

## **Развој на методите од Марковата анализа за примена во инженерство за надежност, безбедност и одржување**

Катерина Митковска-Трендова  
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип  
Воена академија „Генерал Михаило Апостолски“ – Скопје  
- придружна членка -

### **Апстракт**

Првите методи за надежноста беа повеќе искусвени, отколку научни. Формални методи за предвидување на надежноста беа развиени во 1940-тите. Во 1960-тите се воведени дрво на грешки и методот FMEA. Регулативите за безбедност по природа беа детерминистички, па веројатносни. Во 1975 во извештајот од студиите за проценка на ризикот кај нуклеарки беа развиени нови методи, како дрво на настани, за евалуација на случајни сценарија. Марковата анализа ретко се користеше за моделирање во безбедносното инженерство. Современите стандарди и регулативи ја оживееја употребата од безбедносна перспектива. Овие методи добиваат поголемо внимание и поради достапните софтверски алатки коишто ја прават комплексноста на пресметувањето полесна.

**Клучни зборови:** Маркова анализа; надежност; безбедност; одржување; веројатносни модели

## **Разработка методов анализа Маркова для использования в инженерной надежности, безопасности и технического обслуживания**

Катерина Митковска-Трендова  
Универзитет „Гоце Делчева“ - Штип  
Военная академия "Ген. Михайло Апостольского"-Скопье  
- ассоциированным членом -

### **Абстракција**

Первые методы надежности были больше опыта, чем научные. Формальные методы прогнозирования надежности были разработаны в 1940 году. В 1960-е интродуцент неисправностей и метод FMEA. Правила безопасности были первые детерминированный характер, то вероятностные. В 1975 году доклад исследования для оценки риска на атомных новые методы были разработаны в виде дерева событий, для оценки сценариев аварий. Маркова анализ редко используется для моделирования в технике безопасности. Современные стандарты и правила возобновлении использования с точки зрения безопасности. Эти методы получают больше внимания из-за доступных программных средств, которые делают сложность расчетов легче.

**Ключевые слова:** Маркова анализа; надежность, безопасность, техническое обслуживание; вероятностные модели

# Developing the methods of Markov analysis for application in reliability, security and maintenance engineering

Katerina Mitkovska-Trendova  
University "Goce Delcev" - Stip  
Military Academy "General Mihailo Apostolski" – Skopje  
- associate member -

## Abstract

The first methods for reliability were more experiential than scientific. Formal methods for predicting reliability were developed in the 1940s. The 1960s introduced tree of faults method and FMEA. Safety regulations were first deterministic in nature, then probabilistic. In 1975 the report of studies for the risk assessment in nuclear plants new methods were developed as tree of events, for evaluation of accident scenarios. Markov analysis was rarely used for modeling in safety engineering. Modern standards and regulations revive the use from security perspective. These methods get more attention because of the available software tools that make the complexity of the calculation easier.

