



ANGELIKA G. BATRAKOVA¹⁾
DMITRY O. BATRAKOV²⁾
MARIYA S. ANTYUFEYEVA³⁾

PAVEMENT DETERIORATION MODEL BASED ON GPR DATASETS

MODEL DEGRADACJI NAWIERZCHNI NA PODSTAWIE DANYCH UZYSKANYCH Z BADAŃ METODĄ GPR

STRESZCZENIE. Artykuł dotyczy monitorowania bieżącego stanu nawierzchni drogowych podatnych z wykorzystaniem metody badania georadarem GPR. Metodologia użycia technologii GPR polega na zdalnych pomiarach grubości i przepuszczalności warstw strukturalnych nawierzchni. Po wstępnym przetworzeniu dane uzyskane metodą GPR są interpretowane za pomocą opracowanych algorytmów i oprogramowania. Następnie wykorzystuje się je do budowy modeli degradacji stanu nawierzchni odcinka drogi. Aby rozwiązać problem prognozowania stanu poszczególnych lokalnych odcinków nawierzchni, zaproponowano dynamiczne modele adaptacyjne. Aparat matematyczny dynamicznego modelu adaptacyjnego degradacji nawierzchni oparto nie tylko na zliczaniu wartości zmiennych objaśniających w stałych przedziałach czasowych, ale także na tempie i charakterze zmian tych zmiennych. Przeprowadzona została analiza porównawcza, w której na przykładzie odcinków dróg z regionu Charkowa na Ukrainie przedstawiono działanie proponowanych modeli.

SŁOWA KLUCZOWE: dynamiczny model adaptacyjny, metoda GPR badania nawierzchni, nawierzchnie podatne, wskaźnik stanu nawierzchni.

ABSTRACT. The paper deals with monitoring the current condition of flexible road pavement involving GPR technology. The methodology of using GPR is formed on remote measurements of thickness and permeability of pavement structural layers. After primary processing of GPR data they are interpreted by means of the developed algorithms and software. Then these data are used to build models of road section deterioration. Dynamic adaptive models are proposed in order to solve the problem of predicting the condition of individual local pavement segments. The mathematical apparatus of dynamic adaptive model of pavement deterioration was based not only on accounting the values of the explanatory variables at fixed times, but also on the rate and character of change of these variables. A comparative analysis carried out and the performance of the proposed models on the example of road sections of the Kharkiv region of Ukraine is shown.

KEYWORDS: dynamic adaptive model, flexible road pavements, GPR pavement testing method, pavement condition index.

DOI: 10.7409/rabdim.018.004

¹⁾ Kharkiv National Automobile and Highway University, Road Construction Faculty, Chair of road survey and design, 25 Yaroslav Mudryi Str., Kharkiv, Ukraine, 61002; Batrakova@khadi.kharkov.ua

²⁾ V.N. Karazin Kharkiv National University, Radiophysics Biomedical Electronics and Computer Systems Faculty, Chair of Theoretical Radiophysics, 4 Svobody Sq., Kharkiv, Ukraine, 61022; Batrakov@karazin.ua (✉)

³⁾ V.N. Karazin Kharkiv National University, Radiophysics Biomedical Electronics and Computer Systems Faculty, Chair of Theoretical Radiophysics; Antyufeyeva@karazin.ua

1. WPROWADZENIE

Modelowanie degradacji nawierzchni oraz efektów jej konserwacji stanowi problem o dużym znaczeniu dla inżynierii drogowej i mostowej. Istnieją dwie ogólne klasy modeli służące do modelowania degradacji nawierzchni i efektów jej konserwacji: modele mechanistyczne i empiryczne [1]. Modele empiryczne zwykle opierają się na analizach danych statystycznych dotyczących obserwowanych trendów degradacji. Natomiast modele mechanistyczne wykorzystują fundamentalne teorie zachowania nawierzchni. Analizy empiryczne często prowadzą do wzorów, które są ograniczone i nie mogą być stosowane poza określonymi warunkami, na podstawie których są uzyskiwane. Natomiast modele mechanistyczne mają silne podstawy teoretyczne, ale zwykle wymagają dużej liczby danych i opierają się na zestawie parametrów, które trudno jest określić ilościowo w terenie. Paterson wprowadził w roku 1987 usystematyzowane podejście empiryczne do opracowania modelu HDM-III RDME polegające na „mechanistycznych koncepcjach właściwości materiałów i zachowania w warunkach obciążenia ruchem i czynnikami klimatycznymi oraz na wynikach badań eksperymentalnych” [2]. Sukces tego podejścia wynika z elastyczności otrzymanych modeli.

