УДК 625.7/.8:658.562

Батракова А.Г., канд. техн. наук

МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

Аннотация. Предложена динамическая адаптивная модель прогнозирования состояния дорожных одежд на уровне отдельных участков на основе комплексных наборов данных, опирающихся на результаты георадарного обследования. Показана эффективность применения модели при планировании мероприятий по ремонту и содержанию дорожных одежд.

Ключевые слова: дорожная одежда нежесткого типа, деградация дорожных одежд, динамическая адаптивная модель, базовая модель.

Анотація. Запропоновано динамічну адаптивну модель прогнозування стану дорожніх одягів на рівні окремих ділянок на підставі комплексних наборів даних, які спираються на результати георадарного обстеження. Доведено ефективність застосування моделі при плануванні заходів з ремонту та утриманню дорожніх одягів.

Ключові слова: дорожній одяг нежорсткого типу, деградація дорожніх одягів, динамічна адаптивна модель, базова модель.

Annotation. Dynamic adaptive prediction model of pavement states at the individual sites based on complex data sets, based on the results of the GPR survey, is proposed. The efficiency of the model is demonstrated for planning repair and maintenance of road pavements.

Key words: non rigid pavement type, pavement degradation, dynamic adaptive model, the base model.

Основная цель всех моделей деградации покрытия – на основании собранных наборов данных с помощью соответствующей обработки дать как можно более точный и достоверный прогноз изменения состояния дорожных одежд (технико-эксплуатационных показателей). При использовании простейших статических регрессионных моделей прогнозирования в роли основного параметра выступает, как правило, индекс состояния покрытия, а процесс деградации (изменения состояния) дорожной конструкции описывается с помощью его однозначных значений, вычисляемых на основе данных о предшествующих состояниях конструкции. В рамках стохастических (вероятностных) моделей прогнозируется вероятность того, что в определенный момент в будущем конструкция окажется в определенном состоянии. Среди вероятностных моделей можно выделить несколько основных направлений – анализ с помощью цепей Маркова, эконометрических методов и методов теории надежности [1].

Динамические методы предназначены для моделирования процессов, ход которых изменяется со временем, т.е. отражают изменение свойств процессов во времени. В таком случае, динамические модели призваны обеспечить более точное отображение процесса деградации дорожных одежд и, как следствие, принятие более качественных управленческих решений [2]. При формировании соответствующего математического аппарата помимо значений объясняющих переменных в фиксированные (начальные) моменты времени играет роль и скорость изменения этих переменных. Чтобы пояснить суть такого подхода, следуя методике, предложенной в [1, 3] представим величину, характеризующую состояние дорожной одежды (например, PCI) в виде:

$$P_{наб,t} = P_{мод,t} + \alpha_t + \xi_t, \tag{1}$$

где $P_{наб,t}$ - реально существующее (зарегистрированное) состояние дорожной одежды в момент времени t;

$P_{мод,t}$ - состояние дорожной одежды в соответствии с принятой базовой моделью, т.е. расчетное состояние;

α_t - отклонение реального процесса деградации от расчетного;

ξ_t - поправка для учета влияния случайных факторов, т.е. отличия в состоянии различных участков, находящихся в одинаковых условиях.

При этом считается, что известна базовая модель прогнозирования, например, статическая регрессионная (сигмоидальная) модель, позволяющая вычислять расчетные значения показателя состояния в произвольные моменты времени. Также подразумевается, что случайная величина ξ_t подчиняется нормальному распределению с нулевым средним значением, т.е. отклонения с равной вероятностью возможны как в большую, так и в меньшую стороны. Величина α_t, иногда называемая структурным отклонением, характеризует отличие в измеренном (фактическом) значении от прогнозного значения в соответствии с базовой моделью. В соответствии с динамической моделью задача прогнозирования сначала формулируется как процедура нахождения отклонения ($\alpha_{t+\delta}$) в некоторый момент времени в будущем с помощью разложения этой величины в ряд Тейлора:

$$\alpha_{t+\delta}=\alpha_t+\alpha_t'\,\delta+\frac{\alpha_t''}{2!}\delta^2+\ldots+\frac{\alpha_t^{(N)}}{N!}\delta^N\ , \qquad (2)$$

где $\alpha_t'\ ,\alpha_t''\ldots\alpha_t^{(N)}$ - производные первого, второго… N –го порядка по времени.

