB22A302R
100 1.426e-008 0.0001 0.9981 SCB22A303R SFL2P4BIS SST2-2F6AP
```

Execution time 1 seconds (gen:0, exp:0, abs:1), Return Code = 1

Literatura

- [1] Sauergoff, M., Wegener, I., Werchner, R., “Optimal ordered Binary Decision Diagrams for read-once formulas”, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 103, No. 1-3, July 2000, str. 237-258.
- [2] Rauzy, A., “BDD for Reliability Studies”, in *Handbook of Performability Engineering*, Misra, K., (ur.). London, Velika Britanija: Springer-Verlag, 2008, str. 381-396.
- [3] Ahearne, J., 1979 Annual Report. Washington, SAD: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1980.
- [4] Maier, M., Reichtin, E., *The Art of Systems Architecting*. Boca Raton, SAD: CRC Press, 2000.
- [5] Minato, S., *Binary Decision Diagrams and Applications for VLSI CAD*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [6] Drechsler, R., Becker, B., *Binary Decision Diagrams – Theory and Implementation*. Dordrecht, Nizozemska: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [7] Wegener, I., *Branching Programs and Binary Decision Diagrams – Theory and Applications*. Philadelphia, SAD: SIAM, 2000.
- [8] Ebdndt, R., Fey, G., Drechsler, R., *Advanced BDD Optimization*. Dordrecht, Nizozemska: Springer, 2005.
- [9] Garey, M., Johnson, D., *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. New York, SAD: W.H. Freeman and Company, 1979.
- [10] Rudich, S., “Complexity Theory: From Gödel to Feynman”, in *Computational Complexity Theory*, Rudich, S., Wigderson, A., (ur.). Princeton, SAD: AMS / IAS, 2004, str. 5-85.
- [11] Vaughan, H. E., “Complete sets of logical functions”, *Transactions of American Mathematical Society*, Vol. 51, No. 0, 1942, str. 117–132.

- [12] Posthoff, C., Steinbach, B., Logic Functions and Equations. Dordrecht, Nizozemska: Springer, 2004.
- [13] Sarapa, N., Teorija vjerojatnosti. Zagreb, Hrvatska: Školska knjiga, 2002.
- [14] Elezović, N., Vjerojatnost i statistika. Zagreb, Hrvatska: Element, 2018.
- [15] Forbes, C., Statistical Distributions. New Jersey, USA: Wiley, 2010.
- [16] Barlow, R., Proschan, F., Mathematical Theory of Reliability. Philadelphia, SAD: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1996.
- [17] Ross, S., "Reliability Theory", in Introduction to Probability Models - Eleventh Edition. Oxford, Velika Britanija: Elsevier Inc., 2014, str. 559-606.
- [18] U. Berg, Risk Spectrum: Theory Manual - Version 2.1, RELCON Teknik AB, Sundbyberg, Švedska, 1994.
- [19] Čepin, M., Reliability Block Diagram. London, Ujedinjeno Kraljevstvo: Springer, 2011.
- [20] R.H. Sloan, B. S., Turan, G., "On k-Term DNF with the Largest Number of Prime Implicants ", SIAM Journal on Discrete Mathematics, Vol. 21, No. 4, January 2008, str. 987-998.
- [21] Umans, C., Villa, T., Sangiovanni-Vincentelli, A., "Complexity of Two-Level Logic Minimization", IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol. 25, No. 7, July 2006, str. 1230-1246.
- [22] Feldman, V., "Hardness of approximate two-level logic minimization and PAC learning with membership queries", Journal of Computer and System Sciences, Vol. 75, No. 1, January 2009, str. 13-26.
- [23] Valiant, L., "The complexity of enumeration and reliability problems", SIAM Journal of Computing, Vol. 8, No. 3, August 1979, str. 410-421.
- [24] Wegener, I., The Complexity of Boolean Functions. New York, SAD: Wiley and Sons Ltd, 1987.
- [25] Rosenthal, A., "Computer scientist looks at reliability computations", in Reliability and fault tree analysis, Berkeley, CA, SAD, September 1975, str. 133-152.
- [26] Knuth, D., "Stanford center for professional developments", dostupno na: <http://scpd.stanford.edu/free-stuff/engineering-archives/donald-e-knuth-lectures> (15. kolovoz 2019.).

- [27] Meinel, C., Theobald, T., Algorithms and Data Structures in VLSI Design. Berlin Heidelberg, Njemačka: Springer-Verlag, 1998.
- [28] Swamy, G., "An Exact Logic Minimizer Using Implicit Binary Decision Diagram Based Methods", Magistarski rad, University of California, Berkeley, CA, SAD, 1993.
- [29] Lee, C., "Representation of switching circuits by binary-decision programs", Bell System Technical Journal, Vol. 38, No. 4, July 1959, str. 985-999.
- [30] Bryant, R., "Graph-based algorithms for Boolean function manipulation", IEEE Transactions on Computers, Vol. C-35, No. 8, August 1986, str. 677-691.
- [31] Shannon, C., "The Synthesis of Two-Terminal Switching Circuits", Bell System Technical Journal, Vol. 28, No. 1, January 1949, str. 59-98.
- [32] Veljan, D., Kombinatorika s teorijom grafova. Zagreb, Hrvatska: Školska knjiga, 1989.
- [33] Cormen, T., Leiserson, C., Rivest, R., Stein, C., Introduction to Algorithms, Second Edition. Cambridge, SAD: MIT Press and McGraw-Hill, 2001.
- [34] McCluskey, E., "Minimization of Boolean functions", Bell System Technical Journal, Vol. 35, No. 6, November 1956, str. 1417-1444.
- [35] Coudert, O., "Two-level logic minimization: An overview", Integration, Vol. 17, No. 2, October 1994, str. 97-140.
- [36] Morreale, E., "Recursive operators for prime implicant and irredundant normal form determination", IEEE Transactions on Computers, Vol. C-19, No. 6, June 1970, str. 504-509.
- [37] Rauzy, A., Dutuit, Y., "Exact and truncated computations of prime implicants of coherent and non-coherent fault trees within Aralia", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 58, No. 2, November 1997, str. 127-144.
- [38] Quine, W., "Two Theorems about Truth-Functions", Journal of Symbolic Logic, Vol. 19, No. 2, Jun 1954, str. 142-143.
- [39] Rauzy, A., "New algorithms for fault trees analysis", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 40, No. 3, 1993, str. 203-211.
- [40] Knuth, D., The Art of Computer Programming, Volume IVA. Boston, SAD: Addison-Wesley, 2011.
- [41] Knuth, D., The Art of Computer Programming, Volume III. Boston, SAD: Addison-Wesley, 1998.

- [42] Rauzy, A., “Mathematical Foundations of Minimal Cutsets”, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 50, No. 5, December 2001, str. 389-396.
- [43] Vrbanić, I., Samanta, P., Risk Importance Measures in the Design and Operation of Nuclear Power Plants. New York, SAD: Brookhaven National Laboratory, 2017.
- [44] van der Borst, M., Schoonakker, H., “An overview of PSA importance measures”, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 72, No. 3, June 2001, str. 241-245.
- [45] Breitbart, Y., Hunt, H., Rosenkrantz, D., “On the size of binary decision diagrams representing Boolean functions”, Theoretical Computer Science, Vol. 145, No. 1-2, July 1995, str. 45-69.
- [46] Bollig, B., Wegener, I., “Asymptotically Optimal Bounds for OBDDs and the Solution of Some Basic OBDD Problems”, Journal of Computer and System Sciences, Vol. 61, No. 3, December 2000, str. 558-579.
- [47] Hayase, K., Imai, H., “OBDDs of a Monotone Function and Its Prime Implicants”, Theory of Computing Systems, Vol. 31, No. 5, October 1998, str. 579-591.
- [48] Meinel, C., Slobodova, A., “On the complexity of constructing optimal ordered binary decision diagrams”, in Mathematical Foundations of Computer Science 1994., Privara, I., Rován, B., Ruzička, P., (ur.). Berlin, Njemačka: Springer, 2004, str. 515-524.
- [49] Bryant, R., “On the Complexity of VLSI Implementations and Graph Representations of Boolean Functions with Application to Integer Multiplication”, IEEE Transactions on Computers, Vol. C-40, No. 2, February 1991, str. 205-213.
- [50] Sieling, D., “On the existence of polynomial time approximation schemes for OBDD minimization”, in Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science STACS 1998, Morvan, M., Meinel, C., Krob, D., (ur.). Berlin, Njemačka: Springer, 2005, str. 205-215.
- [51] Friedman, S., Supowitz, K., “Finding the optimal variable ordering for binary decision diagrams”, in Proceedings of the 24th ACM/IEEE Design Automation Conference, Miami Beach, FL, SAD, June 1987, str. 348-356.
- [52] Rudel, R., “Dynamic variable ordering for ordered binary decision diagrams”, in Proceedings of IEEE International Conference on Computer Aided Design, Santa Clara, CA, SAD, November 1993, str. 42-47.
