

Имитационное моделирование ухудшения эксплуатационного состояния нежестких дорожных конструкций на основе вероятностного подхода

А.Н. Тиратурян, Е.С. Белоусов, В.Ю. Шаталов

*Донской Государственный Технический Университет
Академия Строительства и Архитектуры*

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы применения аппарата цепей Маркова в задачах прогнозирования эксплуатационного состояния нежестких дорожных одежд эксплуатируемых автомобильных дорог на сетевом уровне. Приведен пример прогнозирования ухудшения структурных показателей нежесткой дорожной одежды для существующего участка автомобильной дороги.

Ключевые слова: автомобильные дороги, дорожная одежда, прогнозирование, цепь Маркова

Продление межремонтного срока службы дорожных одежд до 12 лет требует внедрения в практику проектирования и эксплуатации автомобильных дорог новых механизмов прогнозирования изменения их состояния в процессе эксплуатации.

Состояние автомобильных дорог в процессе эксплуатации непрерывно ухудшается под влиянием транспортной нагрузки и погодно-климатических факторов. В применяемом в практике РФ методе проектирования нежестких дорожных одежд воздействия на дорожную конструкцию представлены в виде детерминированных значений, в то время как в режиме эксплуатации дорожной одежды все воздействующие на нее нагрузки, как транспортные, так и природно-климатические имеют вероятностную природу.

Исследованию процессов деградации состояния нежестких дорожных одежд посвящены работы отечественных и зарубежных ученых таких как: А.П. Васильев, В.К. Апестин, С.К Илиополов, М. Snaith, К. Panthi и др. [1-5, 11-13]. В этих работах процессы деградации состояния дорожной конструкции рассматриваются на проектном и сетевом уровнях. Под проектным уровнем понимается расчетное прогнозирование изменения состояния дорожной конструкции (прогнозирование колееобразования, усталостной долговечности, температурной трещиностойкости и т.д.) на

стадии разработки проекта дорожной одежды. Под сетевым уровнем подразумевается прогнозирование фактического состояния дорожных одежд на протяженных участках и сетях автомобильных дорог с целью оптимизации структуры управления их жизненным циклом на протяжении всего срока эксплуатации.

Анализируя состояние дорожной одежды можно выделить две основные группы показателей, его характеризующих: эксплуатационные, к которым относятся продольная и поперечная ровность, шероховатость покрытия и структурные, включающие в себя прочность, оцениваемую величиной общего модуля упругости на поверхности дорожной одежды и дефектностью покрытия, характеризуемой средним баллом по визуальной оценке.

В последние годы на ряде федеральных дорог внедряется новая методология управления состоянием дорожных одежд на базе оценки их остаточного ресурса, главным идеологом внедрения которого выступает Государственная компания «Российские автомобильные дороги» [6]. В рамках данного подхода осуществляется разделение эксплуатируемых участков автомобильных дорог на участки с нормативным уровнем сохранности дорожных одежд, удовлетворительным и неудовлетворительными уровнями сохранности.

Под нормативным уровнем сохранности понимается состояние участка автомобильной дороги, при котором структурные показатели соответствуют допустимым значениям, и участок с данной дорожной конструкцией не требует проведения работ по капитальному ремонту; удовлетворительный уровень сохранности – характеризуется наличием объективных причин снижения структурных показателей состояния дорожной одежды ниже нормативных значений, что требует проведения детального обследования для разработки стратегии сохранности; неудовлетворительный уровень

сохранности характеризуется состоянием дорожной одежды, при котором структурные показатели находятся ниже допустимых значений, а состояние дорожной конструкции требует проведения капитального ремонта) (таблица №1).

Таблица № 1

Уровни сохранности дорожных одежд

Бальная оценка визуального состояния дорожного покрытия	Коэффициент прочности дорожной одежды			
	Равен или свыше 1,25	1,12 – 1,25	1,0 – 1,12	Менее 1,0
4,5 – 5,0	Норматив.	Норматив.	Норматив.	<i>Удовлетворит.</i>
4,0 – 4,5	Норматив.	<i>Удовлетворит.</i>	<i>Удовлетворит.</i>	<i>Удовлетворит.</i>
3,5 – 4,0	<i>Удовлетворит.</i>	<i>Удовлетворит.</i>	<i>Удовлетворит.</i>	неудовлетв.
Менее 3,5	неудовлетв.	неудовлетв.	неудовлетв.	неудовлетв.

Как видно из представленной таблицы вывод об уровне сохранности участка автомобильной дороги делается в соответствии со средним баллом по визуальной оценке состояния покрытия (в соответствии с методикой ОДН 218.0.006-2002) и по фактическому коэффициенту прочности нежесткой дорожной одежды. Фактическая прочность дорожной одежды оценивается с использованием высокопроизводительного оборудования ударного нагружения [7-9].