Очевидно, что этот ряд является частным случаем общего степенного ряда:

$$\alpha_{t+\delta}=c_0+c_1\,\delta+c_2\,\delta^2+c_3\,\delta^3+\ldots+c_N\,\delta^N\ , \qquad (3)$$

где $c_n=\frac{\alpha_t^{(n)}}{n!}$.

Смысл использования ряда Тейлора в данном случае состоит в том, что первое слагаемое (2) описывает состояние системы, точнее, отклонение от прогноза по базовой модели, в начальный момент времени, второе – скорость изменения соответствующей величины (например, скорость накопления повреждений), а третье слагаемое – скорость изменения второго параметра (например, прирост скорости накопления повреждений). В случае функций, заданных аналитически, разложение (2) позволяет определить значение функции в некоторой окрестности δ заданной точки t, то есть, для $t+\delta$, по значениям самой функции и ее производных в этой точке.

Введем понятие вектора отклонений, элементами которого являются значения функции, описывающей отклонение состояния дорожной конструкции от результата, определяемого базовой моделью, и ее производных в данный момент времени. Тогда модель поведения такой системы, т.е. вектор отклонений в момент $t+\delta$ (в рамках приближения второго порядка), может быть выражен через значение вектора отклонений в момент t с помощью набора соотношений:

$$\begin{aligned} &\alpha_{t+\delta} = \alpha_t + \alpha'_t\,\delta + \frac{\alpha''_t}{2!}\delta^2; \\ &\alpha'_{t+\delta} = \alpha'_t + \alpha''_t\,\delta; \\ &\alpha''_{t+\delta} = \alpha''_t. \end{aligned} \tag{4}$$

Эти соотношения могут быть записаны в более компактной форме:

$$\alpha_{t+\delta} = \mathbf{A}\cdot\alpha_t, \tag{5}$$

$$\text{где}\quad \alpha_{t+\delta} = \begin{vmatrix} \alpha_{t+\delta} \\ \alpha'_{t+\delta} \\ \alpha''_{t+\delta} \end{vmatrix}; \qquad \alpha_t = \begin{vmatrix} \alpha_t \\ \alpha'_t \\ \alpha''_t \end{vmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{vmatrix} 1 & \delta & \dfrac{\delta^2}{2!} \\ 0 & 1 & \delta \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \tag{6}$$

Если предположить, что и производные в (4) также подвергаются случайным флуктуациям (отклонениям) и ввести вектор соответствующих поправок γ, то соотношение для прогнозирования (5) можно записать как:

$$\begin{vmatrix} \alpha_{t+\delta} \\ \alpha'_{t+\delta} \\ \alpha''_{t+\delta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \delta & \dfrac{\delta^2}{2!} \\ 0 & 1 & \delta \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_t \\ \alpha'_t \\ \alpha''_t \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \gamma_t \\ \gamma'_t \\ \gamma''_t \end{vmatrix}, \quad \alpha_{t+\delta} = \mathbf{A}\cdot\alpha_t + \gamma_t \ . \tag{7}$$

Таким образом, для построения прогноза состояния конструкции в момент времени $t+\delta$ необходимо вычислить структурное отклонение α_t в настоящий момент. Затем полученные результаты нужно подставить в (7) для получения $\alpha_{t+\delta}$.

Следующий этап – получение соотношений, связывающих наблюдаемые (экспериментально регистрируемые) величины с ключевыми параметрами модели (например, PCI или модулем упругости дорожной одежды). В результатах измерений всегда присутствуют случайные погрешности. Кроме того, в некоторых случаях измерить непосредственно интересующую величину, например, прочность конструкции, не удается. В таком случае используют косвенные измерения, то есть сначала производят измерение одной величины (например, толщины слоев дорожной одежды, количественных оценок их состояния), а затем путем применения к ней определенного набора правил (операций) получают оценку требуемого параметра (модуль упругости дорожной одежды). В соответствии с принятой в математике системой обозначений далее будем обозначать совокупность таких действий соответствующим оператором, например $\hat{L}$. Тогда процедура измерения текущего состояния системы может быть в общем виде записана:

$$\hat{L}\,P_t = P_{мод,t} + \alpha_t + \rho_t, \tag{8}$$

где ρ_t - поправка для учета всех случайных составляющих, в том числе и погрешностей результатов измерений;

$\hat{L}\,P_t$ - результат применения операций измерения и обработки к соответствующим величинам, например измерению упругого прогиба для вычисления модуля конструкции.