- [53] Matuzas, V., Contini, S., “On the efficiency of functional decomposition in fault tree analysis”, Journal of Risk and Reliability, Vol. 226, No. 6, December 2012, str. 635-645.

- [54] Mordechai, B., Mathematical logic for computer science. London, Velika Britanija: Springer-Verlag, 2001.
- [55] Vuković, M., Matematička logika. Zagreb, Hrvatska: Element, 2009.
- [56] Wang, J., Chen, S., Wang, F., "A new decomposition algorithm for complex voting gates processing in qualitative fault tree analysis", Journal of Risk and Reliability, Vol. 229, No. 6, July 2015, str. 568-575.
- [57] Remenyte, R., Andrews, J., "Qualitative analysis of complex modularized fault trees using Binary Decision Diagrams", Journal of Risk and Reliability, Vol. 220, No. 1, June 2006, str. 45-53.
- [58] Kohda, T., Henley, E., Inoue, K., "Finding modules in fault trees", IEEE Transactions on Reliability, Vol. C-38, No. 2, June 1989, str. 165-176.
- [59] Dutuit, Y., Rauzy, A., "A linear-time algorithm to find modules of fault trees", IEEE Transactions on Reliability, Vol. C-45, No. 3, September 1996, str. 422-425.
- [60] Banov, R., Šimić, Z., Grgić, D., "A new heuristics for the event ordering in binary decision diagram applied in fault tree analysis", Journal of Risk and Reliability, Vol. 234, No. 2, April 2020, str. 397-406.
- [61] Brace, K., Rudell, R., Bryant, R., "Efficient Implementation of a BDD Package", in Proceedings of the 27th ACM/IEEE Design Automation Conference, Orlando, FL, SAD, June 1990, str. 40-45.
- [62] Panda, S., Somenzi, F., "Who are the variables in your neighborhood", in Proceedings of IEEE International Conference on Computer Aided Design, San Jose, CA, SAD, November 1995, str. 74-77.
- [63] Scholl, C., Melchior, S., Hotz, G., "Minimizing ROBDD sizes of incompletely specified Boolean functions by exploiting strong symmetries", in Proceedings European design and test conference, Paris, Francuska, March 1997, str. 229-234.
- [64] Aralia, G., "Computation of prime implicants of a fault tree within Aralia", in Proceedings of the European safety and reliability association conference, Bournemouth, Velika Britanija, June 1995, str. 190-202.
- [65] Rauzy, A., "Some disturbing facts about depth-first left-most variable ordering heuristics for Binary Decision Diagrams", Journal of Risk and Reliability, Vol. 222, No. 4, December 2008, str. 573-582.

- [66] T.W. Kim, KCUT Version 4.7: User's Manual, KAERI, Daejeon, J. Korea, 1997.
- [67] Somenzi, F., "Colorado university decision diagrams", dostupno na: <https://github.com/ivmai/cudd> (28. srpnja 2019.).

Popis oznaka

BDD	Binarni dijagrami odlučivanja (eng. Binary Decision Diagrams)
CNF	Konjunktivna normalna forma (eng. Conjunctive Normal Form)
DAG	Usmjereni aciklički graf (eng. Directed Acyclic Graph)
DFLM	Kranji lijevi po dubini (eng. Depth-First Left-Most)
DFT	Obilazak po dubini (eng. Depth First Traversal)
DNF	Disjunktivna normalna forma (eng. Disjunctive Normal Form)
DTM	Deterministički Turingov stroj (eng. Deterministic Turing Machine)
FT	Stablo kvara (eng. Fault Tree)
IAEA	Međunarodna atomska agencija (eng. International Atomic Energy Agency)
MCS	Skup minimalnih presjeka (eng. Minimal Cuts Set)
MPS	Skup minimalnih putanja (eng. Minimal Paths Set)
NDTM	Nedeterministički Turingov stroj (eng. Non-deterministic Turing Machine)
OBDD	Uređeni binarni dijagrami odlučivanja (eng. Ordered Binary Decision Diagrams)
RBD	Blok dijagrami pouzdanosti (eng. Reliability Block Diagram)
ROBDD	Reducirani uređeni binarni dijagrami odlučivanja
TM	Turingov stroje (eng. Turing Machine)
VLSI	Sklopovi visokog stupnja integracije (eng. Very Large Scale Integration)
ZDD	Dijagrami odlučivanja sa zatajenom nulom (eng. Zero-suppressed Decision Diagrams)

Popis slika

1.1. Simplificirani prikaz nuklearne elektrane Krško (izvor: NEK i Elektroprojekt Zagreb)	2
2.1. Normalna razdioba za slučajnu varijablu $X \sim N(\mu, \sigma^2)$	21
2.2. Model serijskog sustava	25
2.3. Model paralelnog sustava	26
2.4. Pojednostavljena shema sustava hlađenja u NEK	32
2.5. Primjer stabla kvara za pojednostavljeni događaj nestanka hlađenja	41
3.1. BDD graf funkcije $f(x, y, z) = (x \vee z) \wedge (y \vee z)$	48
3.2. ROBDD graf funkcije $f(x, y, z) = (x \vee z) \wedge (y \vee z)$	49
3.3. ZDD za skup $\{\{z\}, \{x, y\}\}$	54
3.4. BDD graf za minimalni DNF zapis stabla kvara 2.5	62
4.1. Jednostavan primjer modela stabla kvara	80
4.2. Stablo kvara iz slike 4.1 nakon ekspanzije G_3 vrata	82
4.3. Binarno stablo za logičku formulu $((x_1 \wedge x_2) \vee (x_3 \wedge x_4)) \wedge ((x_5 \vee x_6) \wedge x_7)$. . .	84
4.4. Usporedba broja BDD vrhova za DFLM i novu heuristiku na srednje velikim modelima	92
4.5. Interval rezultata za BDD broj vrhova na NEK modelima stabla kvara	94

Popis tablica

2.1. Binarne logičke funkcije	11
2.2. Primjer logičke funkcije	11
3.1. Definicija i implementacija mjera važnosti	65
3.2. Usporedni prikaz izračuna parametara pouzdanosti na stablu kvara	67
4.1. Broj BDD vrhova za DFLM i novu heuristiku na srednje velikim modelima . . .	91
4.2. Usporedba broja BDD vrhova za DFLM i novu heuristiku na velikim modelima	93
4.3. Vjerojatnost vršnog događaja primjenom algoritma: 4, 5, 6	96
4.4. Dovoljan broj minimalnih presjeka za primjenu konvencionalnog pristupa . . .	97
A1.1. Svojstva modela stabla kvara iz literature	106
A1.2. Svojstva velikih modela iz nuklearne energetike	107
A1.3. Svojstva BDD zapisa i skupa minimalnih presjeka	108
A2.1. Statistika izvođenja nove heuristike na primjerima iz literature	110
B0.1. Rezultati vrednovanja za model 2.5	113

Popis algoritama

1.	Binarna logička operacija na BDD grafu (Bryant)	58
2.	Operator razlike za minimizaciju DNF zapisa monotone funkcije (Rauzy)	60
3.	Nalaženje minimalnog DNF zapisa monotone logičke funkcije (Rauzy)	61
4.	Uvjetna vjerojatnost uz interpretaciju $\sigma(f)$	64
5.	Gornja ograda iz skupa minimalnih presjeka	68
6.	Gornja ograda iz rijetkih događaja	69
7.	Odabir podskupa skupa minimalnih presjeka	70
8.	Nalaženje optimalnog redoslijeda varijabli (Friedman & Supowith)	75
9.	Dinamičko poboljšanje redoslijeda varijabli sijanjem (Rudell)	77
10.	Heuristika za kombiniranje više redoslijeda	86
11.	Heuristika za određivanje redoslijeda za jedna vrata	88
12.	Heuristika za određivanje redoslijeda za stablo kvara	89

Životopis

Mr. sc. Reni Banov rođen je 1964. godine u Zadru, Hrvatska. Sveučilišni studij matematike završava na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagreb a akademski stupanj magistra tehničkih znanosti stječe na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu.

Još tijekom svog studija aktivno se bavi računalnim programiranjem, a po završetku istog, posvećuje se znanstvenom i stručnom radu usmjerujući svoje zanimanje na područje teorije rizika i matematičke teorije pouzdanosti primijenjene na kompleksne sustave u nuklearnoj energetici. Tijekom svoje profesionalne karijere razvija visoku stručnost na području IT tehnologija te se iskazuje izuzetnim znanjem i iskustvom u modeliranju kompleksnih sustava posebice modeliranju rizika.

U brojnim IT projektima za domaće i inozemne poslovne partnere sudjeluje kao savjetnik, projektant, programer i voditelj projekta. Osim toga odobreni je ocjenjivač za projekte financirane iz međunarodnih znanstvenih i tehničkih programa. Autor je više znanstvenih i stručnih radova objavljenih u domaćim i stranim časopisima i konferencijama s međunarodnom recenzijom.

Pored navedenog, Reni Banov redovni je predavač iz matematičkih kolegija na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu.

Član je znanstvenih i stručnih društava: *Hrvatsko matematičko društvo (HMD)*, *American Mathematical Society (AMS)*, *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, *Association for Computing Machinery (ACM)*.