**Key words:** Markov analysis; reliability; safety; maintenance; probabilistic models

## Вовед

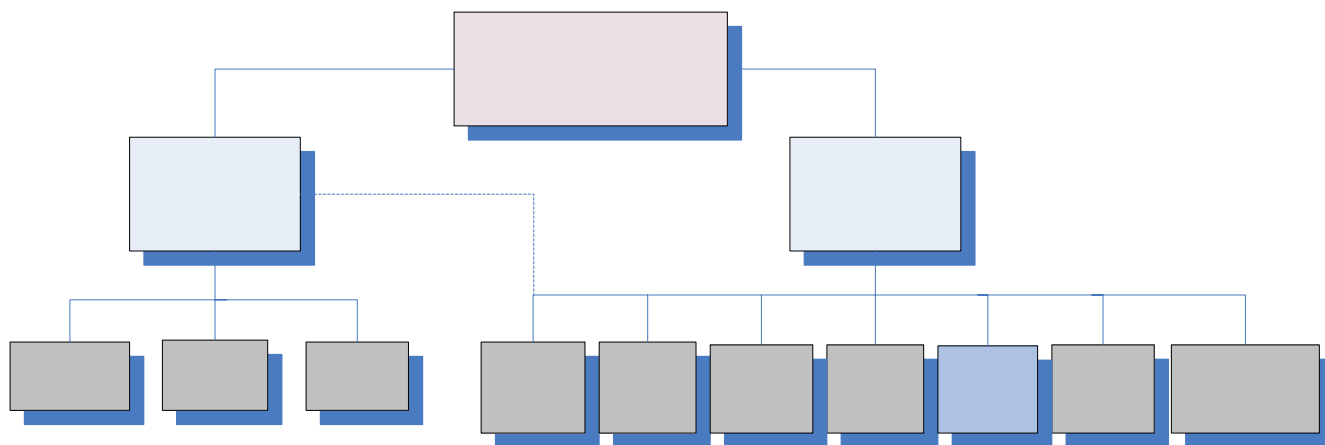
Бројните катастрофи и зголемената грижа за животната средина допринесоа за насочување на вниманието кон опасностите и ризиците содржани во голем број активности во современото општество. Тоа допринесе и за развивање на широк спектар на методи и техники за проценка на ризикот и сигурноста/надежноста, кои пак се поврзани со безбедноста. Тие методи и техники денес ги поткрепуваат интернационалните стандарди за безбедност и се релевантни во повеќе области каде ризикот и сигурноста се многу важни прашања. Безбедносното инженерство се обидува да ги проучи, окарактеризира, измери и анализира откажувањата, поправките и последиците од откажувањата во системите, со цел да се подобри нивната оперативна употреба, со зголемување на нивниот дизајниран живот, со елиминирање или редуцирање на веројатноста за откажувања и ризични последици и со редуцирање на времето кога не се во функција, по најниски можни трошоци. Денешните инженери за безбедност мора да имаат темелно познавање на овие техники и искуство за нивна примена во најразлични проблеми од реалниот живот. Тие треба да го разбираат инженерството за безбедност на квалитативен и на квантитативен начин и да развиваат вештини за примена на овие знаења, следејќи ги најновите развиени аналитички техники. Квалитетот на анализата на безбедноста многу зависи од способноста на аналитичарот да ги идентификува сите потребни карактеристики на анализираниот систем. Тоа не е лесна задача, бидејќи системите може да бидат многу комплексни. Постојат многу методи и техники за извршување таква анализа.

Современите стандарди за безбедност се базираат на изведбата и бараат квантификација на постигнатото намалување на ризикот. Стандардите не пропишуваат како треба да се изврши една квантитативна анализа, туку само предлагаат неколку техники кои може да се користат. Понекогаш може да се користат и квалитативни техники и методи. Квантитативна анализа на безбедноста може да се изврши на пример, за да се проверат концептите за распределување на барањата за безбедност, да се споредат алтернативите за дизајн, да се валидизира постигнатата безбедност итн.

## Квалитативни и квантитативни методи во анализата на сигурноста и безбедноста

Познати се околу стотина методи кои се употребуваат во безбедносната анализа и повеќе начини за нивна класификација. Нивниот список секојдневно се проширува. Најпознатата поделба е на квалитативни и квантитативни методи. Друга позната класификација на методи за проценка на ризик е според нивото (апстрактно/експертско, средно/соработничко, конкретно/корисник на состав) и пристапот (темпорален, функционален, компаративен) (P.L.Campbell, J.E.Stamp, 2004). Разгледувани од различни аспекти, методите може да бидат едноставни и сложени. Релативно лесните модели имаат ограничена моќ за моделирање (анализа на броење на делови). Овде стапката на откажувања кај еден систем се добива со сумирање на сите стапки на откажувања на индивидуалните компоненти и оваа анализа не бара големо познавање на системот. Но постојат и посложени (Маркова анализа, Петри мрежи). Како што се зголемува моќта за моделирање, расте и комплексноста на анализата. Сложените модели опфаќаат бројни фактори и сценарија. Тие треба да ја опишуваат динамиката на моделираниот систем во текот на времето, неодреденостите, меѓузависностите, влијанијата и др. Изборот на моделот и методот зависат од анализираниот проблем, целите и намената на анализата и проценката на аналитичарот. Постојат повеќе квалитативни техники во анализата на безбедноста и иако тие обезбедуваат бројки, тие се квалитативни во смисла дека резултатите може само да се користат за подредување, а не обезбедуваат точни веројатности за откажувањата. Од квалитативните попознати се експертска анализа, FMEA (failure mode and effects analysis), нејзините проширувања FMECA (failure mode, effects and criticality analysis) и FMEDA (failure mode, effects and diagnosis analysis) и HAZOP (hazard and operability study). Меѓу најкористените квантитативни методи спаѓаат анализа на броење на делови, блок дијаграми на сигурност, дрво на откажувања и дрво на настани (FT и ET), Маркови модели, Петри мрежи, поедноставени равенки, хибридни техники, PDS и др. Оваа класификација е претставена со дијаграмот на Слика 1.