Многие методы прикладной математики, называемые итерационными, основаны на поэтапной корректировке некоторого начального приближения к искомому решению. В данном случае роль такого начального приближения играет расчетное состояние $P_{мод,t}$. Поэтому удобно переписать (8) в виде:

$$\hat{L}\,P_t - P_{мод,t} = \alpha_t + \rho_t \quad . \tag{9}$$

В левой части последнего соотношения стоит отклонение фактических значений от расчетных (согласно базовой модели). В случае абсолютно точной базовой модели и отсутствия погрешностей измерений левая часть будет равна нулю. В реальности же она всегда будет отлична от нуля, но чем меньше отличия, тем точнее базовая модель. Следовательно, при корректировке модели необходимо добиваться минимизации этих отличий. Поэтому введем понятие целевой функции ψ_t, которую требуется минимизировать и определим ее как:

$$\psi_t = \hat{L}\, P_t - P_{мод,t} \; = \alpha_t + \rho_t. \tag{10}$$

Это означает, что в рамках динамической адаптивной модели на каждом предшествующем этапе производится корректировка начального приближения для более точного определения прогнозных значений. В результате получаем новое начальное приближение - $P^{н}_{мод,t}$, которое используется на следующем этапе.

Наконец, последний этап заключается в нахождении количественных оценок на основе имеющегося набора данных и повторении корректировки (10) для использования на последующих шагах. Нахождение оценки можно записать в следующем виде:

$$P_{мод,t+\delta} = P^{н}_{мод,t} + \sum_{j=1}^{2} \frac{\delta^{j}}{j!} \alpha_t^{(j)} + \rho_t \,. \tag{11}$$

Согласно динамической адаптивной модели, прогнозирование на уровне участков дорог выполняется с учетом дополнительного набора данных, полученного по результатам обследований за предшествующие периоды. Получение прогнозных оценок вектор-функции состояния участков дорог, согласно предложенной модели, заключается в построении адаптивной динамической модели деградации дорожной одежды и последующем расчете вектор-функции состояния дорожной одежды.

Расчет производится в следующей последовательности:

а) по результатам обследований за предшествующие периоды определяются значения показателя, характеризующего состояние дорожной одежды (индекс состояния, модуль упругости конструкции) в моменты времени t_1, t_2, t_3 (за три года);

б) определяются коэффициенты базовой динамической модели, представленной степенным рядом, (например, методом Гаусса):

$$E_t = c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2, \tag{12}$$

где c_0, c_1, c_2 - коэффициенты базовой динамической модели;

в) рассчитывается значение зависимой переменной ($E_{t+\delta}$) модели в момент времени $t+\delta$;

г) определяется структурное отклонение (α_t) между значением зависимой переменной модели ($E_{t+\delta}$) и фактическим состоянием конструкции в момент времени $t+\delta$ (δ по умолчанию – один год);

д) принимаются три значения показателя, характеризующего состояние конструкции за три года t_2, t_3, t_4. Вычисления п. б) - г) повторяются. Результатом вычислений является набор значений структурных отклонений, достаточный для построения функции структурных отклонений. В рамках предлагаемой модели - три значения, поскольку функция структурных отклонений представляется в виде степенного ряда, допускающего дифференцирование (минимум дважды);

е) определяются коэффициенты функции структурных отклонений: $\alpha_t = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2$ (a_0, a_1, a_2 - коэффициенты функции структурных отклонений);

ж) рассчитывается структурное отклонение, адаптирующее базовую динамическую модель к результатам измерений: $\alpha_{t+\delta} = \sum_{j=1}^{N} \frac{\alpha_t^{(j)}}{j!} \delta^j$;