Popis objavljenih djela

Rad u časopisu

1. Banov, R., Šimić, Z., Grgić, D., "A new heuristics for the event ordering in binary decision diagram applied in fault tree analysis," *Journal of Risk and Reliability*, Vol. 234, No. 2, April 2020, str. 397-406.
2. Šterc, D., Banov, R., Ricci, M., "Interpretacija pojma integrala za studente elektrotehnike," *Poučak*, Vol. 19, No. 73, April 2018, str. 58-67.
3. Šimić, Z., Zerger, B., Banov, R. "Development and first application of an operating events ranking tool," *Nuclear engineering and design*, Vol. 282, February 2015, str. 36-43.
4. Šimić, Z., Zerger, B., Banov, R., "Uncertainty Analysis of Method-Based Operating Event Groups Ranking," *Science and Technology of Nuclear Installations*, Vol. September 2014, str. 1-12.

Rad za konferenciju ili zbornik

1. Banov, R., "Computing Minimal DNF of Boolean Functions for Digital Implementations," 20th Central European Conference on Cryptology, June 2020
2. Šimić, Z., Banov, R., Perić, K., "Are events with different significance correlated? Quantitative analysis of the correlation between events with different safety significance," *Proceedings of the International Conference on Informations and Digital Technologies*, July 2019
3. Banov, R., Šimunec, Z., "MECODES – A New Collaboration Solution for the ECAD–MCAD Integration," *Industrijski Forum IRT*, June 2019, str. 155-158.
4. Banov, R., Šimić, Z., Šterc, D., "BDD Based Fault Tree Analysis in Brief," *Proceedings of the 12th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids*, June 2018
5. Šimić, Z., Peinador, V.M., Banov, R., "A meta-study of nuclear power plants operational experience topical studies examining trends, characteristics and lessons learned," 26th SRA-E Annual Conference, June 2017, str. 132-133.
6. Medaković, S., Banov, R., "Assessment of NPP Krško accident impact on the population by means of the nonlinear statistical model using the RODOS software package," *Proceedings of the 10th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids*, June 2014
7. Banov, R., Šimić, Z., Šterc, D., "Short overview of PSA quantification methods, pitfalls on the road from approximate to exact results," *Proceedings of the 10th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids*,

June 2014

8. Šimić, Z., Banov, R., "Development of the Operating Events Groups Ranking Tool," Proceedings of the 10th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, June 2014
9. Banov, R., Šterc, D., "Smanjenje veličine binarnih dijagrama odlučivanja korištenjem graničnih rezultata iz VLSI dizajna," Zbornik radova Elektrotehničkog odjela, May 2014, str. 63-74.
10. Šimić, Z., Banov, R., Mikuličić, V., "PSA Model Quantification Comparison between BDD and Conventional Approach," Proceedings of the TOPSAFE 2008, International Topical Meeting on Safety of Nuclear Installations, 2008
11. Šimić, Z., Banov, R., Mikuličić, V., "Binary Decision Tree Development for Probabilistic Safety Assessment Applications," International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, May 2008
12. Banov, R., Šimić, Z., Mikuličić, V., "One heuristic to minimize BDD representation of the Fault Tree," International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, May 2008
13. Šimić, Z., Banov, R., Vuković, I., Mikuličić, V., "Computing the Top Event Uncertainty with Binary Decision Diagrams," International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, June 2004
14. Banov, R., Šimić, Z., Mikuličić, V., "Benchmark Tests of a new Fault Tree Engine BDDCUT," International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, November 2000
15. Banov, R., Šimić, Z., Mikuličić, V., "Reordering Build Phase in ROBDD construction to reduce memory overhead," International Conference on Mathematical Methods in Reliability MMR2000, July 2000
16. Banov, R., Šimić, Z., Mikuličić, V., "Computing the Probabilities of the Top Event from the ROBDDs," International Conference on Mathematical Methods in Reliability MMR2000, July 2000
17. Banov, R., Šimić, Z., Mikuličić, V., "New Faster and Complete Approach to Quantify PRA," International Conference on Probabilistic Safety Assessments, August 1999
18. Mikuličić, V., Šimić, Z., Banov, R., "Analiza nesigurnosti u vjerojatnosnoj analizi sigurnosti nuklearnih elektrana," Zbornik Prvog simpozija Hrvatskog nuklearnog društva, Rujan 1993, str. 184-190

Biography

Reni Banov, M.Sc. was born in Zadar, Croatia, in 1964. He completed his B.Sc. in Applied Mathematics from the University of Zagreb Faculty of Science and received the M.Sc. degree in Technical Sciences from the University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing.

During his university years he actively practiced computer programming. After graduating, he continued his scientific and professional work focusing in particular on the risk theory and mathematical theory of reliability applied to complex systems in nuclear engineering. Throughout his professional career he developed a high level of expertise in the field of IT technologies, demonstrating outstanding knowledge and experience in complex systems modelling, particularly risk modelling.

In numerous IT projects with domestic and foreign business partners Mr. Reni Banov has been engaged as a consultant, designer, programmer and project manager. Further to this, he is an approved evaluator in projects funded by international scientific and technical programmes. He is the author of numerous research papers and professional contributions published in domestic and foreign scientific journals and periodicals and conferences.

Mr. Banov holds a lecturing position in mathematics at the Zagreb University of Applied Sciences.

He is a member of scientific and professional societies: *Croatian Mathematical Society (HMD)*, *American Mathematical Society (AMS)*, *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, *Association for Computing Machinery (ACM)*.

Članak

A new heuristics for the event ordering in binary decision diagram applied in fault tree analysis

Proc IMechE Part O:
J Risk and Reliability
2020, Vol. 234(2) 397–406
© IMechE 2019



Article reuse guidelines:

sagepub.com/journals-permissions

DOI: 10.1177/1748006X19879305

journals.sagepub.com/home/pio



Reni Banov¹ , Zdenko Šimić² and Davor Grgić³

Abstract

Fault tree is a common approach in probabilistic risk assessment of complex engineering systems. Since their introduction, binary decision diagrams proved to be a valuable tool for complete quantification of hard fault tree models. As is known, the size of the binary decision diagram representation is mainly determined by the quality of the selected fault tree event ordering scheme. Finding the optimal event ordering for binary decision diagram representation is a computationally intractable problem, for which reason heuristic approaches are applied to find reasonable good ordering schemes. The existing method for finding optimal ordering schemes related to special types of *fan-in 2 read-once* formulas is employed in our research to develop a new heuristic for fault tree. Various fault tree simplification methods are used for the sake of reducing fault tree model discrepancy from *fan-in 2 read-once* formulas. The reduced fault tree is traversed in a depth-first manner, as for every gate, the best ordering scheme is chosen from selected sets of input permutations. The quality of the final event ordering scheme is compared to orderings produced with depth-first left most heuristic on a set of fault tree models addressed in the literature as well as on a set of our hard models. Our method proves to be a useful heuristic for finding good static event ordering, and it compares favourably to the known heuristic based on a depth-first left most assignment approach.

Keywords

Binary decision diagrams, event ordering, fault tree analysis, probabilistic risk assessment, reliability engineering

Date received: 2 March 2018; accepted: 6 September 2019

Introduction

The fault tree (FT) is frequently used to analyse safety and reliability requirements of complex engineering systems. At the beginning of the 1960s, FT was introduced by Bell Laboratories for the purposes of evaluating the Minuteman I launch control system. Afterwards it was further developed by numerous civil and military contributors in order to utilize computer-based probabilistic risk assessment (PRA) tools.¹ Usually, FT models are depicted graphically in form of a tree structure which represents a logical connection between possible events during the deductive analysis of the undesired top event.

Figure 1 presents a simple model where the top event (gate G1) shows logical connections between basic events (E1–E6) leading to G1 gate. This kind of logical connection can be written in form of logical functions. The graphical view below shows the logical function $G1 = E6 \vee (2, (E1 \vee E2), E5, (E3 \wedge E4))$ where G3 operation (tagged) represents ‘2-out-of-3’ voting OR logical

expressions, meaning that it happens, if at least two of three inputs have occurred.

In general, FTs are used to investigate potential faults, modes and causes as well as to quantify their contribution to a system’s unreliability or to find importance factors for the components’ unavailability.² Traditionally, FT models are initially analysed qualitatively and then quantitatively. The qualitative analysis aims to find component failure lists which are essential and sufficient to cause the top event. These lists are often referred to as minimal cut sets and are widely

¹University of Applied Sciences, Zagreb, Croatia

²European Commission, Joint Research Centre (JRC), Petten, Netherlands

³Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, Zagreb, Croatia

Corresponding author:

Zdenko Šimić, European Commission, Joint Research Centre (JRC), P.O. Box 2, 1755ZG Petten, Netherlands.

