

ДИНАМИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Батракова А. Г.¹, Урдзик С. М.¹, Батраков Д. О.²

¹ Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

² Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина

Аннотация. В работе сформулирован алгоритм и определена задача оптимального выбора набора участков с целью получения максимально достоверных прогнозов при необходимом условии минимального числа таких участков. Предложено решение задачи оптимизации с ограничениями по затратам при условии достижения максимальной эффективности прогнозирования.

Ключевые слова: система управления состоянием покрытия, георадарные обследования, динамические модели прогнозирования, марковские цепи.

Введение

Важными составляющими системы управления состоянием покрытия (СУСП) автомобильных дорог являются оценка текущего состояния как отдельных участков, так и сети в целом и прогнозирование количественных характеристик, описывающих процесс изменения параметров конструкции дорожной одежды (КДО). По мере развития технических средств диагностики для получения первичных данных все шире стали применяться радиофизические инструменты – георадары. Их преимущества состоят в возможности проведения неразрушающего контроля при движении, а также в объёме исходной информации, которую не дают другие средства контроля. В то же время первичные наборы данных, полученные с помощью георадаров, помимо первичной обработки требуют последующей интерпретации для их приведения к виду, принятому в дорожной отрасли. Поэтому, прежде всего, рассмотрим основные результаты, имеющиеся в литературе по вопросам обработки и интерпретации данных диагностики текущего состояния КДО и различных аспектов прогнозирования процессов деградации дорожных одежд.

Анализ публикаций

Классифицировать модели прогнозирования разрушения дорожных одежд можно по разным наборам характерных признаков. В первых вариантах классификации модели разделяли на статические регрессионные [1–5] и стохастические (вероятностные) [6–8].

Исторически первой [1] можно считать статическую регрессионную модель, основанную на так называемой точечной интер-

поляционной оценке. Возможные ошибки измерений и внешние по отношению к самой модели факторы в рамках этого подхода представляют особым дополнительным слагаемым – поправкой. Суть использования таких моделей в установлении связи между основными типами переменных – зависимыми, объясняющими и независимыми. Зависимые переменные (индекс состояния КДО) в статических регрессионных моделях «зависят» лишь от объясняющих переменных (например, прогиб под эталонной нагрузкой или общий эквивалентный модуль упругости). Независимой переменной является время. Тогда основная задача заключается в отыскании связей между независимыми и объясняющими переменными. Исходными данными служат результаты наблюдений за состоянием системы в предшествующий период. Простейшие статические регрессионные модели дают результат процесса деградации КДО в виде однозначных значений. Эти значения вычисляются на основе данных о предшествующих состояниях конструкции.

Стохастические (вероятностные) модели дают прогноз вероятности нахождения конструкции в определённом состоянии в будущем. Среди таких моделей также можно выделить несколько направлений – анализ с помощью цепей Маркова, эконометрические методы и методы теории надёжности [9–12]. Эти модели находят применение, в первую очередь, на сетевом уровне.

После появления новых диагностических средств, в том числе и георадаров [13], получили распространение динамические модели локального уровня. Изначально они были предложены в [14] и затем развиты в [15] на основе привлечения данных мониторинга с

применением результатов георадарной диагностики.

Целесообразность применения метода марковских цепей для оценки и прогнозирования состояния дорожных одежд обоснована в 1982 г. в [16] на примере штата Аризона (США). Позднее аппарат марковских цепей был развит для решения задач планирования затрат на уровне сети [8]. Идея использования метода марковских цепей при таком подходе заключается в построении матрицы перехода, связывающей вероятности нахождения участков сети в фиксированных состояниях в разные моменты времени. Однако такой подход имеет ограничения, связанные с тем, что прогнозные оценки рассчитываются только на основе внешних (наблюдаемых) параметров [8], то есть при фактическом условии существенной неполноты наборов данных. Понятно, что повышение информативности данных (в первую очередь за счёт скрытых характеристик – дефектах подповерхностной части КДО) существенным образом улучшит достоверность и качество прогнозов.