з) результатом вычислений является построение базовой адаптивной модели, позволяющей прогнозировать состояние конструкции в момент времени $t+\delta$:

$$\theta_{1,t+\delta} = \hat{L}_\theta \, \theta_{1,t} = \theta_{in,1,t} + \sum_{j=1}^{2} \frac{\alpha_t^{(j)}}{j!} \delta^j + \zeta_{1,t} \,. \tag{13}$$

Проиллюстрируем алгоритм получения прогнозных оценок состояния дорожной одежды на примере различных секций участка дороги, где было выполнено обследование. Обследованы три секции автомобильной дороги. Состояние секции км 416+300 достаточно хорошо соответствует базовой статической модели (расчетному сроку службы) и для прогнозирования ее деградации можно применить базовую модель с незначительной корректировкой. На второй и третьей секциях (секции км 396+700 и км 403+000 соответственно) имеются значительные отклонения (ухудшение состояния), следовательно, применение к ним базовой модели не дает правильного результата.

В таком случае необходимо откорректировать саму базовую модель. Рассмотрим схему получения оценок для секции км 403+000 (рис. 1). Сплошной линией обозначен ход процесса деградации, соответствующий базовой модели:

$$E = E_0 - k_1 \cdot exp\left(-k_2 \cdot k_3^t\right), \qquad (14)$$

где E, E_0 - соответственно текущее и начальное значения модуля упругости, МПа;

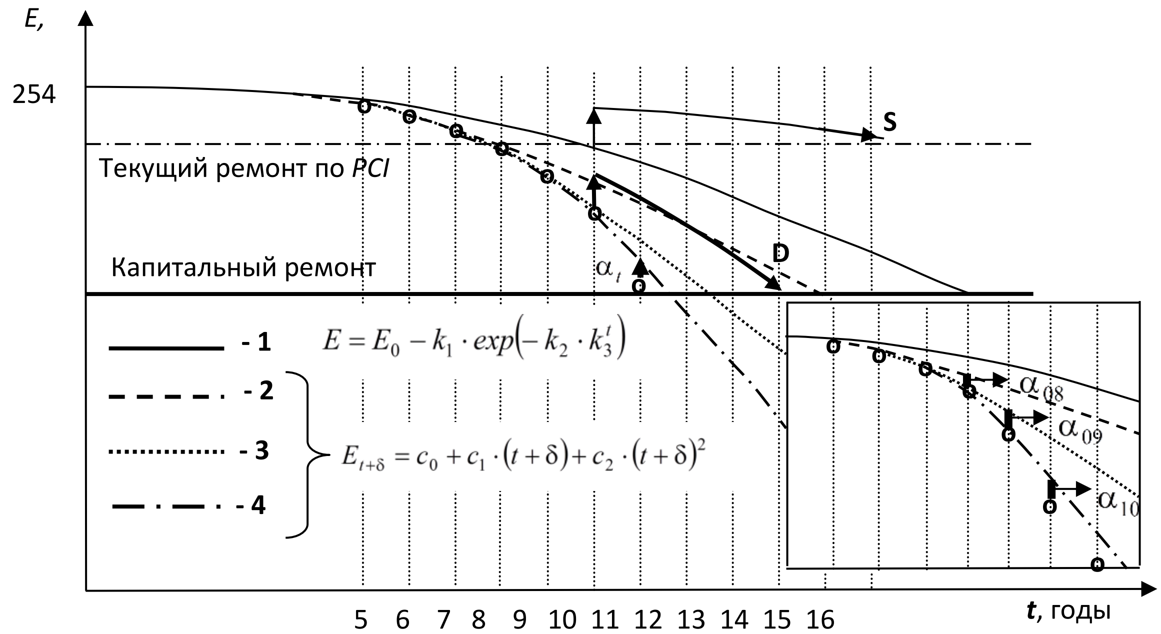
k_1, k_2, k_3 - постоянные коэффициенты модели.