Email: Zdenko.SIMIC@ec.europa.eu

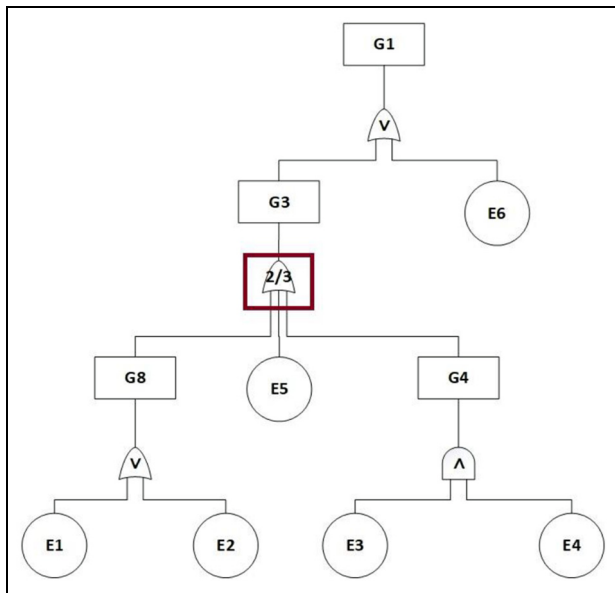


Figure 1. Example of a simple fault tree.

employed in quantitative analysis of FT models. The typical quantitative assessment is performed on minimal cut sets to find the probability of occurrences of a top event and to compute the importance measures for various contributing events.

Binary decision diagram (BDD) structures were introduced by Lee³ and Akers,⁴ although the representation of logical functions with two-terminal graphs had been developed earlier by several mathematicians.⁵ Akers systematically introduced BDDs and the basic terminology, though, the true popularity of the latter was achieved through Bryant's⁶ thesis, where the author developed modern graph-based algorithms to be worked with. Moreover, BDD variants optimized for specific areas of application were developed and analysed in the Wegener⁷ paper. Since their introduction, it has become clear that the size of BDD representations of every logical function depends on the selection of a variable ordering scheme. BDDs in which this variable ordering scheme is kept equal at all paths from the top node are denoted as ordered BDD (OBDD). Whereas, OBDD representation reduced by the Bryant reduction algorithm is defined as the reduced OBDD (ROBDD). In this article, it is assumed that the ROBDD representation is used whenever the term BDD representation is mentioned.

A BDD approach to FT analysis (FTA) has been developed (Rauzy⁸) as an alternative to conventional methods which are based on Boolean algebra rewriting rules. Since BDDs uniquely encode Shannon decomposition of logical functions by means of shared subtrees, BDDs are usually built from FT models in a bottom-up approach. The bottom-up approach is carried out conveniently by means of the *ite* connectivity defined with $ite(F, G, H) = (F \wedge G) \vee (\neg F \wedge H)$ as shown in the Rauzy⁸ paper.

For clarity sake of the bottom-up approach, let us illustrate how to build BDD for the logical expression $(G4 \wedge G8)$ from the FT example (Figure 1), assuming that the variable ordering is defined as $E3 < E1 < E6 < E4 < E2 < E5$.

Then

$$G4 = ite(E3, ite(E4, 1, 0), 0)$$

$$G8 = ite(E1, 1, ite(E2, 1, 0))$$

$$G4 \wedge G8 = ite(E3, ite(E4, 1, 0), 0) \wedge ite(E1, 1, ite(E2, 1, 0)), 0)$$

$$= ite(E3, ite(E4, 1, 0) \wedge ite(E1, 1, ite(E2, 1, 0)), 0)$$

$$= ite(E3, ite(E1, ite(E4, 1, 0), ite(E4, 1, 0) \wedge ite(E2, 1, 0)), 0)$$

$$= ite(E3, ite(E1, ite(E4, 1, 0), ite(E4, ite(E2, 1, 0), 0)), 0)$$

Immediately after the Bryant seminal work, Friedman and Supowit⁹ created an algorithm of exponential complexity for finding the optimal variable ordering. Several other algorithms were created afterwards, yet they are applicable only for small sized problems, typically up to 50 variables. Computing an optimal variable ordering, and by this the event ordering for FT analysis, happens to be a non-deterministic polynomial-time (NP)-hard problem;¹⁰ however, the decision problem of improving variable ordering is NP-complete.¹¹ Therefore, the hardness of the problem justifies the use of heuristic approaches for finding a good initial event ordering scheme for FTA^{12,13} or an event tree analysis (ETA).¹⁴

The following section briefly explains an optimal ordering algorithm for a special kind of *fan-in 2 read-once* formulas. The remainder of the article is structured in the following order: section three explains the new heuristic approach along with FT simplification techniques, section four presents the used benchmarks and results achieved, providing an explanation of the advantages of the new approach. Finally, the last section brings the conclusion, encouraging further research.

Related work

Fan-in 2 read-once formulas on n logical variables $\{x_1, \dots, x_n\}$ are represented by a binary tree having exactly n leaf nodes labelled with variables and internal nodes denoting one of the binary logical operations (AND, OR, XOR, ...) on two children nodes. For example, the following binary tree (Figure 2) represents the formula $((x_1 \wedge x_2) \vee (x_3 \wedge x_4)) \wedge ((x_5 \vee x_6) \wedge x_7)$.

The optimal variable ordering scheme for *fan-in 2 read-once* formulas can be computed with an algorithm developed by Sauerhoff et al.¹⁵ Their algorithm is based on recursive equations for binary operations $\{and, or, xor\}$. At each gate, two numbers are calculated for optimal sizes of the BDDs with or without complemented edges. From these two numbers, the recursive equations define the rules for the computation of the optimal BDD size. As pointed out in Sauerhoff et al.,¹⁵ the optimal BDD size for a single variable requires one BDD node with complemented edges, or two without. Recursively, following the single variable

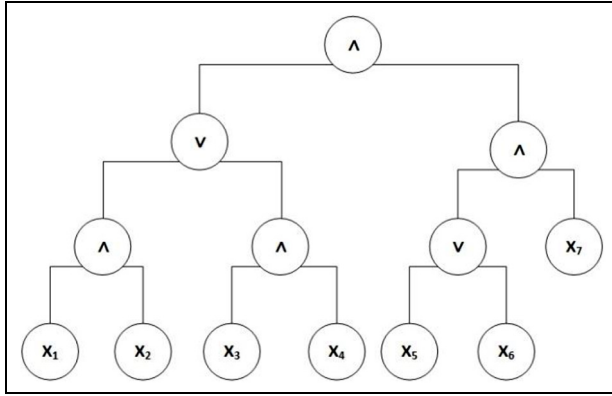


Figure 2. Example of *fan-in 2 read-once* formula: $((x_1 \wedge x_2) \vee (x_3 \wedge x_4)) \wedge ((x_5 \vee x_6) \wedge x_7)$.

case upwards to the final formula, the authors presented a way to construct an optimal ordering by using only two sets of recursive equations, one set for $\{and, or\}$ operations and another set for xor operation. In addition, they proved upper and lower bounds on an optimal BDD size for an arbitrary logical function on the restricted class of *fan-in 2 read-once* formulas. Since their algorithm is not directly applicable to FT models, it can be used in case where no overlapping between inputs to FT gate occurs, that is, in case where no formula sharing between gate inputs exists. Basically, it means that we can apply the respective algorithm with gates having only basic events as inputs or with gates having inputs from other gates without shared basic events. In addition, FT models considered in this article are models built with AND/OR gate operations, thereby enabling us to use a single set of recursive equations from their work.

Method

In this section, we are going to detail our newly developed heuristic approach to the variable ordering scheme throughout these subsections ‘FT simplification’ techniques arising from common logical equivalence rules; ‘New ordering heuristic’, which is the most important part of the new approach and ‘An outline of the algorithm’ with an optional BDD size reduction step.

FT simplification

Before the application of an ordering method, the FT structure has been simplified as much as possible. One of the approaches is to split complex FT models into simpler FTs by means of the functional decomposition with respect to a small subset of basic events.¹⁶ In this article, we perform a simpler approach based on logically equivalent formula rewriting rules¹⁷ which may be applied iteratively as long as any changes are made in the FT, that is:

- The associativity rule – elimination of all equivalence gates by exchanging the references into gates they represent

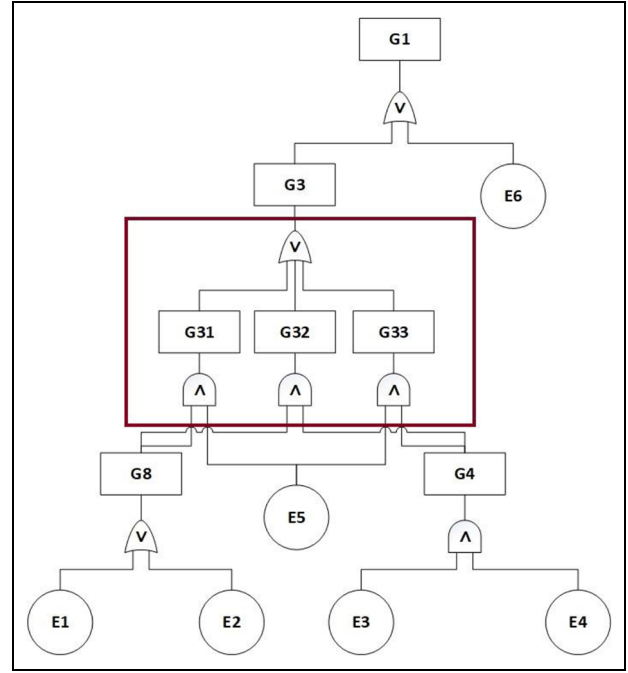


Figure 3. The G3 gate operation expanded to equivalent formula.

