



МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА РАЗВИТИЕТО НА АВАРИИ НА СТРОИТЕЛНИ МАШИНИ ЧРЕЗ ВЕРИГИ НА МАРКОВ

Росен Митрев
rosenm@tu-sofia.bg

*Технически университет – София,
София, бул. „Климент Охридски“ № 8
БЪЛГАРИЯ*

Ключови думи: *вериги на Марков, авария, строителни машини*

Резюме: *В работата е разработена методика за моделиране на аварии на строителни машини чрез вериги на Марков с дискретно време. Създаденият модел на авария позволява количествена оценка на вероятностите за попадане на моделираната машина в едно или друго състояние, което е част от процеса на възникване на авария. Моделът отразява причините за развитието на аварията, последствията от аварията и възможността за възстановяване на работоспособността на системата. Получената от модела количествена информация може да се използва за прогнозиране на аварии, взимане на решения, свързани с превенцията и намаляването на аварията и др.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Увеличаването на темпа и количеството на строителните работи в световен мащаб през последните две десетилетия е съпроводено с увеличаване на номенклатурата и количеството на използвани строителни машини, поради което е съвсем естествено да се очаква повишаване на количеството на аварията. Поради спецификата на дейността на строителните машини при изпълнение на транспортни или технологични операции, аварията при тях са съпроводени с големи материални щети, а често и злополуки или смърт на хора.

Аварията на разнообразно специализирано оборудване ([1] и [2] – товароподемни кранове, [2] - минни автосамосвали, [4] – селскостопански трактори, [5] и [6] – на хидравлични багери) и провеждането на мероприятия за тяхното намаляване са обект на множество изследвания, при които се използват различни инструменти за анализ - ФТА и FMESA анализи [7], клъстерен анализ [8] и др. Вероятностните подходи (бейсов анализ и бейсови мрежи) за анализ на причините за аварии въз основа на налични регистри на аварии [9] се оказали много ефективни при открояване на причините за аварията и предприемане на мерки за тяхното намаляване. Към вероятностните подходи се отнася и теорията на марковските вериги с дискретно време [10÷14], която отчита стохастичния характер на протичащите процеси. Приложение на марковски вериги с дискретно време към анализ на аварии е демонстрирано в [15], където е разработен и изследван модел на злополуки и смъртни случаи при аварии с

транспортни средства, а в [16] въз основа на статистически данни чрез марковски модел са анализирани нарушенията на правилника за движение по пътищата и възникналите от това последствия. Авторът на [17] използва теорията на марковските вериги с дискретно време за моделиране на аварията в петролната индустрия. В [14] освен, че се демонстрират практически приложения, се демонстрира и методика автоматизирано определяне на характеристиките на марковските вериги посредством система за компютърна математика.

Намаляването на броя на аварията и тежестта на техните последствия се постига основно чрез въвеждане на [1]: 1) технически и организационни мероприятия за повишаване на нивото на техниката на безопасност и трудовата дисциплина; 2) техническа инспекция на машините и съоръженията по сертифицирани процедури, отговарящи на нормативните документи; 3) постоянно продължаващо обучение с цел повишаване на квалификацията на персонала.

Разработваните теоретични модели и техният подробен анализ, съвместно с направените от практическата експлоатация на машините изводи, подпомагат обосновката на провежданите технически и организационни мероприятия за намаляване на броя на аварията и злополуките. Отчитайки значимостта на проблема за анализ на аварията, целта на настоящата работа е да се разработи вероятностен модел на развитието на авария на строителни машини, основан на марковски вериги с дискретно време, при отчитане на възможните състояния на машината и техните вероятности.