Ponadto, udane zastosowanie usystematyzowanego podejścia empirycznego do prognozowania degradacji nawierzchni analizowane było później w wielu krajach [3]. W celu dalszej poprawy projektowania i konserwacji nawierzchni, zaproponowano różne dynamiczne, probabilistyczne i adaptacyjne podejścia do modelowania funkcjonowania nawierzchni drogowej oraz jej degradacji [4-6]. Jednak, jak wykazują autorzy, niekiedy degradacje niektórych odcinków tych samych dróg nie mogą być odpowiednio opisane za pomocą jednego ogólnego modelu [7]. Problemem jest nie tylko identyfikacja przyczyn takich degradacji, ale także opracowanie użytecznych modeli dla takich obszarów. W tym przypadku, kluczową cechą sukcesu modelowania dynamicznego jest kompletność zbioru danych a także szybka możliwość uzyskania wiarygodnych danych. Najodpowiedniejszym narzędziem do nieniszczących badań i skutecznego pozyskiwania zestawów danych do oceny stanu nawierzchni jest obecnie georadar (GPR) [8-12]. Może być on stosowany nie tylko do oceny grubości warstwy nawierzchni drogowej [11], ale także do oceny nowej gęstości nawierzchni [13], wykrywania i określania położenia pęknięć podpowierzchniowych [14] oraz do określania szerokości pęknięcia w jednej z warstw nawierzchni wykorzystując wyniki próbkowania sygnałów impulsowych ultraszerokopasmowego GPR (UWB) [15]. W związku z tym, ważnym problemem jest poprawa dynamicznego modelowania degradacji nawierzchni

1. INTRODUCTION

Modelling pavement deterioration and maintenance effects is a problem of considerable importance in the road and bridge engineering. There are two general classes of models for modelling pavement deterioration and maintenance effects: mechanistic and empirical [1] ones. Empirical models usually rely on statistical data analysis of observed deterioration trends. Besides, mechanistic models use fundamental theories of pavement behaviour for their modelling. Empirical analysis often lead to limited formulae and cannot be applied outside of the specific conditions upon which they are obtained. Then mechanistic models have a strong theoretical basis, but they are usually demanding high numbers of data and rely on set of parameters which are difficult to quantify in the field. In 1987 Paterson introduced a structured empirical approach for developing the HDM-III RDME model. It relies on “mechanistic concepts of material properties and behavior under traffic load and climatic factors, and the results of experimental research” [2]. This approach success stems from the flexibility of the resulting models.

Also successful application of the structured empirical approach in predicting pavement deterioration in a wide range of countries was analyzed later [3]. Probabilistic and adaptive approaches to modelling road pavement performance and deterioration were proposed [4-6] to further improve sustainability in pavement design and maintenance. However, as shown by the authors, sometimes degradation observations of some segments of the same roads can not be adequately described by one general model [7]. Hereby a problem is not only to identify the causes of such behavior, but also to develop service models for such areas. A key feature of success of dynamic modeling in this case is the completeness of dataset and ability to obtain quickly reliable data. The most suitable tool for non-destructive testing and efficient acquisition of datasets for pavement condition assessment is now ground penetrating radars (GPR) [8-12]. GPR can be used not only for evaluation of road pavement layer thickness [11], but also for evaluating of the new pavement density [13], detection and determination of location of subsurface cracks [14], and determination of the crack width in one of the pavement layers using results of GPR ultra wideband (UWB) impulse signals probing [15]. Thereby the important problem is to improve dynamic modelling of pavement deterioration and maintenance effects with respect to result of pavement monitoring by GPR and corresponding data processing procedures. Resulting models will become not only dynamic but also adaptive ones.

i efektów jej konserwacji w odniesieniu do odpowiednich procedur przetwarzania danych oraz wyniku monitorowania nawierzchni przez GPR. Powstałe modele staną się nie tylko dynamiczne, ale także adaptacyjne.