Цель и постановка задачи

Исходя из проведённого анализа литературных данных, следует вывод, что актуальная задача повышения надёжности прогнозов локального и сетевого уровней до сих пор в полном объёме не решена. В частности, проведение мониторинга даже с помощью георадара, установленного на автомобиль-лабораторию, требует затрат не только на сами измерения, но и на предварительную калибровку прибора на эталонных участках и последующую процедуру углублённой интерпретации полученных данных. Это эконометрическая составляющая общей проблемы оптимизации мониторинга. Помимо неё существует техническая составляющая проблемы оптимизации, связанная с выбором наименьшего числа участков при условии достижения максимальной надёжности прогнозов. Поэтому в данной работе предложена схема, объединяющая решение этих двух задач в рамках единого подхода, что требует:

– сформулировать и получить решение задачи оптимального выбора участков для получения максимально достоверных прогнозов при условии минимального числа таких участков;

– записать решение задачи оптимизации с ограничениями по затратам при условии достижения максимальной эффективности прогнозирования;

– объединить оба этих решения в единый комплексный подход к прогнозированию на сетевом уровне с учётом результатов применения динамических моделей локального уровня [15].

Получение и анализ первичных данных

Реальный опыт мониторинга сети автомобильных дорог с привлечением георадарных технологий свидетельствует о наличии определённых ограничений на объём работ по неразрушающему контролю. Эти ограничения связаны, с одной стороны, с необходимостью предварительного выбора эталонных участков и последующей калибровки прибора (георадара), а с другой, – с ограничением ширины полосы зондирования. Даже в случае использования линейки георадаров, смонтированной на автомобиль-лабораторию, который движется со скоростью транспортного потока, ширина этой полосы составляет не более 2,5 м. Необходимо подчеркнуть, что в таком режиме происходит лишь регистрация и накопление массивов первичных данных. Во многих работах авторы предполагают визуальную обработку радарограмм опытным оператором. Но оператор не может дать количественных оценок, его оценки только качественные. Тогда как для принятия оптимальных управленческих решений необходимы именно количественные измерения (данные), причём эти решения должны быть многоуровневыми. Под термином «решения *первого уровня*» будем далее понимать результаты первичной обработки и интерпретации данных георадарного зондирования (радарограмм). Суть этого этапа заключается в определении физико-геометрических параметров – диэлектрической проницаемости слоёв конструкции и их толщины. Решения *второго уровня* предполагают привлечение дополнительной информации для пересчёта полученных на первом этапе данных в механические характеристики – такие как общий эквивалентный модуль упругости конструкции и модуль Юнга материала каждого слоя, содержание влаги в слоях основания, степень уплотнения для новых покрытий и пористость как индикатор разрушения асфальтобетона для покрытий, находящихся в эксплуатации. Кроме того, при обнаружении трещин в укрепленных слоях КДО необходим анализ их влияния на деформационные характеристики дорожной одежды. И наконец, этапом *третьего уровня* (заключительным) является опти-

мизация назначения мероприятий по содержанию и ремонту. Оптимизация, кроме того, подразумевает учёт объёмов финансирования для всех трех этапов. Подчеркнём ещё раз, что проведение мониторинга и последующей обработки результатов также требует финансовых затрат. Поэтому задача отбора участков сети дорог для обследования является важной с точки зрения рационального распределения ресурсов.

В качестве исходной постановки задачи необходимо привлечь динамические модели прогнозирования процесса разрушения КДО. Как уже говорилось выше, такие модели применительно к автомобильным дорогам были изначально предложены в [14] и затем усовершенствованы в [15]. Суть этих моделей заключается в привлечении георадарных данных для построения прогноза [15]:

$$E_{t_{6+1}} = c_{0,6+1} + c_{1,6+1} \cdot t_{6+1} + c_{2,6+1} \cdot t_{6+1}^2 + \chi_{5+1} + \chi'_{5+1} \tau + \frac{\chi''_{5+1}}{2!} \tau^2. \quad (1)$$

Первые три слагаемые этой формулы отражают динамический характер модели, а три последующих отвечают за адаптивную природу модели. Цифры 6 и 5 в индексах модели соответствуют 6 и 5-му годам наблюдений. В этом случае прогноз является наиболее достоверным. Минимальный временной интервал для построения динамического прогноза составляет 4 года. Более детально особенности применения такой модели рассмотрены в [15].

Алгоритм оптимизации выборки участков

Для дальнейшего продвижения отметим, что динамическая модель вида (1) является моделью локального уровня. Иными словами, эта модель предназначена для получения прогноза на уровне отдельных выбранных участков сети дорог.