2. МОДЕЛ НА АВАРИЯ НА СТРОИТЕЛНИ МАШИНИ

В настоящия модел се предполага, че процесът на развитие на аварията на строителни машини във времето се състои от няколко етапа, през които строителните машини преминават от работоспособно състояние до състояние на авария. В модела се предлага развитието на авария да се описва чрез граф на състоянията, показан на фиг.1, където състоянията на машината се изобразяват чрез кръгчета, а чрез стрелки - възможните преходи между различните състояния. Графът съдържа както състояния, характеризиращи развитието на аварията, така и състояния, характеризиращи последствията от аварията, а също така и възможността за отстраняване на последствията и връщане на машината в работоспособно състояние.

В представения граф са налице седем дискретни състояния на системата. От тях причините за аварията са представени чрез състоянията - 5 и 6, а изходите от аварията - чрез състоянията 7 и 8. При повече възможни причини и изходи от аварията, броят на тези състояния може да бъде увеличен (или намален). Чрез пунктирна линия са представени допълнителни възможни състояния за причините и изходите от аварията, които в момента не са част от разглеждания модел. Представените състояния на системата са следните:

◆ Състояние 1 – “Безаварийна работа”. Това състояние репрезентира безаварийната работа на машината, която е напълно работоспособна и няма предпоставки за авария;

◆ Състояние 2 – „Работа при наличие на предпоставка за възникване на авария“. При това състояние в системата няма авария, но е налице предпоставка за възникване на авария. Видът на предпоставката зависи от типа на изследваната система. Например, предпоставка за авария възниква при моментно разсейване или невнимание на оператора, неспазване на техниката за безопасност, попадане на предмет в обсега на работните органи или в зоната на движение на машината, работа при неблагоприятни атмосферни условия. Наличието на такива предпоставки създава условия за възникването на авария;

◆ Състояние 3 – „Работа при наличие на пред аварийна ситуация”. При това състояние системата е в пред аварийна ситуация. Такава ситуация е налице, когато аварията още не е възникнала, машината е работоспособна, но налице са всички предпоставки тя да възникне – например: функционален отказ на елемент, появяване на екстремални експлоатационни условия (например опасна близост с друга машина), но със запазване на работоспособността на машината и без възникване на авария.

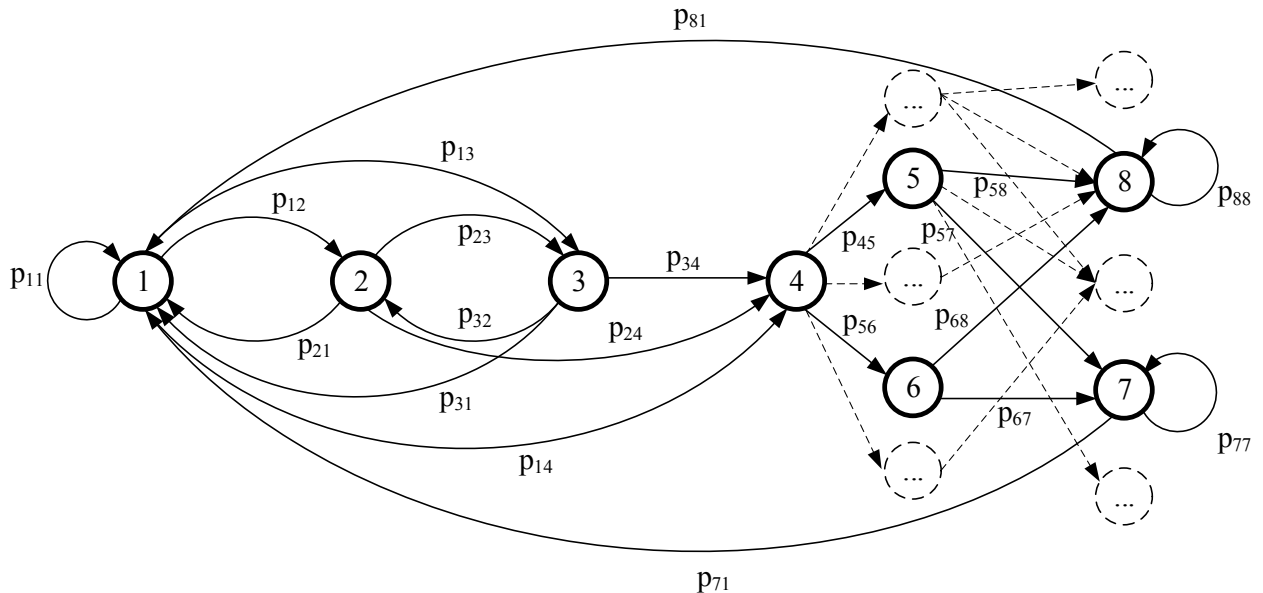
◆ Състояние 4 – “Възникване на авария”. При това състояние в системата са налице авария и съответно - неработоспособно състояние на машината.