Celem pracy jest opracowanie dynamicznego modelu adaptacyjnego do prognozowania degradacji odcinków nawierzchni drogowych, opartego na zestawach danych GPR.

2. OPIS PROBLEMU

Podczas oceny stanu nawierzchni odcinków drogowych, autorzy zarejestrowali sporadyczną obecność krótkich odcinków (długość do 1 km), które ulegały degradacji szybciej niż pozostałe (długość do 100 km). Takie odcinki nie miały wspólnych parametrów dotyczących ogólnych warunków. Znajdowały się w dolinie lub na wzgórzu, na poziomych zakrętach (widok z góry) lub na prostych odcinkach itp. Powstał więc problem użycia wartości ilościowych i technicznego sprzętu diagnostycznego umożliwiającego prawidłowe przewidywanie zmian stanu odcinka. Aby rozwiązać ten problem, przyjrzyjmy się przede wszystkim istniejącym modelom prognostycznym i używanym przez nie parametrom.

Wskaźnik stanu nawierzchni (PCI) jest zwykle głównym parametrem w najprostszych modelach regresji statycznej, natomiast proces degradacji nawierzchni opisany jest przez jednowartościowe wartości obliczone na podstawie danych dotyczących wcześniejszych warunków nawierzchni. W modelach stochastycznych przewiduje się prawdopodobieństwo, że struktura nawierzchni znajdzie się w określonym stanie w określonym czasie. Model zachowania się jakichkolwiek wskaźników stanu (PCI, PSI) jest najczęściej stosowany jako model wstępny [16, 17]. Ich wartości przewidywane są przy użyciu tzw. modelu sigmoidalnego (w kształcie litery S) [18, 19]:

$$P = P_0 - e^{(k_1 - k_2 \cdot k_3^t)}, \quad (1)$$

gdzie:

P – wskaźnik stanu (PSI lub PCI),

P_0 – wartością początkową P ,

k_1, k_2, k_3 – stałe współczynniki określające kształt krzywej (zachowanie modelu),

$t = \ln(1/A)$,

A – aktualny czas eksploatacji w latach.

Ponieważ proces degradacji nawierzchni jest wynikiem skutków działania wielu losowych czynników, zakłada się lub domniemywa, że ta zależność pokazuje tylko najbardziej prawdopodobny stan odcinka w zależności od czasu eksploatacji

Accordingly, the aim of this work is to develop a dynamic adaptive model based on the sets of GPR data for predicting the deterioration of the road pavement segments.

2. PROBLEM STATEMENT

During assessment of the pavement condition of the road sections Authors registered occasional presence of short distance segments (length of up to 1 km) that deteriorated faster than the rest of the corresponding section (length of up to 100 km). Such sections did not have common condition parameters. They could be in a valley or on a hill, on the horizontal curves (plan view) or on the straight sections, etc. This led to the problem of engaging quantitative values and technical diagnostic equipment allowing correct prediction of changes of the segment condition. To solve this problem, first of all, let us examine existing forecasting models and parameters used by them.

Pavement Condition Index (PCI) is usually the main parameter in the simplest static regression models, whereas the deterioration process of the pavement is described by its single-valued values calculated on the basis of the previous pavement condition data. Within the stochastic models the probability that the pavement structure will be in a certain condition at the certain time moment is predicted. The model of any of condition indexes (PCI, PSI) behavior is mostly used as an initial model [16, 17]. Their values are predicted using the so-called sigmoidal (S-shaped) model [18, 19]:

$$P = P_0 - e^{(k_1 - k_2 \cdot k_3^t)}, \quad (1)$$

where:

P – the condition index (PSI or PCI),

P_0 – initial value of P ,

k_1, k_2, k_3 – the constant coefficients determining the curve shape (the behavior of the model),

$t = \ln(1/A)$,

A – the current operating time in years.