Одним из методов прогнозирования состояния различных систем является математический аппарат цепей Маркова [10]. Цепь Маркова представляет собой последовательность случайных событий с конечным или счетным числом исходов, в которой вероятность наступления какого-либо будущего события определена только настоящим состоянием и не зависит от

прошлого. Так цепь Маркова может быть представлена в виде графика или матрицы (рисунок 1) перехода системы между n состояниями

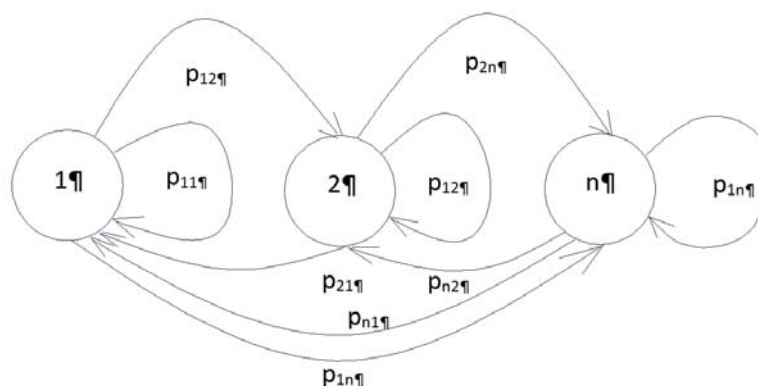


Рис. 1 – Пример марковского процесса перехода системы между n состояниями

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{pmatrix}; \quad (1)$$

где p – вероятность перехода системы из одного состояния в другое

Представление переходных процессов в виде цепи Маркова позволяет ответить на вопрос, каким будет состояние системы через несколько временных интервалов, например, какова вероятность системы, находящейся в состоянии 1 перейти в состояние 2 через некоторое количество временных шагов (t). Вычисление вероятности такого перехода осуществляется в соответствии с зависимостью (2):

$$R_t = r_o P^t \quad (2)$$

где r_o - вектор состояния системы в начальный момент времени.

В аналогичной формулировке может быть представлена задача прогнозирования состояния дорожной одежды на протяженном участке автомобильной дороги М-4 «ДОН», реконструированном в 2009 году. Приемка построенного участка осуществляется только в случае, если 100 % его протяженности соответствуют нормативному уровню сохранности.

Проведение работ по диагностике данного участка на 2-й год его эксплуатации (2011) позволило установить, что 95 % протяженности участка находятся в нормативном состоянии, 5 % обследованного участка в удовлетворительном. Таким образом, начальный вектор r_0 имеет вид:

$$r_0 = 0.95 \quad 0.05 \quad 0$$

Диагностика состояния дорожной одежды на данном участке на 4-й год (2013) эксплуатации, включающая в себя оценку прочности и визуального состояния дорожной одежды, позволила выявить количественные зависимости перехода участков из нормативного состояния в удовлетворительное, а из удовлетворительного в неудовлетворительное (таблица №2):

Таблица № 2

Количественные зависимости перехода участков между различными уровнями сохранности

Уровень сохранности	Нормативный	Удовлетворительный	Неудовлетворительный
Нормативный	90%	10%	0%
Удовлетворительный	0%	90%	10%
Неудовлетворительный	0%	0%	100%

Таблица №2 может быть представлена в виде переходной матрицы в следующем виде:

$$P = \begin{pmatrix} 0.9 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0.1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Таким образом, используя зависимость (2) возможно осуществить прогнозирование вероятности нахождения дорожной конструкции в нормативном, удовлетворительном или неудовлетворительном состоянии в течение ее срока службы с заданным временным шагом. Результаты

проведенного прогнозирования для обследованной дорожной одежды приведены в таблице №3.

Таблица № 3

Результаты прогнозирования снижения структурных показателей дорожной конструкции в процессе ее эксплуатации

Уровень сохранности \ Год эксплуатации	Протяженность участка автомобильной дороги с соответствующим уровнем сохранности по годам							
	2013	2015	2017	2019	2021	2023	2025	2027
Нормативное состояние	0.855	0.770	0.690	0.62	0.56	0.50	0.45	0.40
Удовлетворительное	0.140	0.210	0.260	0.30	0.34	0.36	0.37	0.38
Неудовлетворительное	0.005	0.020	0.050	0.07	0.1	0.13	0.17	0.22

Представленная таблица позволяет отследить динамику деградации структурных показателей дорожной одежды по годам ее эксплуатации, и сделать вывод, что на последний 18 год срока службы примерно 22 % протяженности участка будут находиться в неудовлетворительном состоянии.

Выводы:

- в качестве основного показателя при оценке состояния нежестких дорожных одежд эксплуатируемых автомобильных дорог на сетевом уровне предлагается использовать уровень сохранности участка дорожной одежды, определяемый в соответствии с таблицей №1;

- для прогнозирования состояния нежестких дорожных конструкций на эксплуатируемых автомобильных дорогах возможно использовать аппарат цепей Маркова, позволяющий производить вероятностные расчеты процентного распределения протяженности участков, характеризующихся разным уровнем сохранности на различных этапах эксплуатации;

- на примере существующего участка автомобильной дороги представлен прогноз снижения структурных показателей дорожной одежды в течение всего периода ее эксплуатации (таблица №3);

- главным достоинством применения подхода к прогнозированию изменения структурных показателей дорожных одежд на основе цепей Маркова видится возможность отработки различных сценариев функционирования дорожной одежды на различных этапах ее жизненного цикла. Так, ухудшение состояния дорожной конструкции может прогнозироваться на основе данных ее диагностики, т.е. по результатам натурных замеров, или в виде имитационного моделирования с целью обоснования эффективности применения различных ремонтных мероприятий в ходе ее эксплуатации.