Далее предполагается разделение участков дорожной сети по типам. Одним из критериев может служить скорость процесса разрушения (изменения состояния) участка. Центральная идея такого подхода – применение одинаковых прогнозных оценок ко всем участкам данного типа. Иными словами, к набору ранее принятых принципов группировки участков по индексу текущего состояния [17] предлагается добавить разделение участков по скорости их разрушения.

Следующий этап – построение прогноза на уровне сети дорог. Очевидно, что в таком

случае первый шаг – группировка участков по соответствующим критериям. Помимо явных технических критериев (текущее состояние и скорость его изменения на протяжении предыдущего периода), существуют и дополнительные критерии, например экономического характера – стоимость работ по содержанию и ремонту. Понятно, что без корректного учёта этих факторов, невозможно построить эффективную модель. В [17] предложена модель оценки текущего состояния КДО общего вида:

$$F = f \left(\begin{matrix} PCI, K_E, K_\tau, K_\sigma, K_n \\ N, E_i, h_i, D_i, E_{zp}, \varphi_{zp} \\ c_{zp}, R_u, m, T, W \end{matrix} \right). \quad (2)$$

Практическая значимость этой модели состоит в том, что помимо набора технико-эксплуатационных параметров – индекса состояния покрытия и коэффициентов запаса прочности (первые пять параметров) – в неё включены и скрытые внутренние параметры (число приложений расчётной нагрузки (N), модуль материала слоя (E_i) и толщина каждого слоя (h_i), наличие подповерхностных трещин (D_i), деформационные и прочностные параметры грунта ($E_{zp}, \varphi_{zp}, c_{zp}$), влажность (W) и др.). Отметим, что в модель (2) входят лишь технические параметры, поэтому в данной работе предложено усовершенствование модели (2) путём введения в неё дополнительных параметров, отражающих необходимые ресурсы на мероприятия по мониторингу, содержанию и ремонту. В качестве таких параметров на данном этапе (уровень локальных участков) предлагается привлечь коэффициенты, характеризующие затраты на обследование K_i , обслуживание K_s и ремонт K_r . В таком случае в общем виде задача может быть сформулирована в терминах отыскания минимума функционала от функции, описывающей зависимость результата от исходных параметров, приведённых в (2), и ограничениях на затраты Z :

$$F[\eta] \rightarrow \min. \\ \eta = f(x_1, x_2, \dots, x_i), \sum Z \leq \text{Max}. \quad (3)$$

Полученные с помощью динамической модели локального уровня результаты далее, на этапе построения прогноза для сети дорог необходимо объединить в рамках общего логически замкнутого алгоритма. Для реше-

ния этой задачи воспользуемся предложенным в [17] стохастическим подходом к прогнозированию на основе марковских цепей. Согласно [17] прогнозирование состояния сети на основе метода цепей Маркова с привлечением базовой динамической адаптивной модели может быть в компактном виде представлено операцией умножения матрицы перехода (\mathbf{P}_T) на вектор состояния ($\mathbf{P}(t_1)$):

$$\mathbf{P}(t_2) = \mathbf{P}_T \times \mathbf{P}(t_1). \quad (3)$$

Удобство такого представления заключается в том, что для получения следующих прогнозов достаточно просто возвести в квадрат матрицу перехода [17]. В данной работе предлагается в дополнение к уже имеющимся критериям в рамках общей операторной модели добавить набор элементов в виде оператора, обеспечивающего коррекцию модели с учётом эконометрических показателей (\hat{L}_{econ}):

$$\mathbf{P}(t_2) = \hat{L}_D \cdot V(t_1) + \mathbf{P}'_T \cdot \mathbf{P}_{j,V}(t_1) + \hat{L}_{econ} \cdot V(t_1), \quad (4)$$

где $\hat{L}_D \cdot V(t_1)$ – результат применения динамической адаптивной модели прогнозирования к обследованным участкам; \mathbf{P}'_T – результат корректировки исходной матрицы перехода с учётом динамической модели; $\hat{L}_{econ} \cdot V(t_1)$ – результат корректировки с учётом эконометрической модели.

Очевидно, что предложенное дополнение к процедуре комплексного применения динамических и марковских моделей существенно повышает эффективность прогнозных оценок в условиях ограниченного финансирования. Таким образом, укрупнённый алгоритм состоит из следующих этапов:

1) анализ имеющихся данных об особенностях различных участков с целью их корректной группировки по критериям технико-эксплуатационного состояния (скорость изменения индекса состояния) и эконометрическим критериям (стоимость ремонта и содержания);

2) анализ объёмов работ по обследованию сети и сопоставление его с выделенными ресурсами;

3) подготовка исходных массивов данных и отбор групп участков для дальнейшего обследования.