- The K-of-N expansion rule – elimination of all K-of-N operators by rewriting them into equivalent AND/OR combinations according to the following rule of the gate expansion: $(k, F_1, \dots, F_n) = (F_1 \wedge (k-1, F_2, \dots, F_n)) \vee (k, F_2, \dots, F_n)$ The K-of-N (voting OR) gate can be decomposed by more complex rules¹⁸ which we left for future implementations.
- Application of the idempotent law rules on the FT to eliminate the terms with multiple equal gate inputs: $X \wedge X \equiv X$, $X \vee X \equiv X$.
- By applying the law of absorption rule to the AND/OR gates, the inputs are simplified by absorbing like terms: $(X \wedge Y) \vee X \equiv X$, $(X \vee Y) \wedge X \equiv X$.

From the given example, we show that the simple FT model has been modified by the application of K-of-N expansion rule (see Figure 3). The gate G3 operation is rewritten to the equivalent combination of the AND/OR operations (tagged) as follows

$$\begin{aligned} G3 &= (2, G8, E5, G4) = G31 \vee G32 \vee G33 \\ &= (G8 \wedge E5) \vee (G8 \wedge G4) \vee (E5 \wedge G4) \end{aligned}$$

After the simplification steps, the FT has been traversed to find blocks of gates which behave like a single entity, that is, modularization.¹⁹ Generally, two module finding algorithms are widely used to reduce the computational costs of BDD operations on the FT. The first one, derived by Kohda et al.,²⁰ is based on formula rewriting rules to detect and define modules on the FTs composed from the gates with logical AND/OR operation only. The second method developed by Dutuit and

Rauzy²¹ uses a variation of the Tarjan algorithm for finding strongly connected graph components, thus being more universal since it does not depend on the gate operation. Both algorithms perform equally well on the common FT models with only AND/OR gates, consequently we employ the latter method as it does not depend on the gate operation. For instance, the simple FT model presented here entails the following module top gates: G8, G4, G3 and G1.

New ordering heuristic

Based on the algorithm for *fan-in 2 read-once* formulas, we developed an ordering approach to sequentially combine the orders from the gate inputs. The idea is to utilize, as frequently as possible, the *fan-in 2 read-once* order combination technique on non-overlapping gate inputs. To be more specific, when orders from two gate inputs do not share events, the Sauerhoff, Wegener and Wercher algorithm is applied. However, if they do share events, they are combined according to the number of BDD nodes generated for each event in these orders. For implementation, each event in order is assigned two numbers ($nodes_1$ and $nodes_2$) entailing the estimated number of BDD nodes, whereby $nodes_1$ holds the count of the BDD nodes with complemented edges, while $nodes_2$ holds the count of the BDD nodes without complemented edges. Our new order combining approach is defined by the following algorithm.

CombineOrders(g, A, π_F)

```

1  g – the gate for which we build an order
2  A – array of orders for the gates adjacent to g
3   $\pi$  – the final order for g
4   $\pi \leftarrow \pi_F$ 
5  For each order  $\pi_i$  from the array A do
6    if  $(\pi_i \cap \pi) \neq \emptyset$  then
7       $\pi_n \leftarrow \emptyset$ 
8       $nodes_{1,2}(\pi_n) \leftarrow 0$ 
9      For each event in orders  $(\pi, \pi_i)$ 
10       Let  $e_1$  be next event from  $\pi$  not present in  $\pi_i$ 
11       Let  $e_2$  be next event from  $\pi_i$  not present in  $\pi$ 
12        $s_1 \leftarrow 2 * nodes_1(e_1) + nodes_2(e_2)$ 
13        $s_2 \leftarrow 2 * nodes_1(e_2) + nodes_2(e_1)$ 
14       if  $s_1 < s_2$  then
15         append  $e_1$  to order  $\pi_n$ 
16          $nodes_1(e_1) \leftarrow nodes_1(e_1) + nodes_1(e_2)$ 
17          $nodes_2(e_1) \leftarrow s_1$ 
18       else
19         append  $e_2$  to order  $\pi_n$ 
20          $nodes_1(e_2) \leftarrow nodes_1(e_1) + nodes_1(e_2)$ 
21          $nodes_2(e_2) \leftarrow s_2$ 
22       end if
23     end for
24    $\pi \leftarrow \pi_n$ 
25 else
26    $s_1 \leftarrow 2 * nodes_1(\pi) + nodes_2(\pi_i)$ 
27    $s_2 \leftarrow 2 * nodes_1(\pi_i) + nodes_2(\pi)$ 
28    $nodes_1(\pi) \leftarrow nodes_1(\pi) + nodes_1(\pi_i)$ 

```

(continued)

Continued

CombineOrders(g, A, π_F)

```

29   if  $s_1 < s_2$  then
30     append to  $\pi$  events from  $\pi_i$  after the events from  $\pi$ 
31      $nodes_2(\pi) \leftarrow s_1$ 
32   else
33     append to  $\pi$  events from  $\pi_i$  before the events from  $\pi$ 
34      $nodes_2(\pi) \leftarrow s_2$ 
35   end if
36 end if
37 end for
38 return  $\pi$ 

```

Considering the above algorithm, the order for each gate is computed from the orders associated with the adjacent gates, which are considered from left to right (Line 5). In Line 6, we check the existence of shared events between orders; in case of their non-existence we proceed with the Sauerhoff algorithm (Lines 26–35). However, if we establish the existence of shared events the algorithm (Lines 7–24) alternatively proceeds with the implementation of our approach. For example, let us combine orders for gate G3 from intermediate gates after the simplification of the FT model. We assume that the orders

$$\begin{aligned}\pi_1 &= \{(3,6) \{E5 : (1,2), E1 : (1,2), E2 : (1,2)\}\} \\ \pi_2 &= \{(4,8) \{E3 : (1,2), E4 : (1,2), E1 : (1,2), E2 : (1,2)\}\} \\ \pi_3 &= \{(3,6) \{E5 : (1,2), E3 : (1,2), E4 : (1,2)\}\}\end{aligned}$$

are computed for gates G31, G32 and G33, respectively. On the first pass, through our approach the order π is initialized with π_1 . Since each order entails a pair of $nodes_{1,2}$ values followed by a list of basic events carrying their associated pair of $nodes_{1,2}$ values, the loop iteration proceeds as follows:

1. 0: $\pi = \{(3,6) \{E5:(1,2), E1:(1,2), E2:(1,2)\}\}, \pi_2 = \{(4,8) \{E3:(1,2), E4:(1,2), E1:(1,2), E2:(1,2)\}\}$
2. 1: $e_1 = E5:(1,2), e_2 = E3:(1,2), \pi_n = \{(2,4) \{E3:(2,4)\}\}$
3. 2: $e_1 = E5:(1,2), e_2 = E4:(1,2), \pi_n = \{(4,8) \{E3:(2,4), E4:(2,4)\}\}$
4. 3: $e_1 = E5:(1,2), e_2 = E1:(1,2), \pi_n = \{(6,12) \{E3:(2,4), E4:(2,4), E1:(2,4)\}\}$
5. 4: $e_1 = E5:(1,2), e_2 = \{E2:(1,2)\}, \pi_n = \{(8,16) \{E3:(2,4), E4:(2,4), E1:(2,4), E2:(2,4)\}\}$
6. 5: $e_1 = E5:(1,2), e_2 = \{E3:(1,2)\}, \pi_n = \{(9,17) \{E3:(2,4), E4:(2,4), E1:(2,4), E2:(2,4), E5:(1,2)\}\}$
7. 6: $\pi_n = \{(9,17) \{E3:(2,4), E4:(2,4), E1:(2,4), E2:(2,4), E5:(1,2)\}\}$
8. 7: $\pi = \{(9,17) \{E3:(2,4), E4:(2,4), E1:(2,4), E2:(2,4), E5:(1,2)\}\}, \pi_3 = \{(3,6) \{E5:(1,2), E3:(1,2), E4:(1,2)\}\}$
9. 8: $e_1 = E3:(2,4), e_2 = E5:(1,2), \pi_n = \{(2,4) \{E5:(2,4)\}\}$
10. 9: $e_1 = E3:(2,4), e_2 = E3:(1,2), \pi_n = \{(5,10) \{E5:(2,4), E3:(3,6)\}\}$
11. 10: $e_1 = E4:(2,4), e_2 = E4:(1,2), \pi_n = \{(8,16) \{E5:(2,4), E3:(3,6), E4:(3,6)\}\}$

12. 11: $e_1 = E1:(2,4)$, $e_2 = \{\}$, $\pi_n = \{(10,20) \{E5:(2,4), E3:(3,6), E4(3,6), E1:(2,4)\}\}$
13. 12: $e_1 = E2:(2,4)$, $e_2 = \{\}$, $\pi_n = \{(12,24) \{E5:(2,4), E3:(3,6), E4(3,6), E1:(2,4), E2:(2,4)\}\}$
14. 13: $\pi = \pi_n = \{(12,24) \{E5:(2,4), E3:(3,6), E4(3,6), E1:(2,4), E2:(2,4)\}\}$

By this a new order from gate inputs is computed, which herein becomes the actual order for gate G3.