Литература:

1. Васильев А.П. Эксплуатация автомобильных дорог. 3 изд. М.: Академия, 2013. 320 с.

2. Апестин В. К. О расхождении проектных и нормативных межремонтных сроков службы дорожных одежд // Наука и техника в дорожной отрасли. 2011. №1. С. 18-20.

3. Илиополов С. К., Селезнев М. Г., Углова Е. В. Динамика дорожных конструкций. Ростов - н - Дону: РГСУ, 2002. 258 с.

4. Snaith, M. S., Robinson, R., Danielson, U. Road Maintenance Management: Concepts and Systems. M.: 1998. 312 p.

5. Panthi K. A Methodological Framework for Modeling Pavement Maintenance Costs for Projects with Performance-based Contracts: 2009. 191 p.

6. СТО АВТОДОР 2.4-2013 "Оценка остаточного ресурса нежестких дорожных конструкций автомобильных дорог Государственной компании Российские автомобильные дороги". М.: 2013. 43 с.



7. Углова Е. В., Тиратурян А. Н. Исследование однородности и прочности нежесткой дорожной конструкции с использованием установки динамического нагружения FWD // Дороги и мосты. М., №33. С. 163-173.

8. Horak E. Evaluation of Airport Pavements with FWD Deflection Bowl Parameter Benchmarking Methodology // 2nd European Airport Pavement Workshop. 2007. p. 13.

9. Horak E. Benchmarking the Structural Condition of Flexible Pavements with Deflection Bowl Parameters // Journal of the South African. 2008. p. 652.

10. Isaacson D. L., Madsen R. W. Марковских цепей: Теория и приложения // Wiley. 1976. p. 256.

11. Николенко М.А., Бессчетнов Б.В. Повышение длительной трещиностойкости асфальтобетона дорожных покрытий // Инженерный вестник Дона, 2012, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/856

12. Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Акулов В.В., Валенцев Д.А., Шаталов В.Ю. Учет вероятностной составляющей при назначении проектных модулей упругости слоев асфальтобетона // Инженерный вестник Дона, 2016, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3647

13. Углова Е.В., Саенко С.С. Обзор инструментов управления состоянием дорожных конструкций // Интернет - журнал «Транспортные сооружения», Том 3, №1 (2016) URL: t-s.today/PDF/02TS116.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

References

1. Vasil'ev A.P. Jekspluatacija avtomobil'nyh dorog [Road maintenance]. 3 izd. M.: Akademija, 2013. 320 p.

2. Apestin V. K. Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli. 2011. №1. pp. 18-20.



3. Iliopolov S. K., Seleznev M. G., Uglova E. V. Dinamika dorozhnyh konstrukcij [Dynamics of road constructions]. Rostov - na - Donu: RGSU, 2002. 258 p.
 4. Snaith, M. S., Robinson, R., Danielson, U. Road Maintenance Management: Concepts and Systems. M.: 1998. 312 p.
 5. Panthi K. A Methodological Framework for Modeling Pavement Maintenance Costs for Projects with Performance-based Contracts: 2009. 191 p.
 6. STO AVTODOR 2.4.-2013 "Ocenka ostatochnogo resursa nezhestkih dorozhnyh konstrukcij avtomobil'nyh dorog Gosudarstvennoj kompanii Rossijskie avtomobil'nye dorogi" [Evaluation of residual life of non-rigid road designs of highways of the State Company Russian Highways]. M.: 2013. 43 p.
 7. Uglova E. V, Tiraturjan A. N. Dorogi i mosty. M. №33. pp. 163-173.
 8. Horak E. Evaluation of Airport Pavements with FWD Deflection Bowl Parameter Benchmarking Methodology. 2nd European Airport Pavement Workshop. 2007. 13 p.
 9. Horak E. Benchmarking the Structural Condition of Flexible Pavements with Deflection Bowl Parameters. Journal of the South African. 2008. 652 p.
 10. Isaacson D. L., Madsen R. W. Markov chains: Theory and Applications. Wiley. 1976. 256 p.
 11. Nikolenko M.A., Besschetnov B.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/856
 12. Uglova E.V., Tiraturjan A.N., Akulov V.V., Valencev D.A., Shatalov V.Ju. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3647
 13. Uglova E.V., Saenko S.S. Internet - zhurnal «Transportnye sooruzhenija», Tom 3, №1 (2016) URL: t-s.today/PDF/02TS116.pdf (dostup svobodnyj). Zagl. s jekrana. Jaz. rus., angl.
-