Дрвото на откажувања може да се користи и како квалитативна алатка, користејќи Булова алгебра. Таа анализа многу се користи во пракса и е докажана техника која може да ги моделира дури и најкомплексните логички врски. Темелно е објаснета во литературата, а голема предност е и достапноста на голем број софтверски алатки кои ја олеснуваат квантитативната евалуација. Направени се успешни обиди за поврзување и споредување на некои квантитативни методи, на пример, дрво на настани и Маркова верига [2].



Слика 1: Преглед на квалитативни и квантитативни техники во анализа на безбедноста

## **Примена на методи и алатки од Марковата анализа во инженерството за надежност, одржување и безбедност**

Безбедносните системи може да се анализираат квантитативно, користејќи Маркови модели. Марковото моделирање оддамна е прифатено во пракса како фундаментална и моќна техника за анализа. Меѓутоа, елаборираните пресметки често одземаат многу време и затоа порано Марковото моделирање не беше од практична корист за комплексни системи. Многу години тоа беше на листата на ретко користени стохастички техники на моделирање, особено за целите на сигурноста и одржувањето. Со зголемување на моќта на компјутерите и развојот на соодветни софтверски алатки, современите дизајнери може да го користат Марковото моделирање за анализа на факторите на безбедност, сигурност, одржливост и исплатливост, кај голем број комплексни системи. Особено со објавувањето на ИЕС 61508, а потоа и ИЕС 61165 стандардите, значително се ревитализираше примената на Марковото моделирање и анализа.

Основоположник на овој математички формализам кој денес има се поголема примена во најразлични области, е рускиот математичар Андреј Андреевич Марков. Тој работел на повеќе полиња во математиката, но најголем придонес има во теорија на веројатноста и е особено запамтен по неговото проучување на Марковите вериги. Таа теорија денес е многу проширена и го носи неговото име.

Марковите вериги се низи од случајни променливи во коишто идната променлива се одредува со сегашната променлива, но е независна од начинот на кој сегашната произлегла од нејзините претходни. Тоа се во суштина низи од настани за кои се анализира тенденцијата еден настан да биде проследен од друг. Користејќи ја оваа анализа, може да се генерира нова низа од случајни, но, поврзани настани, кои се појавуваат како оригиналните. Случајните променливи кај Марковите модели најчесто се индексирани по времето, кое може да биде дискретно или непрекинато. Марковите вериги претпоставуваат дискретни состојби и дискретен временски параметар. Кај Марковиот процес состојбите се непрекинати [7]. Марковите модели го опишуваат системот користејќи множество од состојби кои се исклучуваат меѓусебно и транзиции меѓу овие состојби. Марковата верига со конечен број на состојби може да се претстави со матрица на транзициони веројатности (транзициона матрица) и визуелно, со транзиционен дијаграм. Марковата верига може да биде хомогена или нехомогена. Хомогената се карактеризира со константни транзициони стапки, а за нехомогената важи спротивното [7]. Марковите модели во анализата на безбедноста се претставени математички со едно множество од диференцијални равенки, за да се одреди веројатноста системот да биде во некоја од состојбите. Овие равенки може да се решат аналитички, но комплексните Маркови модели вообичаено се евалуираат нумерички. Марковата анализа има голема моќ за моделирање и ги покрива повеќето аспекти на однесувањето на системот, но анализата е комплексна и бара значителен напор. Некои автори тврдат дека Марковите модели не се точни и дека треба да се забранат. Меѓутоа, докажано е дека Марковите модели ги даваат точно истите резултати како класичните веројатносни техники, ако се конструираат и интерпретираат соодветно. Треба да се забележи дека во принцип, Марковите модели може да се применат само во еден тест интервал, бидејќи треба да биде исполнето Марковото својство (т.е. процесот мора да биде заборавачки: минатото е ирелевантно за иднината, познавајќи ја сегашноста). Ова може да се компензира со помош на користење матрица на поправки, што зависи од стратегијата на поправање и од квалитетот на акциите за поправање. Меѓутоа, ефектите од продолжено тестирање (т.е. тестирање паралелни средства во различни времиња) не може да се вклучи на овој начин. Друго ограничување на Марковата анализа и на повеќето други техники на анализа на безбедноста, е тоа што ефектите од несигурноста на податоците не може да се земат предвид. Подоцна, засилената Маркова анализа, којашто е комбинација од Маркова анализа, анализа на несигурност (преку Монте Карло техниката) и анализа на осетливоста, обезбедува решение за

овој проблем. Денес Марковите модели често се користат за анализа на безбедноста, каде настаните како што се откажување или поправка на една компонента може да се појават во било која временска точка. Марковиот модел ја евалуира веројатноста за транзиција од една состојба во друга (на пример, состојба на откажување на една компонента, до состојба на откажување на друга компонента), се додека системот не ја достигне конечната состојба (на пример, состојба на тотално откажување).