◆ Състояния 5 и 6 – “Авария вид 1” и „Авария вид 2“. Тези състояния показват възникване на авария поради определена причина - в случая се отчитат две причини. Ако се отчитат повече причини, то следва да се добавят още състояния.

◆ Състояние 7 – „Авария със злополука“. При това състояние в системата има авария със злополука;

◆ Състояние 8 – „Авария без злополука“. При това състояние в системата има авария без злополука;

Размерността на представената марковска верига може да бъде както намалена чрез премахване на състоянията, които не ни интересуват, така и увеличена чрез добавяне на допълнителни състояния.



Фиг.1 Граф на състоянията на система при възникване на авария

Възможните преходи между изброените състояния са означени със стрелки, върху които са означени вероятностите p_{ij} за съответните преходи. Смисълът на отделните вероятности е следният:

◆ p_{11} – вероятност системата да остане в състояние 1 (безаварийна работа, нормална работа);

◆ p_{12} – вероятност за преход от състояние „Безаварийна работа“ към състояние „Работа при наличие на предпоставка за възникване на авария“;

◆ p_{13} - вероятност за преход от състояние „Безаварийна работа“ към състояние „Работа при наличие на пред аварийна ситуация”. Тази вероятност характеризира възможността за преход от безаварийна работа към пред аварийна ситуация, като при това не е имало предпоставка за възникване на авария или тя не може да бъде отчетена;

◆ p_{14} - вероятност за преход от състояние „Безаварийна работа“ към състояние „Възникване на авария“. Този преход е внезапен и състояния 1 и 2 не са били наблюдавани;

◆ p_{23} - вероятност за преход от състояние „Работа при наличие на предпоставка за възникване на авария“ към състояние „Работа при наличие на предаварийна ситуация“. Тази вероятност характеризира възможността наличието на предпоставка за авария да доведе до предаварийна ситуация;

◆ p_{32} - вероятност за преход от състояние „Работа при наличие на пред аварийна ситуация“ към състояние „Работа при наличие на предпоставка за възникване на авария“. Тази вероятност характеризира възможността пред аварийната ситуация да бъде избегната чрез подходящи действия на оператора или системата за управление, но предпоставката за авария все още да бъде налице;

◆ p_{21} - вероятност за преход от състояние „Работа при наличие на предпоставка за възникване на авария“ към състояние „Безаварийна работа“. Тази вероятност показва възможността чрез своевременно отстраняване на предпоставките за авария системата да се върне към състояние на безаварийна работа;

◆ p_{24} - вероятност за преход от състояние „Работа при наличие на предпоставка за възникване на авария“ към състояние „Възникване на авария“. Тази вероятност показва възможността наличието на предпоставки за авария да доведат директно до възникване на авария, като не се наблюдава пред аварийна ситуация или тя не може да се отчете;

◆ p_{34} - вероятност за преход от състояние „Работа при наличие на пред аварийна ситуация“ към състояние „Възникване на авария“. Показва възможността пред аварийната ситуация да доведе до авария;