Фактическое состояние конструкции (с 2005 г. по 2011 г.) в соответствии с результатами обследований отмечено символами «**0**». Предположим, что изначально известны результаты обследований для периода: 2005 - 2010 годы и требуется сделать прогноз на 2011 год. В таком случае алгоритм прогнозирования на первом этапе заключается построении оценочной кривой в соответствии с моделью (13) на основании данных 2005 – 2007 г.г. Принимаются минимум три значения, поскольку процедура построения оценочной кривой (т.е. по сути базовой динамической модели) в рамках первого этапа заключается в построении параболы, проходящей через три заданные точки. На данном этапе предполагается, что поправка $\zeta_{1,t} = 0$, поскольку прогнозируется состояние одного участка, на котором проводились измерения с достаточной точностью. Результатом расчета является функция, представленная в виде степенного ряда (12) (кривая «2», рис. 1).

Рассчитывается структурное отклонение $\alpha_t = \alpha_{08}$, характеризующее отклонение реального процесса деградации от модельного, как разность между фактическим состоянием конструкции (в 2008 г.) и прогнозируемым согласно первому приближению динамической модели. Операции расчета оценочной кривой и структурного отклонения повторяются для набора данных обследований за период 2006 – 2008 годы. Результатом расчета является модель вида (12), имеющая новый набор коэффициентов (кривая «3», рис. 1).

Таким образом, на этом этапе осуществляется <u>обновление модели, что придает ей динамический характер</u>.

Далее в рамках предлагаемой модели необходимо аналогичным образом обработать информацию о других участках данной группы и получить вид поправочного члена $\zeta_{1,t}$, который представляет собой функцию распределения состояния участков, т.е. разброс их параметров.



1- базовая статическая модель; 2 – модель по данным 2005-2007 гг.; 3 – модель по данным 2006-2008 гг.; 4 – модель по данным 2009-2010 гг. – конечная базовая модель

Рисунок 1 – Прогнозирование состояния секции км 403+000 с помощью адаптивной динамической модели

Для корректного получения вида этой функции можно воспользоваться принципом случайной выборки большого числа участков для обследования и дальнейшей статистической обработки результатов. Однако, в рамках ограниченного финансирования более эффективен предлагаемый <u>подход использования репрезентативной выборки участков</u>.

Суть этого подхода в отборе двух групп из относительно небольшого числа участков, типичных для данной сети и проведении на них георадарного обследования с последующей обработкой результатов. Обработка заключается в получении распределений (функций $\zeta_{1,t}$) сначала для каждой группы в отдельности и затем для всех отобранных участков. Если полученные распределения совпадают, то результаты можно использовать на следующих этапах – прогнозирования на сетевом уровне. Если же имеются значительные отличия, следует провести детальный анализ причин, и в соответствии с его результатами изменить схему отбора участков, либо применить иной принцип разбиения на группы.

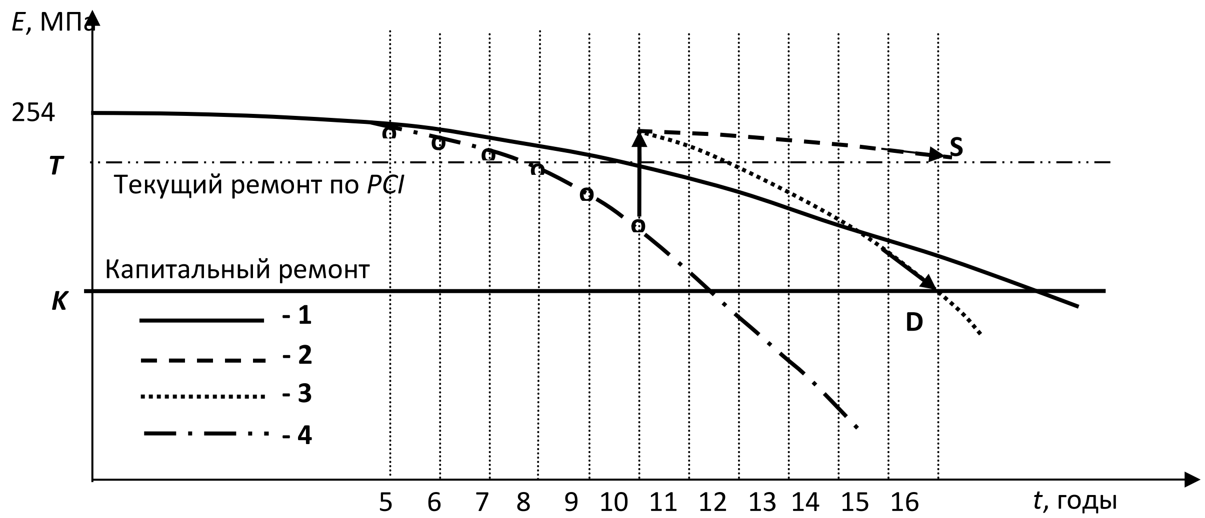
Для демонстрации других аспектов эффективности динамических адаптивных моделей рассмотрим два варианта ремонтной стратегии на участке км 403+00: планирование мероприятий в случае отсутствия результатов обследования (рис. 1); планирование мероприятий по результатам оценки *PCI*, либо измерения упругого прогиба как основной характеристики конструкции дорожной одежды (рис. 2).