Заради потребите за моделирање на се покомлексни реални системи, моделите на Марков постојано се прошируваат до нови методи и техники на решавање. Во теоријата на безбедноста исто така се користат и моделите на семи-Маркови процеси, особено при анализирање на комплексни динамички системи. Кај нив транзиционите стапки во една одредена состојба зависат од времето веќе поминато во таа состојба, но не зависат од патот по кој била достигната сегашната состојба.

Во анализата на безбедноста, Марковата анализа се користи за да се проучи зависноста на комплексни системи, т.е. системи чии компоненти пројавуваат силни зависимости, за разлика од другите методи, кои често претпоставуваат и комплетна независност на компонентите.

Предности на Марковите модели над другите техники на моделирање на безбедноста се поедноставен пристап на моделирање, редувантни техники на управување, покриеност и непокриеност на откажувањата, техники на поедноставување за комплексни системи, секвенцијални настани, моделирање и на откажувањата и на поправките и др. Главен недостаток е проклетството на димензионалноста, т.е. експлозија на бројот на состојби со зголемување на димензиите на системот. Марковите вериги се проширени во Маркови процеси на одлучување, со додавање на подмножество од акции при секоја транзиција, од едно множество на акции, и соодветна награда при секоја транзиција предизвикана од соодветната акција. Оваа теорија е исто така доста развиена, со тоа што се поактуелни се моделите на паралелно извршување на акции, т.е. можноста за паралелно донесување одлуки при секоја транзиција, што отвара можности за моделирање на нови, покомлексни реални проблеми од областа на безбедноста.

Постојат повеќе софтверски алатки кои се поддржани од Марковите модели, а во анализа на безбедноста попознати се SHARPE, MKV Version 3.0 и др.

Покрај опишаните техники за квантитативна анализа, постојат техники коишто ги комбинираат блок дијаграмите на сигурност со резултати од други техники на анализа на компонентно ниво. Такви комбинации понекогаш се нарекуваат хибридни техники. Оваа категорија ги опфаќа т.н. поедноставени равенки, коишто може да се изведат од Марковите модели, претпоставувајќи апроксимација на редок настан на неуспех. Меѓутоа, значително ограничување на поедноставените равенки е тоа што фреквенцијата на тестирање мора да биде иста за сите компоненти употребени во една редувантна конфигурација. Уште повеќе, одредени аспекти на комплексните безбедносни системи кои може да се инкорпорираат во Марковите модели, не се покриени со поедноставените равенки. Оттука, поедноставените равенки имаат помала моќ за моделирање од Марковите модели. Познати се и достапни анализи и споредби на методите на анализа на безбедноста [1], [4].

### **Квантитативните методи и Марковите модели во анализата на ризик од пожар**

Квантитативната анализа за ризик од пожар помага при обезбедување проценка на безбедноста од пожари на научна основа и земање предвид на релевантните несигурности на рационален, квантитативен начин. Историски, тие модели почнале засилено да се користат за предвидување на нуклеарни катастрофи, т.е. проценка на ризикот од истите. Понатаму, тие модели се развиваат за инциденти во вселенските летала, во авиотранспортот, кај нафтоводите и гасоводите, при изградба на објекти со висок ризик од појава на пожари и др. Модели на анализа за ризик од пожар може да се сретнат најчесто кај структурираните пожари, кои во