◆ p_{31} - вероятност за преход от състояние „Работа при наличие на пред аварийна ситуация“ към състояние „Безаварийна работа“. Показва възможността въпреки наличието на пред аварийна ситуация, аварията да бъде предотвратена, например чрез своевременно и адекватни действия на оператора на крана;

◆ p_{45} , p_{46} - вероятност за преход от състояние „Възникване на авария“ съответно към състояния „Авария вид 1“ и „Авария вид 2“. Представяват вероятностите за възникване на авария поради определена причина;

◆ p_{58} – вероятност за преход от състояние „Авария вид 1“ към състояние „Авария без злополука“. Представява вероятността, ако е възникнала авария поради причина 1, нейният изход да бъде без злополука. Аналогично, p_{57} – вероятност за преход от състояние „Авария вид 1“ към състояние „Авария със злополука“. Представява вероятността, ако е възникнала авария поради причина 1, нейният изход да бъде със злополука. По подобен начин се дефинират и вероятностите p_{68} и p_{67} ;

◆ p_{88} – вероятност системата да остане в състояние 8. Тази вероятност зависи от това, дали работоспособността на системата подлежи на възстановяване след аварията или не. Тази вероятност се определя от настъпилите щети вследствие на аварията, от юридически съображения, от политиката на фирмата и т.н. Аналогично се определя вероятността p_{77} . В случай, че на системата се гледа като на невъзстановяем обект, то тези вероятности следва да бъдат 1;

◆ p_{81} , p_{71} – вероятност работоспособността на системата да бъде възстановена след авария.

Всички приведени вероятности имат статистически характер. Стойностите на част от тях могат да бъдат определени непосредствено от регистрите на аварията на строителните машини, а друга част се определят по експертен път.

В процеса на развитие на аварията, системата променя състоянията си по случаен начин съгласно преходната матрица \mathbf{P} [12,18,19], съответстваща на графа на

състоянията на фиг.1 и началния вектор на състоянията. Ако в началния момент системата се намира в работоспособно състояние, т.е. в състояние 1 “Безаварийна работа”, то векторът има вида:

$$(1) \quad \mathbf{S}^{(0)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Разпределението на вероятностите за попадане в определено състояние след k стъпки се определя по следната зависимост [12,18,19]:

$$(2) \quad \mathbf{S}^{(k)} = \mathbf{S}^{(0)} \mathbf{P}^k$$

където $\mathbf{S}^{(k)}$ е вектора на състоянията след k стъпки. Ако чрез \mathbf{P} се означи преходната матрица на разглеждания граф на състоянията, то могат да се приемат следните примерни стойности на нейните елементи (вероятностите): $p_{11}=0.95, p_{12}=0.01, p_{13}=0.01, p_{14}=0.03, p_{21}=0.8, p_{23}=0.1, p_{24}=0.1, p_{31}=0.2, p_{32}=0.1, p_{34}=0.7, p_{45}=0.4, p_{46}=0.6, p_{57}=0.7, p_{58}=0.3, p_{67}=0.8, p_{68}=0.2, p_{71}=0.9, p_{77}=0.1, p_{81}=0.6, p_{88}=0.4$. При използване на тези стойности, в табл.1 са показани пресметнатите стойности на вектора на състоянията за 6 стъпки при начало на процеса в състояние 1.

Таблица 1 Стойности на вектора на състоянията $\mathbf{S}^{(k)}$

k	p₁	p₂	p₃	p₄	p₅	p₆	p₇	p₈
1	0.95	0.01	0.01	0.03	0	0	0	0
2	0.9125	0.0105	0.0105	0.0365	0.012	0.018	0	0
3	0.8774	0.0102	0.0102	0.0358	0.0146	0.0219	0.0228	0.0072
4	0.8685	0.0098	0.0098	0.03446	0.0143	0.02146	0.0300	0.0116
5	0.8689	0.0097	0.0097	0.00339	0.0138	0.02067	0.0301	0.0132
6	0.8702	0.0096	0.0096	0.00338	0.0135	0.02033	0.0292	0.0136