Если обозначить объем ресурсов, выделенных в j -м году на обследование сети черз

$Z_{\Sigma,j}$, то в общем виде задачу оптимизации этого этапа следует компактно записать как:

$$F[\xi_{\Sigma}] \rightarrow \min; \quad Z_j \leq Z_{\Sigma,j}, \quad (5)$$

$$\xi_{\Sigma} = \sum_{m=1}^M \varphi(n_1, n_2, \dots, n_M)$$

где m – индекс состояния группы участков (общим количеством n), ξ_{Σ}, φ – функции, описывающие общий и парциальные индексы состояния по группам участков.

Для решения этой задачи могут быть привлечены разные методы. Однако, как показывает опыт, практически во всех случаях существует некоторая априорная информация о наиболее вероятном распределении, которая может быть использована в качестве начального приближения к искомому решению. В таком случае эффективным инструментом решения задачи отыскания экстремума функционала является схема Ньютона-Канторовича [18] и метод регуляризации Тихонова-Филипса [19].

Суть подхода состоит в формулировке новой итерационной задачи отыскания экстремума квадратичного функционала относительно поправок к начальному приближению. В итоге задача сводится к уравнению Эйлера, которое в рамках данной формулировки и предположения о непрерывном характере модели принимает вид интегрального уравнения Фредгольма II рода с вырожденным ядром [18]:

$$-\int K(R, R') \cdot \xi(R') dR' + \alpha \cdot w(\bar{R}) \xi(R) = q(R), \quad (6)$$

$$R, R' \in Z_{\Sigma};$$

В (6) $K(R, R')$ – ядро интегрального оператора; $\xi(R')$ – искомая поправка к начальному приближению; α – параметр регуляризации (неотрицательное число); $w(\bar{R})$ – положительно определённая весовая функция [19];

4) на заключительном этапе алгоритм предусматривает решение эконометрической задачи оптимизации мероприятий по содержанию и ремонту с учётом как технических условий, так и ограничений по затратам. В общем виде с использованием модели, предложенной в [17], задачу можно записать в виде оператора обслуживания:

$$\hat{U}_{serv}[s_{i=1\dots N}(t)] \equiv |\varphi(l_1, l_2, \dots, l_{\max})|^T, \quad (7)$$

где $\hat{U}_{serv}[s_{i=1\dots N}(t)]$, $|\varphi(l_1, l_2, \dots, l_{\max})|^T$ – оператор обслуживания и транспонированная вектор-функция. Такая запись в компактной форме отображает применение разработанной ранее модели [17] к набору регистрируемых параметров.

Выводы

В работе впервые сформулирован алгоритм и предложено решение задачи оптимального выбора набора участков с целью получения наиболее достоверных прогнозов при необходимом условии минимального числа таких участков.

Определена задача оптимизации с ограничениями по затратам при условии достижения максимальной эффективности прогнозирования состояния КДО.

Предложен комплексный подход к прогнозированию состояния КДО на сетевом уровне, опирающийся на динамические модели локального уровня и учитывающий результаты георадарной диагностики.