An outline of the algorithm

As it is known, in the conventional approach to FTA the model is traversed in a depth-first manner, whereby actions are performed on each encountered gate. In our approach we are going to apply the FindBestOrder procedure to compute the proposed order for the observed gate. For instance, the order for G1 gate from the FT example is built by means of the FindBestOrder procedure on the following gates: G8, G4, G31, G32, G33, G3 and G1. By applying the FindBestOrder procedure we intend to generate different permutations of adjacent gate inputs and employ the new heuristic to combine the orders from them. Among all generated orderings for the specific gate, the order with the smallest BDD in size will be selected.

As presented in the above algorithm, the initialization is performed at the beginning of the procedure (Lines 4–6). The result of this initialization (denoted as π_F) is achieved by employing our heuristic to combine

that, we set the two limits for the underlying BDD engine, that is, the time limit and the maximum number of nodes allowed. The purpose of this is to reject orders which are inefficient in terms of time or nodes to be finished. The remaining adjacent gates are permuted and, by applying our heuristic, combined with π_F to create a complete order for the gate; subsequently, it is checked and best in size selected (Lines 8–19). The permutation loop is limited to 120 repetitions, which makes good trade-offs between the quality of the generated order and time to find it.

For further understanding of this procedure, let us study an example with G3 inputs {G31, G32, G33}, which are entailed in the array of orders A from adjacent gates. Within the loop we use all possible permutations of this array

$$\{G31, G32, G33\}, \{G31, G33, G32\}, \{G32, G31, G33\}, \\ \{G32, G33, G31\}, \{G33, G31, G32\}, \{G33, G32, G31\}$$

as the input to our heuristic. With the intention to build the order for top gate G1 we must combine the order for gate G3 with event E6. In the earlier presented example for CombineOrders heuristic we created the order for G3 gate, which is

$$\pi_{G3} = \{(12, 24)\{E5 : (2, 4), E3 : (3, 6), E4(3, 6), \\ E1 : (2, 4), E2 : (2, 4)\}\}$$

Both, E6 as the directly connected adjacent event and G3 as module top gate are combined with our heuristic (Lines 4–6) to the final order for G1 gate

$$\pi = \{(13, 26)\{E6 : (1, 2), E5 : (2, 4), \\ E3 : (3, 6), E4(3, 6), E1 : (2, 4), E2 : (2, 4)\}\}$$

An interesting fact arising from the upper order of our example is that, actually we expected 13 BDD nodes for the FT model, however, once it was built it eventually resulted in 10 nodes.

The generally used method for the reduction of BDD size is the dynamic reordering following the construction step, which in this case is optional (Line 20). There are various dynamic reordering schemes based on the swap of two adjacent variables in an algorithm developed by Rudell.²² Commonly used methods are group sifting²³ and minimization by exploiting of strong symmetries between variables.^{24,25} For this paper we selected the group sifting method as an optional BDD size reduction step (Line 20). For instance, the generated order from the algorithm is reduced from 10 to 9 BDD nodes for the FT model in our example, which is an optimal number of nodes for such a small example. As the results will show, the optional dynamic reordering step proves to be useful, and more importantly, being the key step for a successful construction of BDDs for large FT models.

FindBestOrder(g, A, π)

- 1 g – the gate for which we build an order
 - 2 A – array of orders for the gates adjacent to g
 - 3 F – array of orders which are fixed for all generated permutations of A
 - 4 < Move basic events from A to F which are directly adjacent to g >
 - 5 < Move orders from A to F which are module tops >
 - 6 $\pi_F \leftarrow \text{CombineOrders}(g, F, \emptyset)$
 - 7 < Initialize calculations >
 - 8 For each new permutation A_p from A do
 - 9 $\pi_n \leftarrow \text{CombineOrders}(g, A_p, \pi_F)$
 - 10 < Build BDD of g with order π_n >
 - 11 size $\leftarrow$ number of BDD nodes for gate g with order π_n
 - 12 if size < best_so_far_size then
 - 13 $\pi \leftarrow \pi_n$
 - 14 best_so_far_size $\leftarrow$ size
 - 15 end if
 - 16 if number of generated permutations greater than some limit then
 - 17 Exit For
 - 18 end if
 - 19 end for
 - 20 < Apply optional dynamic reordering step to the order π >
 - 21 return π
-

directly connected adjacent events with orders from adjacent gates which are module top gates. Following

Table 1. Results for the comparison of DFLM and new heuristic on small to medium FT models from the Aralia benchmark set.

Fault tree model			DFLM heuristic BDD size			New heuristic BDD size		
Name	Events	Gates	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
baobab1	61	84	1615	5194	16,162	2025	2207	2439
baobab2	32	40	197	346	494	226	259	290
baobab3	80	107	2992	11,461	26,509	3582	3995	4341
cea9601	186	201	11,415	215,573	1.5M	5400	8185	10,042
chinese	25	36	73	105	143	66	68	71
das9201	122	82	569	775	898	191	230	273
das9202	49	36	108	236	347	50	79	108
das9203	51	30	60	111	179	55	59	62
das9204	53	30	61	89	122	53	53	53
das9205	51	20	52	52	52	52	52	52
das9206	121	112	449	1388	2340	474	546	636
das9207	276	324	2934	13,375	47,178	3143	5395	13,229
das9208	103	145	1186	2131	5240	1270	1357	1516
das9209	109	73	110	137	191	111	156	200
das9601	122	288	1277	2343	4140	1109	1444	1843
edf9201	183	132	1706	2094	2910	1302	1391	1446
edf9202	458	435	471	689	1841	440	488	577
edf9203	362	475	8381	20,892	74,845	8338	38,372	55,828
edf9204	323	375	6864	30,958	89,934	22,544	25,458	54,402
edf9205	165	142	448	1011	2037	471	505	554
edf9206	240	362	733	4095	17,880	907	1477	1849
edfpa14b	311	290	6616	21,735	63,683	7890	22,916	52,043
edfpa14o	311	173	6829	21,805	60,925	9563	17,506	38,646
edfpa14p	124	101	2855	10,401	35,887	6579	15,526	39,259
edfpa14q	311	194	7638	23,304	79,589	4990	7108	12,336
edfpa14r	106	132	2817	9982	38,363	2714	13,951	51,827
edfpa15b	283	249	2400	7542	18,808	2322	3700	11,820
edfpa15o	283	138	2356	7910	20,817	4111	6170	9567
edfpa15p	100	80	914	4326	14,906	1703	2522	7715
edfpa15q	289	151	2175	7677	25,879	1698	2013	2333
edfpa15r	88	110	861	3543	9990	1005	1521	3227
elf9601	145	242	962	3114	7620	638	652	665
ftr10	175	94	289	1144	1928	181	220	297
isp9601	143	104	383	853	2193	238	283	346
isp9602	116	122	529	1302	2313	444	452	459
isp9603	91	95	440	1464	3203	443	481	522
isp9604	215	132	701	1103	1930	487	518	525
isp9605	32	40	185	439	748	244	244	244
isp9606	89	41	142	283	550	108	137	184
isp9607	74	65	274	469	643	122	130	140
jbd-001	533	315	5248	50,328	321,132	8569	12,191	24,280
Average BDD size ratio DFLM/new heuristic			1.1	2.8	7.6			

DFLM: depth-first left most; BDD: binary decision diagram.

Results and discussion

This section presents the test results obtained from applying the new ordering heuristic to a selected set of FT models from the literature^{26,27} and to a set of own large FTs from industry applications. The proposed ordering heuristic is compared to the best results obtained from depth-first left most (DFLM). The Colorado University Decision Diagram (CUDD) BDD package is used to implement DFLM as well as the new algorithm presented in this article. Since it is clear that there is no benefit from selecting gate inputs in any order,²⁸ we decided to perform tests with DFLM and our heuristic for 100 times with a randomized ordering of inputs at each gate. For a better assessment of the results gained with the new method, the

following statistics for top gate BDD size of each FT model were collected: *minimum* number of nodes, *average* number of nodes and *maximum* number of nodes out of 100 runs.