Since pavement deterioration process is the result of the combined effects of many random factors, it is explicitly or implicitly assumed that this relationship shows only the most probable section condition, depending on the road life time. Surveys, carried out by the authors on various road sections have shown that actual recorded indices for the majority of segments are distributed in a region (region 1, Fig. 1) in proximity to the regression curve (1). At the same time there is a part of the segments where deterioration begins earlier than predicted by this model, and faster

drogi. Badania przeprowadzone przez autorów na różnych odcinkach dróg wykazały, że rzeczywiste zarejestrowane wskaźniki dla większości odcinków rozmieszczone są w obszarze 1 (obszar 1, Rys. 1) w pobliżu krzywej regresji (1). Jednocześnie występują odcinki, gdzie niszczenie zaczyna się wcześniej niż przewidywano w tym modelu i tam obserwuje się szybszą degradację nawierzchni (obszar 2, Rys. 1). W przypadku tych odcinków konieczna jest korekta pierwotnego modelu. Tak więc pierwotny model będzie nazywany elastycznym modelem prognozowania zachowania nawierzchni, a model dotyczący „problematic” odcinków będzie określany jako model degradacji nawierzchni.

Doświadczenie w zarządzaniu drogami pokazuje, że gdy nie jest możliwe zidentyfikowanie lub uwzględnienie wszystkich mechanizmów określających przebieg degradacji konstrukcji, nie jest również możliwe opracowanie dokładnego analitycznego modelu degradacji struktury nawierzchni. Obecność niepewności zasadniczo związanej z funkcjonowaniem nawierzchni drogowej jest podstawową przyczyną wszystkich trudności związanych z budową czysto mechanicznego modelu dla dokładnego opisu ewolucji stanu nawierzchni. W związku z tym, najbardziej odpowiednie jest zastosowanie dynamicznych adaptacyjnych modeli prognozowania do symulacji procesu degradacji nawierzchni.

Z drugiej strony, model prognozowania należy uzupełnić o parametry pokazujące aktualny stan nawierzchni (charakterystyki geometryczne, fizyczne i mechaniczne, wskaźniki heterogeniczności strukturalnej) w celu poprawy dokładności prognostycznej oceny warunków nawierzchni. Te parametry powinny określać wzorce zmiany stanu w czasie. Najskuteczniejszym sposobem uzyskania wartości liczbowych tych parametrów jest użycie GPR [8-11]. W szczególności GPR „Odyag” wraz z oprogramowaniem „GeoVizy” pozwala nie tylko rozwiązać problem określenia grubości warstw nawierzchni [11, 20], ale także ocenić parametry elektryczne materiałów warstwowych [11]. W tym przypadku, kluczową cechą korzystania z GPR jest możliwość odbierania danych w trybie mobilnego laboratorium. Ponadto dane te można przekształcić w właściwości mechaniczne materiałów, na przykład gęstość i wilgotność [7-9, 21]. Wspecjalizowane anteny [14-15, 22-23] GPR „Odyag” wraz z oprogramowaniem „GeoVizy” i wcześniej proponowanymi metodami [24-28] pozwalają uzyskać informacje o obecności i charakterystyce pęknięć podpowierzchniowych oraz innych nieprawidłowościach. W oparciu o uzyskane przetwarzanie informacji, zaproponowano następujący model szacowania i prognozowania stanu nawierzchni (Rys. 2).

Pierwszą cechą tego modelu jest uwzględnienie bardziej kompletnego zestawu danych dotyczących parametrów

degradacji nawierzchni (region 2, Fig. 1). Correction of original model is necessary for these segments. So the original model will be called flexible pavement performance prediction model, the model concerning the “problematic” segments will be referred to as pavement deterioration model.