Както се вижда от табл.1, с нарастване на номера на стъпката, всички вероятности клонят към определена стойност. Установените стойности на вероятностите се наблюдават при дългосрочното поведение на марковската верига, т.е. когато броят на стъпките расте неограничено. В този случай, векторът на състоянието клони към граничната си стойност \mathbf{S}_∞ и се определя от следната линейна система уравнения [12,18,19]:

$$(3) \quad \mathbf{S}_\infty = \mathbf{S}_\infty \mathbf{P}$$

където

$$(4) \quad \mathbf{S}_\infty = [p_1^\infty \ p_2^\infty \ \dots \ p_n^\infty]$$

а p_i^∞ са граничните стойности на вероятностите.

При достигане на граничните стойности на вероятностите, системата преминава в граничен стационарен режим, при който тя продължава да променя състоянието си, но вероятността за пребиваване в определено състояние остава постоянна. За конкретно решаваната задача може да се определи, че стойностите на граничните вероятности са:

$$(5) \quad \mathbf{S}_\infty = [0.8708 \ 0.0097 \ 0.0097 \ 0.0339 \ 0.0135 \ 0.0203 \ 0.0286 \ 0.0135]$$

Както се вижда от стойностите, най-голяма е вероятността за пребиваване на системата в състояние 1 – „Безаварийна работа“. Увеличаването на стойността на тази вероятност може да се постигне чрез намаляване на вероятностите на преходите, които извеждат системата от това състояние, чрез увеличаване на вероятностите на преходите, които връщат системата в това състояние или чрез съвместното им прилагане.

В случай, че след аварията машината не се възстановява (т.е. на фиг.1 $p_{71}=p_{81}=0$), марковската верига е поглъщаща [11,12,19] тъй като налице са две състояния (7 и 8), при попадането в които системата остава завинаги в тях. В този случай елементите на преходната матрица са същите както при приведените по-горе стойности, освен следните: $p_{71}=0$, $p_{77}=1$, $p_{81}=0$, $p_{88}=1$, а граничните вероятности в този случай са:

$$(6) \quad S_{\infty} = [0.0133 \quad 0.0001 \quad 0.0001 \quad 0.0005 \quad 0.0002 \quad 0.0003 \quad 0.7489 \quad 0.2364]$$

Както се вижда, в този случай най-голяма е вероятността системата да попадне в състояние 7 – “Авария със злополука”.

3. ИЗВОДИ

Разработената методика за моделиране на аварии на строителни машини чрез марковски вериги позволява количествена оценка на вероятностите за попадане на моделираната система в едно или друго състояние, което е част от процеса на възникване на авария. Стойностите на тези вероятности могат да бъдат изследвани като функция на стойностите на останалите преходни вероятности и стойностите на вектора на състоянието. Разработеният модел дава допълнителна количествена информация, която може да се използва за прогнозиране на аварии, взимане на решения, свързани с превенцията и намаляването на аварията и т.н. Разделянето на процеса на възникване на авария на стъпки дава възможност да се оцени вероятността за попадане в едно или друго състояние, водещо към авария и начините за излизане от него и при практическото обучение на операторите на машини да се акцентира върху тези начини с цел правилна реакция при попадане в това състояние.