Comparison on small-to-medium FT models

In the first set of tests from the literature, we used 41 small-to-medium sized FTs from the Aralia benchmark test,^{26,27} that is, tests with less than 1000 events and gates aggregative. These FTs originate from different sources and have different characteristics in terms of size, structure, and number of internal connections among the gates and basic events. The results of the tests are summarized in Table 1, both for the DFLM

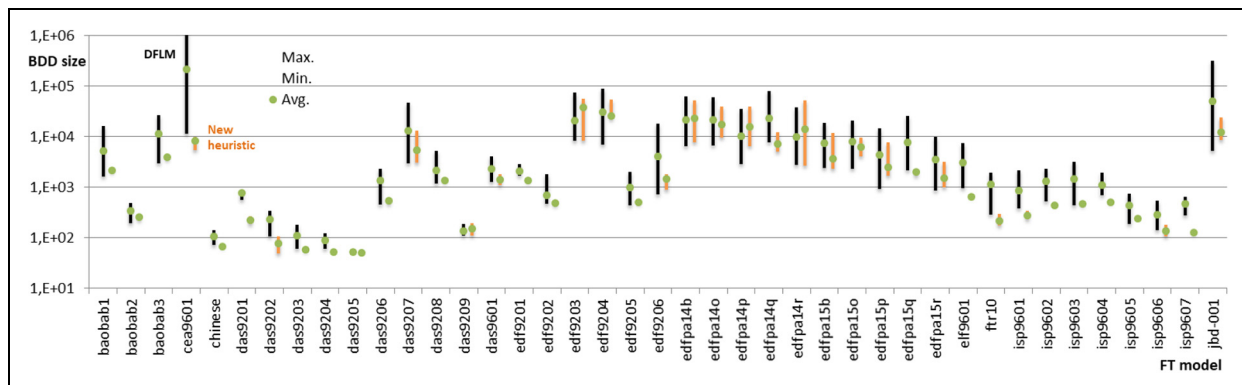


Figure 4. Graphical view of results for the comparison of DFLM (left bar/black) and the new heuristic (right bar/orange) on small-to-medium FT models from the Aralia benchmark set.

Table 2. Results for the comparison of DFLM and new heuristic for large FT models.

Fault tree model			DFLM heuristic BDD size			New heuristic BDD size		
Name	Events	Gates	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
acp	409	674	3092	15,705	31,972	3047	3270	3584
chrg	438	695	67,032	348,155	1.2M	25,305	29,626	31,505
cored1	1319	1279	n/a	n/a	n/a	19M	23M	39M
cored2	1377	1633	n/a	n/a	n/a	337M	499M	541M
dcp	447	706	43,835	265,403	1.1M	26,660	49,013	83,504
efw	692	957	350,408	2.5M	7.5M	349,251	490,275	1M
hpsi	674	940	70,827	153,712	480,635	21,369	29,370	41,164
lpsi	525	760	18,863	44,505	82,147	9516	18,962	60,552
sw	444	720	32,210	103,408	379,953	19,421	31,422	39,385
Average size ratio DFLM/new			1.9	5.4	13.0			

DFLM: depth-first left most; BDD: binary decision diagram.

and for the herein presented new approach. It is important to mention that all runs (for DFLM and the new heuristic) give variable orderings with which the BDD from the FT model was constructed within the given limits (up to 100M nodes) on the CUDD package. The results are also presented graphically in Figure 4.

The comparison shows that the best results for the new method are nearly the same as the best results achieved with the DFLM method (column Min. in Table 1). Comparing average ratios of BDD results, the new heuristic performs better than the DFLM to an average of almost three times (precisely 2.8). What is more important, in most cases the new heuristic outperforms the average DFLM results by several times, even 26 times in one case (cea9601). In addition to that, the new method appears rather stable in producing good orderings for the analysed FTs, since the average ratio between the maximum and minimum size is less than three, while for the DFLM approach it is more than 11 (more than eight if cea9601 is thrown). This proves equally the stability of the approach as well as the quality of the orders obtained by our heuristic approach.

In addition to that, a single run was made with the new heuristic to check the correlation between the estimated size and built size without sifting (Table 3 in

Appendix 1). On average, the estimated size is approximately 4.5 times bigger than the BDD built size and it is achieved in a reasonable time. The longest running time for the heuristic was approximately 5 min on the edf9202 model, which is still acceptable. It is worthwhile mentioning that in one test (das9207), the estimated size from our heuristic proved to be extremely overestimated, approximately 100 times more than the built size. Apart from that extreme result, the estimated size from our heuristic is on average two times bigger than the built size. After the optional reordering method was applied on built BDDs, the size further lowered on average by a factor of 1.85, that is, approximately 46% less BDD nodes are needed to represent a selected benchmark set.

Comparison on large FT models

In addition to tests performed on the Aralia benchmark set, we selected some of our larger FT models from nuclear industry, that is, FT models in which the sum of gates and events exceed 1000. The largest selected model (i.e. cored2) reaches the limits of the CUDD engine, while others happen to be too large for a plain DFLM heuristic. Therefore, we decide to implement the DFLM

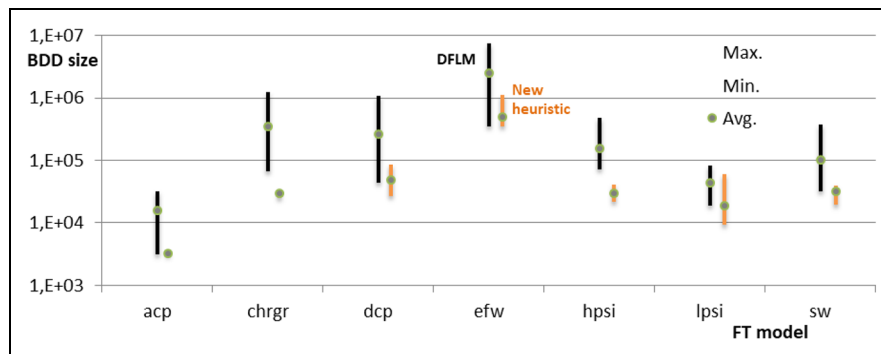


Figure 5. Results (BDD size) for the comparison of DFLM (left bar/black) and new (right bar/orange) heuristic for larger FT models.

heuristic with an automatic dynamic reordering (the group sifting method) during the BDD construction phase which is a common approach in constructing BDDs for large models. For such an extensive test, we employ the optional dynamic reordering step in FindBestOrder procedure on gate orders expecting a number of BDD nodes within the range from 1M up to 10M nodes. The tests were run for 10 times with an increased limit on the CUDD package to 1000M nodes.

The results are summarized in Table 2 and graphically presented in Figure 5. As shown in Table 2, the DFLM heuristic fails to produce the ordering within the limits on 'cored1' and 'cored2' FTs, while in other tests the DFLM heuristic, compared to our approach, performs consistently worse. In terms of the stability for the new method, the model complexity has moderate impact, since the average ratio between maximum and minimum results is less than three, similar to small-to-medium models. In the last row, it is possible to compare averaging ratios, excluding the 'cored1' and 'cored2' tests. Here, even for the best results, the new approach is consistently, nearly two times, better compared to the DFLM with automatic dynamic orderings applied during the construction phase. The average results prove that our approach performs far better yielding a ratio over five, while in one case the ratio surges convincingly higher (to 11.7 for 'chrgr').

Discussion

Considering small-to-medium sized models, both heuristics produce orderings with which the BDD representation for every FT model was built. The results on tests with small-to-medium sized models show that on the average, our heuristic produces better event ordering than the DFLM heuristic. Moreover, it can be noticed that the optional dynamic reordering proves to be helpful for both approaches. However, when applied in our heuristic it gives better results than an ordinary application of reordering at the end of the BDD creation step. The results are somewhat better for the DFLM heuristic on minimum sizes in a respectful number of cases (18 from 41). This is assumingly the result of a random selection of gate inputs in both approaches.

Finally, in the analysis of larger FT models (Table 2) the new ordering heuristic is able to produce an order with which we build the BDD representation, even in the case of the largest considered models, where DFLM heuristic failed. This indicates that our approach does not only bring better results but also has a higher capability of beneficial order finding. Additional tests on large FT models prove that dynamic reordering during the build phase is not in all cases helpful for DFLM heuristic, yet it is useful in the new heuristic. It is far better to perform dynamic reordering after the BDD has been constructed and to refrain from automatic reordering during the build phase. The cause may be that automatic reordering within the BDD build phase simply does not sufficiently dispose over information on the event dependency as they appear to be available after the BDD has been constructed.

Conclusion

The new heuristic emerges from the known approach for *fan-in 2 read-once* formulas which has been further extended to a mixed case. Combining the heuristics with the simple exhaustive search, the new complete ordering algorithm is developed and verified on test models with different structural characteristics. The results from tests performed with the new algorithm show a clear improvement over the widely used DFLM heuristic.

Also, some important positive facts as well as some important issues have been discovered. The DFLM heuristic is very sensitive to the order of gate inputs. Our ordering approach based on the *fan-in 2 read-once* formulas algorithm appears useful even when applied on large FT models. However, during the BDD construction phase on large FT models with more than 1000 events and gates, the automatic reordering is of no help.