голем број се потпираат на нормативните правила за традиционално градење и се релативно лесни за имплементација, но нефлексибилни и водат кон неисплатливи дизајни. Во поново време, се развиваат норми базирани на изведба, за инженерски дизајни. Со веројатносен пристап се обезбедува рационална рамка за наоѓање на ефектите од несигурностите кај инженерските дизајни и се вклучуваат при водење на новите дизајни. И тука расте примената на квантитативните проценки на ризик од пожар и истражувањата се посветени на развој на веројатносни модели, меѓу кои и Марковите модели, експериментални истражувања и статистички карактеризации на параметрите на несигурностите (коефициенти поврзани со стапка на горење, вовлекување на воздух, пренос на топлина низ сидови итн.), кои потоа помагаат при одредување на веројатностите на гранење кај дрвата на настани или на транзиционите веројатности и веројатностите на состојбите за предвидување на растењето на пожарот кај Марковите вериги. Веројатностите на гранење коишто ја опишуваат моменталната состојба на пожарот може да се добијат со помош на Монте Карло симулации, каде што се користи статистика, модели за пресметување и хевристичко расудување за да се одреди насоката на настани кај сите симулирани дизајнирани пожари (бројни сценарија за одвивање на пожарот), а потоа и кај реалните ситуации. Веќе е покажано како да се формулира проблемот користејќи стохастички процеси, коишто формираат Маркова верига. Моделите од квантитативната анализа на ризиците од пожар, како и кај другите модели за анализа на безбедноста може да се комбинираат, поврзуваат или споредуваат. На пример, во [2], дрвата на настани ја формираат основната структура на анализата и покажано е како да се поврзат со описот на еволуцијата на пожарот. Овој опис може да се изрази како стохастички Марков процес и покажано е како да се поврзат веројатностите на гранење на дрвата на настани со матриците за трансфер на Марковата верига. Од друга страна, некои Маркови модели може да се поврзат со Петри мрежи, кои се графичка алатка со кои може да се моделира и архитектурата и динамиката на системот. Тоа ги зголемува можностите за развивање софтверски алатки кои пак се користат за развивање и симулација на различни сценарија на пожари, кои многу придонесуваат за анализата на ризиците од пожар.

### **Заклучок**

Овој труд има за цел да ја истакне и актуелизира примената и развојот на квантитативните методи за анализа на безбедноста, а особено на методите од Марковата анализа. Даден е преглед на најпознатите квалитативни и квантитативни методи во анализата на безбедноста, со акцент на анализата на ризик од пожари, со предлози за проширување на овој список. Од досегашните искуства може да се заклучи дека различни техники за анализа на безбедноста може да дадат различни резултати, па затоа не постои единствен начин за да се процени сигурноста и безбедноста. Уште повеќе, резултатите од различни анализи не се секогаш споредливи. Извесни автори [4], предлагаат начини за надминување на тие проблеми.

Се повеќе се зголемува бројот на апликации на квантитативните методи за анализа на сигурноста и безбедноста, па може да се сретнат извори кои ги препорачуваат најуспешните и највообичаените, со дискусија за факторите кои треба да се земат предвид кога се одлучува кој метод, техника или алатка да се искористи во одредена ситуација.

### **Литература**

1. Tilman Rasche, "Risk Analysis Methods – a Brief Review", The University of Queensland, MISHC, 2001

2. Timo Korhonen, Jukka Hietaniemi, Djebbar Baroudi, Matti Kokkala, "Time-Dependent Event-Tree Method for Fire Risk Analysis: Tentative Results", *Fire Safety Science – Proceedings of 7<sup>th</sup> International Symposium*, 2003, pp.321-332
3. J.L.Rouvroye, E.G.van der Blik, "Comparing Safety Analysis Techniques", *RESS*, Vol.75, No.3, 2002, pp.289-294
4. J.L.Rouvroye, A.C.Brombacher, "New Quantitative Safety Standards: Different Techniques, Different Results?", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.66, Issue 2, 1999, pp.121-125
5. B.Knegtering, A.C.Brombacher, "Application of Micro Markov Models for Quantitative Safety Assessment to Determine Safety Integrity Levels as Defined by the IEC 61508 Standard for Functional Safety", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.66, Issue 2, 1999, pp. 171-175
6. Yildiz Altinok, Demir Kolcak, "An Application of the Semi-Markov Model for Earthquake Occurrences in North Anatolia, Turkey", *Journal of the Balkan Geophysical Society*, Vol.2, No.4, 1999, pp. 90-93
7. Norman B. Fuqua, "The Applicability of Markov Analysis Methods to Reliability, Maintainability and Safety", *START*, Vol.10, No.2, 2003
8. G. Puz, J. Radic, I. Stipanovic Oslakovic, "Novi model za stohasticku analizu trajnosti mostova", *Gradzevinar* 62, 2010, str.287-297
9. Martin Schobeck, "Introduction to Reliability of Safety Systems", 2007
10. S.K.Au, Z.-H.Wang, S.-M.Lo, "Compartment Fire Risk Analysis by Advanced Monte Carlo Simulation", *Engineering Structures* 29, 2007, pp. 2381-2390
11. "Fire Safety Engineering – Guidance on Fire Risk Assessment", International Organization for Standardization, 2010