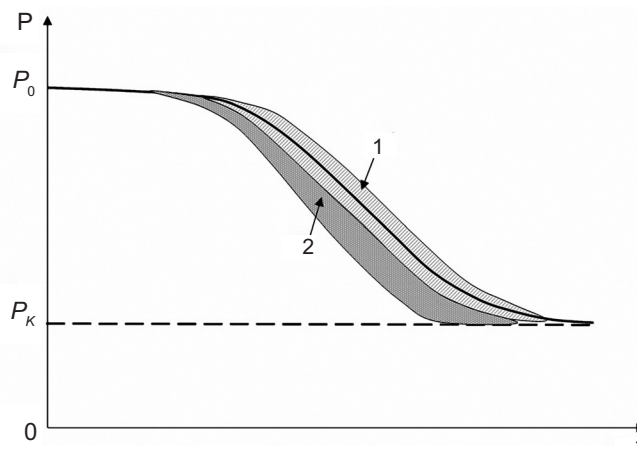


Fig. 1. Graphic presentation of the static regression model:
 1 - area of actual values of pavement condition index for the majority of segments,
 2 - area of deviation of the real deterioration from the model
 Rys. 1. Graficzna prezentacja modelu regresji statycznej:
 1 - obszar rzeczywistych wartości wskaźnika stanu nawierzchni dla większości odcinków,
 2 - obszar odchylenia rzeczywistej degradacji od modelowej

Road management experience shows that when it is not possible to identify or take into account all the mechanisms, determining the course of construction deterioration, development of the accurate analytical model of pavement structure deterioration is not possible. The presence of uncertainty fundamentally inherent to the operation of road pavement is the root cause of all difficulties of building a purely mechanistic model for the exact description of the evolution of their condition. Therefore, the use of dynamic adaptive prediction models to simulate the deterioration process of the pavement is the most appropriate.

On the other hand, prediction model should be supplemented with parameters showing the current condition of the pavement (geometrical, physical and mechanical characteristics, structural heterogeneity indices) to improve the accuracy of predictive assessments of pavement conditions. These parameters should determine patterns of the condition change with time. The most effective means of obtaining the numerical values of these parameters are GPR [8-11]. In particular, GPR “Odyag” together with software “GeoVizy” allow not only to solve the problem

warstw konstrukcji nawierzchni. W ujęciu matematycznym fakt ten pokazany jest w zależności:

$$F = f(d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_M | \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_i, \eta_N), \quad (2)$$

gdzie d_j są parametrami zewnętrznymi (wizualnie obserwowanymi lub instrumentalnie mierzonymi), η_i są parametrami wewnętrznymi (ukrytymi – określonymi na podstawie wyników diagnostyki GPR).

W modelu użyto jako zmienne zewnętrzne:

- parametry charakteryzujące płaskość oraz obecność i wielkość pęknięć, dziur i innych parametrów określających sprężyste właściwości konstrukcji nawierzchni jako całości, pomiary tych parametrów określają obowiązujące normy: ugięcia sprężystego l_{el} , wartości rzeczywistej równoważnego modułu sprężystości całej konstrukcji E_{act} oraz współczynnika kontyngencji przy dopuszczalnym ugięciu sprężystym K_E ,
- parametry niezbędne do obliczenia PCI .

Jako zmienne wewnętrzne, model wykorzystuje dane GPR oraz wyniki ich przetwarzania:

of pavement layers thickness determination [11, 20], but also to assess electrical parameters of layer materials [11]. A key feature of using GPR in this case is the ability to receive data in a laboratory motion mode. Further, these data can be converted into mechanical characteristics of materials, for instance, density and moisture content [7-9, 21]. Specialized antenna units [14-15, 22-23] of GPR “Odyag” together with software “GeoVizy” and earlier proposed methods [24-28] allow one to obtain information on the availability and characteristics of sub-surface cracks and other irregularities. Based on the obtained information processing the following model of estimation and prediction of the pavement condition is suggested (Fig. 2).

The first feature of this model is involvement of a more complete data set of the layer parameters of the pavement structure. Mathematically, this fact is shown in the correlation:

$$F = f(d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_M | \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_i, \eta_N), \quad (2)$$

where d_j are external (visually observed or measured instrumentally) parameters, η_i are internal (hidden – determined based on the results of GPR diagnostics) parameters.