The presented approach proves to be promising for the application on industry FT models and indicates that further research may show potential in direction of: simplification of FT models to be more like *fan-in k read-once* formulas; application of search strategies other than exhaustive search at the gate level when orders from adjacent gate inputs are combined;

investigation of different combining techniques (weight-based, greedy, AI search, ...) on overlapping orders from adjacent gate inputs; application of dynamic reordering at different points during the order construction.

Apart from the presentation of the innovative heuristic, this article also reveals inspiring ideas for further research and development of an improved event ordering heuristic for the BDD-based analysis of FT models.

Declaration of conflicting interests

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship and/or publication of this article.

Funding

The author(s) received no financial support for the research, authorship and/or publication of this article.

ORCID iDs

Reni Banov  <https://orcid.org/0000-0002-0355-4880>

Zdenko Šimić  <https://orcid.org/0000-0001-7514-8227>

References

1. Nusbaumer O and Rauzy AB. Fault tree linking versus event tree linking approaches: a reasoned comparison. *P I Mech Eng O-J Ris* 2013; 227(3): 315–326.
2. Dutuit Y and Rauzy AB. Importance factors of coherent systems: a review. *P I Mech Eng O-J Ris* 2014; 228(3): 313–323.
3. Lee CY. Representation of switching circuits by binary-decision programs. *Bell Syst Tech J* 1959; 38: 985–999.
4. Akers SB. Binary Decision Diagrams. *IEEE T Comput* 1978; 27(6): 509–516.
5. Adam A. *Truth functions and the problem of their realization by two-terminal graphs*. Budapest: Akademia Kiado, 1969.
6. Bryant RE. Graph-based algorithms for Boolean function manipulation. *IEEE T Comput* 1986; C-35(8): 677–691.
7. Wegener I. BDDs-design, analysis, complexity, and applications. *Discrete Appl Math* 2004; 138(1–2): 229–251.
8. Rauzy AB. New algorithms for fault tree analysis. *Reliab Eng Syst Safe* 1993; 40(3): 203–211.
9. Friedman SJ and Supowit KJ. Finding the optimal variable ordering for Binary Decision Diagrams. *IEEE T Comput* 1990; C-39(5): 710–713.
10. Bolling B. On the complexity of some ordering problems. In: Csuhaj-Varjú E, Dietzfelbinger M and Ésik Z (eds) *Mathematical foundations of computer science 2014 (Lecture notes in computer science)*, vol. 8635. Berlin; Heidelberg: Springer, 2014, pp.118–129.
11. Bolling B and Wegener I. Improving the variable ordering of OBDDs is NP-complete. *IEEE T Comput* 1996; C-45(9): 993–1002.
12. Yuchang M, Farong Z, Huawen L, et al. Depth-first event ordering in BDD-based fault tree analysis. *Comput Inform* 2013; 31(6): 1401–1416.
13. Yuchang M, Farong Z, Huawen L, et al. Efficient ordering heuristics in Binary Decision Diagram-based fault tree analysis. *Qual Reliab Eng Int* 2013; 29(3): 307–315.
14. Ibanez-Llano C, Melendez E and Nieto F. Variable ordering schemes to apply to the Binary Decision Diagram methodology for event tree sequences assessment. *P I Mech Eng O-J Ris* 2008; 222(1): 7–16.
15. Sauerhoff M, Wegener I and Werchner R. Optimal ordered Binary Decision Diagrams for read-once formulas. *Discrete Appl Math* 2000; 103(1–3): 237–258.
16. Matuzas V and Contini S. On the efficiency of functional decomposition in fault tree analysis. *P I Mech Eng O-J Ris* 2012; 226(6): 635–645.
17. Mordechai B. *Mathematical logic for computer science*. 2nd ed. London: Springer-Verlag, 2001.
18. Wang J, Chen S, Wang F, et al. A new decomposition algorithm for complex voting gates processing in qualitative fault tree analysis. *P I Mech Eng O-J Ris* 2015; 229(6): 568–575.
19. Remenyei R and Andrews JD. Qualitative analysis of complex modularized fault trees using Binary Decision Diagrams. *P I Mech Eng O-J Ris* 2006; 220(1): 45–53.
20. Kohda T, Henley EJ and Inoue K. Finding modules in fault trees. *IEEE T Reliab* 1989; 38(1): 165–176.
21. Dutuit Y and Rauzy AB. A linear-time algorithm to find modules of fault trees. *IEEE T Reliab* 1996; 45(3): 422–425.
22. Rudell R. Dynamic variable ordering for ordered Binary Decision Diagrams. In: *Proceedings of the 1993 IEEE/ACM international conference on computer aided design*, San Jose, CA, 7–11 November 1993, pp.42–47. New York: IEEE.
23. Panda S and Somenzi F. Who are the variables in your neighborhood. In: *Proceedings of the 1995 IEEE/ACM international conference on computer aided design (ICCAD1995)*, San Jose, CA, 5–9 November 1995, pp.74–77. New York: IEEE.
24. Panda S, Somenzi F and Plessier BF. Symmetry detection and dynamic variable ordering of decision diagrams. In: *Proceedings of the 1994 IEEE/ACM international conference on computer aided design*, San Jose, CA, 6–10 November 1994, pp.628–631. New York: IEEE.
25. Scholl C, Melchior S, Hotz G, et al. Minimizing ROBDD sizes of incompletely specified Boolean functions by exploiting strong symmetries. In: *Proceedings European design and test conference*, Paris, 17–20 March 1997, pp.229–234. New York: IEEE.
26. Rauzy AB. Some disturbing facts about depth-first leftmost variable ordering heuristics for Binary Decision Diagrams. *P I Mech Eng O-J Ris* 2008; 222(4): 573–582.
27. Groupe Aralia. Computation of prime implicants of a fault tree within Aralia. In: *Proceedings of the European safety and reliability association conference (ESREL 1995)*, Bournemouth, 26–28 June 1995, pp.190–202. London: ESRA
28. Yuchang M, Liudong X, Farong Z, et al. Choosing a heuristic and root node for edge ordering in BDD-based network reliability analysis. *Reliab Eng Syst Safe* 2014; 131: 83–93.

Appendix I

Table 3 contains the statistics from a single run of the new heuristic on a complete set of 41 FT, small to medium sized, from the Aralia benchmark set. The statistics were collected without optional dynamic variable ordering in the procedure FindBestOrder. The first column shows the estimated number of BDD nodes resulting from the order produced with our heuristic, while

the next column shows the number of BDD nodes used when it was built with CUDD engine. The third column brings the number of nodes after the group sifting method was applied on built BDD. The fourth column presents the CUDD engine report showing the peak number of BDD nodes used during the built process with that order. Eventually, the last column shows the time needed by the new heuristic to find that order.

Table 3. Statistics on estimated and built performance of the new heuristic.

Fault tree model	New heuristic execution statistics				
	Estimated BDD size	Number of nodes as built	BDD size after sifting	Peak BDD nodes	Time to find order (s)
baobab1	3489	1828	1398	8176	10.1
baobab2	523	494	114	7154	5.4
baobab3	5676	4215	3285	15,330	5.1
cea9601	6639	6070	5538	54,166	31.3
chinese	85	63	45	1022	0.6
das9201	642	525	179	4088	9.8
das9202	144	98	62	1022	3.4
das9203	115	67	52	1022	1.6
das9204	120	69	53	1022	3.1
das9205	101	52	52	1022	1.1
das9206	1427	632	468	4088	5.0
das9207	1,215,274	12,119	2608	105,266	35.9
das9208	1713	1312	1015	7154	19.8
das9209	258	151	110	2044	5.1
das9601	2747	2159	1641	143,080	41.1
edf9201	1928	1706	1528	12,264	2.1
edf9202	1317	1113	442	119,574	309.8
edf9203	11,087	7135	5941	303,534	108.0
edf9204	52,050	26,922	24,301	123,662	70.8
edf9205	1342	632	376	5110	24.8
edf9206	1879	1583	1030	28,616	199.5
edfpa14b	13,079	8877	6566	51,122	30.2
edfpa14o	51,290	8617	4411	57,232	64.8
edfpa14p	23,218	6164	2019	44,968	10.7
edfpa14q	6703	5742	3929	52,122	144.9
edfpa14r	5919	5616	5258	20,440	16.9
edfpa15b	5272	3745	3053	21,462	22.6
edfpa15o	9944	3955	3127	33,726	37.1
edfpa15p	22,693	2186	1073	8176	6.3
edfpa15q	5407	2947	2022	17,374	64.5
edfpa15r	1827	1206	666	8176	9.4
elf9601	982	843	840	45,990	40.1
fr10	677	504	184	6132	1
isp9601	873	732	366	5110	5.6
isp9602	731	617	606	4088	8.3
isp9603	2983	654	426	3066	4.7
isp9604	1090	749	519	6132	9.6
isp9605	575	546	123	8176	5.2
isp9606	357	270	108	2044	3.0
isp9607	474	405	124	2044	3.7
jbd-001	87,261	14,469	6055	118,552	7.4
Average ratios	Est./built 4.45	Built/sifted 1.85			

BDD: binary decision diagram.