В случае отсутствия результатов обследования (рис. 1) согласно статической модели (*S*) данная секция в 2010 году требует текущего ремонта и до 2016 года не будет требовать затрат на ремонт. В соответствии с динамической адаптивной моделью (*D*) данная секция после проведения работ по текущему ремонту уже в 2014 году потребует капитального ремонта, и общий объем ресурсов на восстановление дорожной одежды будет равен:

$$Z_D = Z_K + Z_T + \Pi_n, \tag{15}$$

где Z_D, Z_K, Z_T – суммарные затраты, затраты на текущий и капитальный ремонты соответственно;

Π_n – потери от роста себестоимости перевозок за данный период (2010 – 2014 годы).



1– базовая статическая модель; 2 – процесс деградации на основе статической модели; 3 – процесс деградации на основе адаптивной динамической модели; 4 – процесс деградации без назначения мероприятий

Рисунок 2 – Эволюция состояния секции км 403+000 после ремонтных мероприятий: на основе статической и адаптивной динамической моделей

Проведение обследования на данном участке (км 403+00) с измерением упругого прогиба не позволяет судить о причинах, вызвавших изменения в ходе процесса деградации. Предположим, что в данном случае на основании нормативных документов [4] была назначена укладка слоя усиления без учета анализа причин (влажности грунта основания) отклонения показателей состояния конструкции от нормативных значений.

В таком случае в соответствии со статической моделью (рис. 2, кривая 2) процесс деградации приведет к тому, что в 2016 году конструкция вновь потребует текущего ремонта. В то же время, учет динамической модели (рис. 2, кривая 3) указывает, что в 16 году конструкция будет требовать не текущего, а капитального ремонта с соответствующими затратами. Кривая 4 (рис. 2) показывает ход процесса деградации без ремонтных мероприятий.

Следовательно, наибольшей эффективностью обладает назначение ремонтных мероприятий и прогнозирование деградации дорожных одежд на основе комплексных наборов данных (опирающихся на результаты георадарных обследований).

Таким образом, применение динамических адаптивных моделей для решения задач прогнозирования состояния дорожных одежд на уровне отдельных участков позволяет (в совокупности с результатами обработки георадарных данных) на качественно ином уровне решать задачи оптимизации и планирования ремонтных мероприятий.

Литература

1. Madanat S. Estimation of Infrastructure Distress Initiation and Progression Models / S. Madanat, S. Bulusu, A. Mahmoud // Journal of Infrastructure Systems – 1(3). – 1995.– PP.146-150.
2. Madanat S. Effect of Performance Model Accuracy on Optimal Pavement Design / S. Madanat, J.A. Prozzi, M. Han // Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering – 17(1). – 2002. – PP. 22-30.
3. West M. Bayesian Forecasting and Dynamic Models: (2nd Edition) / M. West, P.J. Harrison. – New York : Spring-Verlag, 1997. – 680 p.
4. Технічні правила ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування України: П-Г.1-218-113:2009 – Офіц. вид. К.: Укравтодор, 2007. – 33 с. – (Нормативний документ Укравтодора. Правила).