Литература

- Prozzi J. A., de Beer M. Mechanistic determination of equivalent damage factors for multiple load and axle configurations. Eight International Conference on Asphalt Pavements: Proceedings. University of Washington, Seattle – Washington. 1997. Vol. 1. P. 161–178.
- Zumrawi Magdi. Survey and Evaluation of flexible Pavement Failures. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2015. № 4. P. 1602–1607.
- Khaing H., Htwe T. Study on Failures and Maintenance of Flexible Pavement. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*. 2014. № 3 (14). P. 2984–2990.
- Gupta A., Kumar P., Rastogi R. Pavement Deterioration and Maintenance Model for Low Volume Roads. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2011. Vol. 4. № 4. P. 195–202.
- Zhaoyang Lua, Qiang Meng. Impacts of pavement deterioration and maintenance cost on Pareto-efficient contracts for highway franchising. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2018. Vol. 113. P. 1–21.
- Nega. A., Nikraz. H., Herath. S., Ghadimi B. Distress Identification, Cost Analysis and Pavement. *International Journal of Engineering and Technology*. 2015. Vol. 7 (4). P. 267–275.
- Zambon Ivan, Vidovic Anja, Strauss Alfred, Matos Jose, Amado Joao. Comparison of Stochastic Prediction Models Based on Visual Inspections of Bridge Decks. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2017. Vol. 23. P. 553–561. URL: <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1323795>. (дата звернення: 20.03.2019).
- Tjan A., Pitaloka D. Future Prediction of Pavement Condition Using Markov Probability Transition Matrix. *Eastern Asia Society for Transportation Studies: Proceedings*. 2005. Vol. 5. P. 772–782.
- Sérgio Pacífico Soncim, Igor Castro Sá de Oliveira, Felipe Brandão Santos, Carlos Augusto de Souza Oliveira. Development of probabilistic models for predicting roughness in asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*. 2018. Vol. 19 (6). P.1448–1457. URL: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1304233> (дата звернення: 20.03.2019).
- Mandiartha Putu, Duffield Colin, Thompson Russell, R. Wiggan Marcus. A stochastic based performance prediction model for road network pavement maintenance. *Road and Transport Research*. 2012. Vol. 21 (3). P. 34–52.
- Abaza Khaled. Empirical approach for estimating the pavement transition probabilities used in non-homogenous Markov chains. *International Journal of Pavement Engineering*. 2016. Vol. 18. P. 130–139.
- Feng Hong, Jorge A. Prozzi. Using Count Data to Model Infrastructure Distress Initiation and Progression. *Journal of Infrastructure Systems*. 2015. Vol. 21. Issue 1. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000168). (дата звернення: 20.03.2019).
- Ground penetrating radar, theory and applications / Jol Harry M. (Editor). Amsterdam: Elsevier B. V., 2009. 508 p.
- Zheng Li. A. Probabilistic and Adaptive Approach to Modeling Performance of Pavement Infrastructure: Dissertation Presented to the Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. The University of Texas at Austin. 2005. 156 p.
- Batrakova Angelika G., Batrakov Dmitry O., Antyufeyeva Mariya S. Pavement deterioration model based on GPR datasets. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*. 2018. Vol. 17. № 1. P. 55–71.
- Golabi K., Kulkarni R. B., Way G. B., Statewide A. Pavement Management System. *Interfaces*. 1982. Vol. 12. P. 5–21.
- Батракова А. Г. Методология мониторинга дорожных оджд нежесткого типа с применением георадиолокационных технологий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.11 / Харьковский нац. автомобильно-дорожный ун-т. Харьков, 2014. 307 с.
- Batrakov D. O., Zhuck N. P. Inverse Scattering Problem in the Polarization Parameters Domain for Isotropic Layered Media: Solution via Newton-Kantorovich Iterative Technique. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 1994. Vol. 8. № 6. P. 759–779.

19. Batrakov D. O. Quality and efficiency of information monitoring at radio wave testing of inhomogeneous dielectric layers by using a multifrequency method. *Defektoskopiya*. 1998. № 8. P. 68–76.