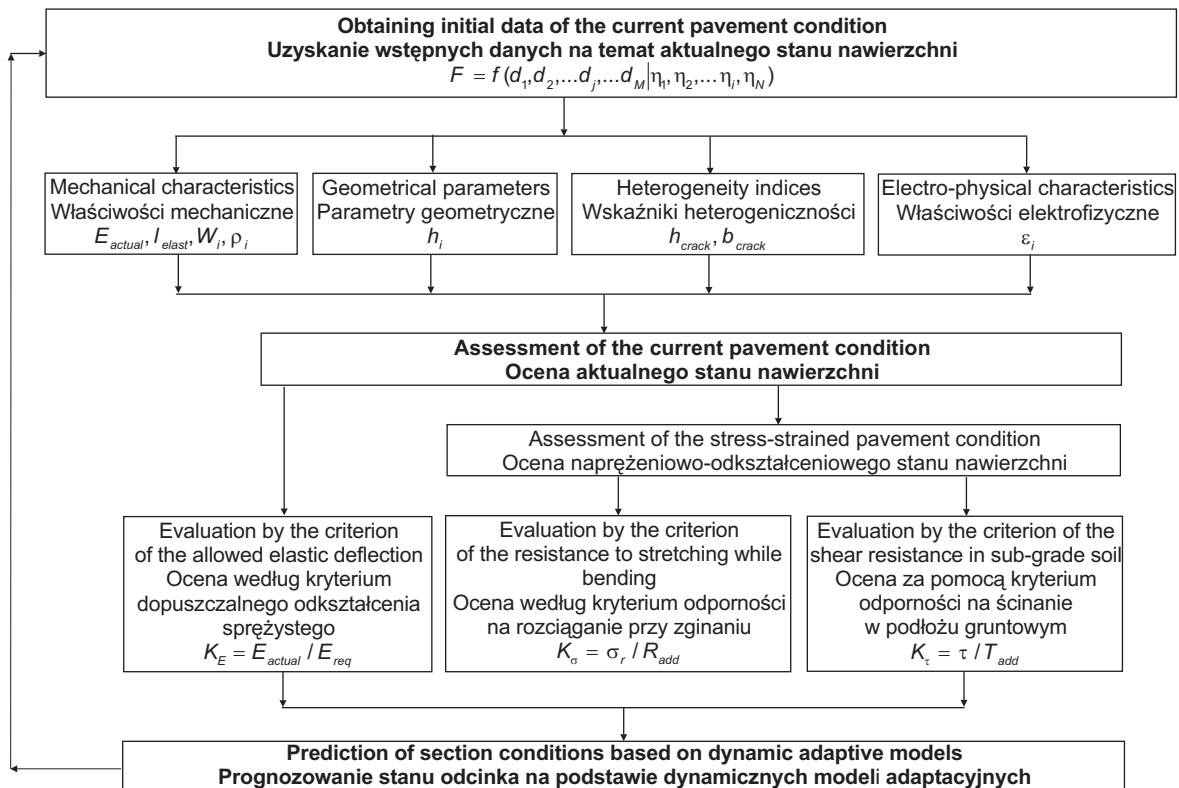


Fig. 2. Scheme of prediction model of pavement condition

Rys. 2. Schemat modelu prognozowania stanu nawierzchni

- podstawowe (elektryczne) parametry materiałowe warstw konstrukcyjnych nawierzchni tj. stała dielektryczna ε i opóźnienie sygnału, czyli czas transmisji sygnału przechodzącego przez warstwę i powracającego,
- parametry fizyczne i mechaniczne warstw konstrukcyjnych nawierzchni i podłoża gruntowego tzn. gęstość determinującą obecność stref dekompresyjnych ρ_i oraz wilgotność gruntu W_i ,
- parametry geometryczne warstw konstrukcyjnych nawierzchni (grubość warstw h_i),
- uzyskane przez przetwarzanie danych GPR i modelowanie numeryczne wartości naprężeń rozciągających w warstwach betonu asfaltowego $\sigma_{tensile}$, naprężenia ścinające τ_{shear} w podłożu gruntowym i niespoistych warstwach materiału, współczynnik zapewnienia wytrzymałości na rozciąganie w ugięciu w warstwach monolitycznych nawierzchni K_σ oraz współczynnik zapewnienia ścinania w podłożu gruntowym K_τ ,
- niejednorodność warstw strukturalnych nawierzchni, charakteryzująca się obecnością podpowierzchniowych defektów w postaci pęknięć o wysokości h_{crack} i szerokości b_{crack} w warstwach nawierzchni i wzmocnionych warstwach podłoża.