Един определен недостатък на предложения модел е, че достоверните стойности на някои от преходните вероятности не са известни и не могат да бъдат определени непосредствено от статистически данни, а само чрез допълнителни натурни експерименти или на експертен принцип.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Радлов К., Митрев Р, Ринкова Е. Методика за статистически анализ на причините за аварии с товароподемни кранове. Българско списание за инженерно проектиране, бр.12, стр. 51-57, 2012.
- [2] Shepherd, G., Kahler, J. Cross J. Crane fatalities - a taxonomic analysis. Safety Science, vol. 36(2), pp. 83-93, 2000.
- [3] Randolph, R., Boldt, C. Safety analysis of surface haulage accidents. Annual institute on mining, health, safety, and research, Blacksburg, VA (United States), 26-28 Aug 1996;
- [4] Bunn, T., Slavova, S. et al. Narrative text analysis of Kentucky tractor fatality reports." Accident Analysis & Prevention, vol. 40(2), pp. 419-425, 2008.
- [5] Edwards D.J., Holt D.G. Case study analysis of risk from using excavators as “cranes.” Automat Constr, vol.19, pp.127–133, 2010
- [6] Edwards D.J., Holt D.G. Case study analysis of construction excavator H&S overturn incidents. Eng Con-struct Arch Manage, vol. 17, pp. 493–511, 2010.
- [7] Borgovini R., Pemberton S., Rossi M. Failure mode, effects, and critically analysis (FMECA). Technical report, reliability analysis center, Rome, NY, 1993.
- [8] Tan P.-N., Steinbach M., Kumar V. Introduction to data mining, Pearson, 2005.
- [9] Mitrev R. Probabilistic analysis of industrial equipment accident registers through Bayes' rule and Bayesian networks. The eight international conference Transport and Logistics til2021, Nis, Serbia, December 4
- [10] Вентцель Е. Исследование операций. Советское радио, Москва, 1972.

- [11] Сугарев З., Каменаров С. Теория на вероятностите. Наука и изкуство, София, 1974.
- [12] Taha H. Operations research. An Introduction. Tenth Edition. Pearson Education Limited 2017.
- [13] Render B., Stair R., Hanna M. Quantitative Analysis for Management. 11th Edition. Prentice Hall, 2011.
- [14] Bajram N., Ler D. Application of Discrete-Time Markov Models. Southeast Europe Journal of Soft Computing, vol. 2(1), pp.37-41, March 2013.DOI: 10.21533/scjournal.v2i1.43
- [15] Oseni B., Anjorin I. Modelling of Road Traffic Accidents: A Multi-state Markov Approach. Sri Lankan Journal of Applied Statistics, vol. 17(2), 2016.
DOI: [0.4038/sljastats.v17i2.7874](https://doi.org/10.4038/sljastats.v17i2.7874)
- [16] Folarin R., Onifade M. A Markov chain analysis of effect of traffic law enforcement on road traffic accidents rate in Ogun state, Nigeria. Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH), vol. 38, No. 4, October 2019, pp. 863– 870.<http://dx.doi.org/10.4314/njt.v38i4>.
- [17] Igboanugo, A.C. Markov Chain Analysis of Accident Data: The Case of an Oil and Gas Firm in the Niger Delta Area of Nigeria. International Journal of Engineering Research in Africa. Trans Tech Publications, Ltd., February 2010.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/jera.1.29>.
- [18] Ibe O. Markov Processes for Stochastic Modelling. Second Edition. Elsevier, 2013.
- [19] Jensen P. Operations Research. Models and Methods. 1st Edition, Wiley, 2002. ISBN: 978-0471380047.

MATHEMATICAL MODELLING OF CONSTRUCTION EQUIPMENT ACCIDENTS BY USE OF MARKOV CHAINS

Rosen Mitrev

rosenm@tu-sofia.bg

Technical University of Sofia
bul. Kliment Ohridski № 8, Sofia 1000
BULGARIA

Keywords: *Markov chain, accident, construction equipment*

Abstract: *The present paper deals with modeling of construction equipment accidents by use of Markov chains. The developed model of accident development allows a quantitative assessment of the probability of entry of the modeled machine in a state that is a part of the accident occurrence. The model includes the cause of the accident, the accident outcome and the possibility of recovering of the machine functioning. The received from the model quantitative information can be used for accident forecasting, decision-making related to the accident prevention and decreasing etc.*