References

1. Prozzi J. A., de Beer M. (1997) Mechanistic determination of equivalent damage factors for multiple load and axle configurations. Eight International Conference on Asphalt Pavements: Proceedings. University of Washington, Seattle – Washington, Vol. 1. P. 161–178.
2. Zumrawi Magdi. (2015) Survey and Evaluation of flexible Pavement Failures. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. № 4. P. 1602–1607.
3. Khaing H., Htwe T. (2014) Study on Failures and Maintenance of Flexible Pavement. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*. № 3 (14). P. 2984–2990.
4. Gupta A., Kumar P., Rastogi R. (2011) Pavement Deterioration and Maintenance Model for Low Volume Roads. *International Journal of Pavement Research and Technology*. Vol. 4. № 4. P. 195–202.
5. Zhaoyang Lua, Qiang Meng. (2018) Impacts of pavement deterioration and maintenance cost on Pareto-efficient contracts for highway franchising. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. Vol. 113. P. 1–21.
6. Nega. A., Nikraz. H., Herath. S., Ghadimi B. (2015) Distress Identification, Cost Analysis and Pavement. *International Journal of Engineering and Technology*. 7 (4). P. 267–275.
7. Zambon Ivan, Vidovic Anja, Strauss Alfred, Matos Jose, Amado Joao. (2017) Comparison of Stochastic Prediction Models Based on Visual Inspections of Bridge Decks. *Journal of Civil Engineering and Management*. Vol. 23 (5). P. 553–561. Retrieved from: <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1323795>. (accessed 20.03.2019).
8. Tjan A., Pitaloka D. (2005) Future Prediction of Pavement Condition Using Markov Probability Transition Matrix. *Eastern Asia Society for Transportation Studies: Proceedings*. Vol. 5. P. 772–782.
9. Sérgio Pacífico Soncim, Igor Castro Sá de Oliveira, Felipe Brandão Santos, Carlos Augusto de Souza Oliveira. (2018) Development of probabilistic models for predicting roughness in asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*. Vol. 19 (6). P. 1448–1457. Retrieved from: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1304233>. (accessed 20.03.2019).
10. Mandiartha Putu, Duffield Colin, Thompson Russell, R. Wiggan Marcus. (2012) A stochastic based performance prediction model for road network pavement maintenance. *Road and Transport Research*. Vol. 21 (3). P. 34–52.
11. Abaza Khaled. (2016) Empirical approach for estimating the pavement transition probabilities used in non-homogenous Markov chains. *International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 18. P. 130–139.
12. Feng Hong, Jorge A. Prozzi. (2015) Using Count Data to Model Infrastructure Distress Initiation and Progression. *Journal of Infrastructure Systems*. Vol. 21. Issue 1. Retrieved from: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000168). (accessed 20.03.2019).
13. Ground penetrating radar, theory and applications / Jol Harry M. (Editor). (2009) Amsterdam: Elsevier B. V., 508 p.
14. Zheng Li. A. (2005) Probabilistic and Adaptive Approach to Modeling Performance of Pavement Infrastructure: Dissertation Presented to the Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. The University of Texas at Austin. 156 p.
15. Batrakova Angelika G., Batrakov Dmitry O., Antyufeyeva Mariya S. (2018) Pavement deterioration model based on GPR datasets. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*. Vol. 17. № 1. P. 55–71.
16. Golabi K., Kulkarni R. B., Way G. B., Statewide A. (1982) Pavement Management System. *Interfaces*. Vol. 12. P.5–21.
17. Batrakova A. G. (2014) Metodologiya monitorniga dorozhnykh odzhed nezhestkogo tipa s primeneniyem georadiolokatsionnykh tekhnologiy [Methodology of nonrigid road pavements monitoring with application of georadar technologies]: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.11 / Khar'kovskiy nats. Avtomobil'no-dorozhnyy un-t. Khar'kov, 2014. 307 с.
18. Batrakov D. O., Zhuck N. P. (1994) Inverse Scattering Problem in the Polarization Parameters Domain for Isotropic Layered Media: Solution via Newton-Kantorovich Iterative Technique. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 8. № 6. P.759–779.
19. Batrakov D.O. (1998) Quality and efficiency of information monitoring at radio wave testing of inhomogeneous dielectric layers by using a multifrequency method. *Defektoskopiya*. № 8. P. 68–76.

Батракова Анжелика Геннадьевна¹,
д-р техн. наук, профессор, тел.+38(057)707-37-32,
e-mail: gp@khadi.kharkov.ua,

Урдзик Сергей Николаевич¹,
без степени, без звания, тел. +38(057)707-37-32,
e-mail: gp@khadi.kharkov.ua,
кафедра проектирования дорог, геодезии и землеустройства, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
61002, г. Харьков, Украина, ул. Ярослава Мудрого, 25.

Батраков Дмитрий Олегович²,
д-р физ.-мат. наук, профессор,
тел. +38(057)707-52-57,
e-mail: batrakov@karazin.ua,
кафедра теоретической радиофизики,
Харьковский национальный университет
им. В. М. Каразина,
61022, г. Харьков, Украина, пл. Свободы, 4.

Dynamic and econometric models for predicting the automobile roads condition

Abstract. Essential components of the system of pavement condition management (PMS) of highways are the assessment of the current state of both individual sections and the network as a whole and the prediction of quantitative characteristics describing the process of changing the parameters of the design of road. With the development of technical diagnostic tools, radiophysical tools, geo-radars, have become increasingly used to obtain primary data. Their advantages consist in the possibility of conducting non-destructive testing during movement, as well as in the amount of initial information that other means of control do not provide. At the same time, the primary data sets obtained using GPR, in addition to primary processing, require subsequent interpretation in order to convert them to the form adopted in the road industry. Based on the analysis of the literature data, it follows that the actual task of improving the reliability of local and network level forecasts has not yet been fully resolved. In particular, monitoring even using a GPR installed on a car-laboratory, requires not only the cost of the measurements themselves, but also the preliminary calibration of the instrument (GPR) on these sections and the subsequent in-depth interpretation of the data obtained. In this paper, we propose to add, in addition to the existing criteria within the framework of the general operator model, a set of elements in the form of an operator, providing for the correction of the model, taking into account econometric indicators. In addition, an algorithm was first formulated and a solution was proposed for the problem of optimal selection of a set of sites in order to obtain the most reliable forecasts with the necessary condition for the minimum number of such sites. Also, a solution to the optimization problem with cost constraints is given, provided that the maximum predictive efficiency is achieved. As a result, both of these decisions are combined into a one integrated approach to forecasting at the network level, taking into account the results of the use of GPR diagnostics and dynamic models of the local level.

Keywords: road pavement management system, ground penetrating radar surveys, dynamic prediction models, Markov chains.

Batrakova Angelika G.¹,

Dr. Techn. Sci., Professor, tel.+38(057)707-37-32,
e-mail: rp@khadi.kharkov.ua,

Urdzik Sergey N.¹,

No Sci. Degree, No Ac. Title tel.+38(057)707-37-32,
e-mail: rp@khadi.kharkov.ua,

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, Department of Highway Design, Geodesy and Land Management,
61002 Ukraine, Kharkiv, 25 Yaroslava Mudroho str.,

Batrakov Dmitry O.²,

Dr. physics and mathematics. Sci., Professor,
tel.+38(057)707-52-57, e-mail: batrakov@karazin.ua,

²V. N. Karazin Kharkiv National University, Department of Theoretical Radiophysics,
61022 Ukraine, Kharkiv, 4 Svobody Sq.

Динамічні й економетричні моделі прогнозування стану автомобільних доріг

Анотація. За результатами аналізу літературних джерел зроблено висновок, що актуальне завдання підвищення надійності прогнозів стану конструкції дорожнього одягу (КДО) локального і мережного рівнів у повному обсязі не вирішено. Запропонований підхід до вирішення завдання обґрунтування мінімальної кількості ділянок обстеження за умови максимальної надійності прогнозних оцінок стану покриття, який потребує: вирішення завдання вибору мінімальної кількості ділянок за умови максимально достовірних прогнозів; вирішення завдання оптимізації з обмеженнями щодо витрат за умови максимальної ефективності прогнозування; розроблення комплексного підходу до прогнозування на мережному рівні, що застосовує динамічні моделі прогнозування стану КДО локального рівня. Запропонований алгоритм складається з етапів: 1) аналізу даних про особливості різних ділянок з метою їх групування за критеріями техніко-експлуатаційного стану (швидкість зміни індексу стану покриття) і економетричними критеріями (вартість ремонту та утримання); 2) аналізу обсягів робіт з обстеження мережі та зіставлення його з наявними ресурсами; 3) відбору груп ділянок для обстеження. На цьому етапі запропоновано вирішення завдання у вигляді рівняння Ейлера, яке за умови безперервності моделі приймає вигляд інтегрального рівняння Фредгольма II роду з виродженим ядром; 4) вирішення економетричного завдання оптимізації заходів з ремонту та утримання з урахуванням обмежень за витратами.

Ключові слова: система управління станом покриття, георадарне обстеження, динамічні моделі прогнозування, марковські ланцюги.

Батракова Анжеліка Геннадіївна¹,

д-р техн. наук, професор, тел.+38(057)707-37-32,
e-mail: rp@khadi.kharkov.ua,

Урдзік Сергій Миколайович¹,

без ступеня, без звання, тел.+38(057)707-37-32,
e-mail: rp@khadi.kharkov.ua,

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, кафедра проектування доріг, геодезії і землеустрою,
61002, м. Харків, Україна, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Батраков Дмитро Олегович²,

д-р фіз.-мат. наук, професор, тел. +38(057)707-52-57,

e-mail: batrakov@karazin.ua,

²Харківський національний університет ім. В. М. Каразіна, кафедра теоретичної радіофізики,
61022, м. Харків, Україна, майдан Свободи, 4.