Dane te są wykorzystywane do oceny rzeczywistego stanu konstrukcji nawierzchni w okresie eksploatacji. Ocena obejmuje obliczenie stanu naprężeń i odkształceń konstrukcji nawierzchni. Dane wyjściowe do obliczeń są wewnętrznymi parametrami modelu (h_i , W_i , ρ_i , h_{crack} , b_{crack}).

Drugą cechą modelu jest zastosowanie adaptacyjnych modeli dynamicznych opartych na bardziej kompletnych zestawach danych do prognozowania stanu nawierzchni na poziomie lokalnych odcinków.

3. ROZWIĄZANIE PROBLEMU

3.1. MODEL PROGNOZOWANIA

Wszystkie modele wykorzystują kilka typów zmiennych - zależne, wyjaśniające i niezależne. Zmienne zależne modelu statycznego (np. indeks stanu) opierają się tylko na zmiennych objaśniających (np. module sprężystości). Czas jest zmienną niezależną. Głównym problemem jest znalezienie zależności między zmiennymi niezależnymi i objaśniającymi na podstawie dostępnych danych dotyczących historii systemu.

Przy tworzeniu opisu matematycznego dynamicznego modelu degradacji nawierzchni bierze się pod uwagę, że oprócz wartości zmiennych objaśniających w stałych (podstawowych) momentach czasowych, istotną rolę odgrywa tempo

The model uses the following external variables:

- parameters characterizing flatness, presence and size of the cracks, potholes and other parameters necessary for calculating the PCI,
- parameters determining elastic properties of the pavement structure as a whole, the measurement these parameters is stipulated by the applicable standards: elastic deflection l_{el} , actual value of the equivalent modulus of elasticity of the whole structure E_{act} , contingency factor on allowed elastic deflection K_E .

As internal variables the model uses GPR monitoring data and their processing results:

- primary (electrical) material parameters of the structural layers of the pavement: dielectric constant ε and signal delay, that is time of forward and backward signal transmission through the layer,
- physical and mechanical parameters of pavement structural layers and sub-grade soil: density, which determines the presence of decompression zones ρ_i ; soil moisture W_i ,
- geometric parameters of the pavement structural layers (thickness of the layers h_i),
- the values of tensile stresses in the asphalt concrete layers $\sigma_{tensile}$, shear stresses τ_{shear} in the sub-grade soil and non-cohesive material layers, and factor of assurance of tensile strength in deflection in pavement monolithic layers K_σ , factor of assurance of shear in the sub-grade soil K_τ obtained by processing GPR data and numerical modelling,
- heterogeneity of pavement structural layers, characterized by the presence of subsurface defects in the pavement layers and base strengthened layers in the form of cracks with height h_{crack} and width b_{crack} .

These data are used for assessment of the actual condition of the pavement structure during the life time. Assessment includes calculation of stress and strain state of the pavement structure. Initial data for calculations are the internal parameters of the model (h_i , W_i , ρ_i , h_{crack} , b_{crack}).

The second feature of the model is the application of adaptive dynamic models based on more complete data sets for the prediction of pavement condition at a local segments level.

3. PROBLEM SOLUTION

3.1. PREDICTION MODEL

All models use several types of variables - dependent, explanatory and independent ones. The dependent variables

zmian tych zmiennych. Dlatego używamy podejścia proponowanego w artykułach [5, 29] i wartości aktualnej charakteryzującej warunki nawierzchni (np. *PCI*) w następującej formie:

$$P_{real,t} = P_{aux,t} + \chi_t + \delta_t \quad (3)$$

gdzie $P_{real,t}$ jest rzeczywistym (zarejestrowanym) stanem nawierzchni w danym momencie t , $P_{aux,t}$ jest stanem nawierzchni według modelu podstawowego tj. obliczonym ze stanem z modelu podstawowego, χ_t jest odchyleniem rzeczywistego procesu degradacji od obliczonego procesu degradacji, δ_t to korekta uwzględniająca wpływ czynników losowych tj. różnice w stanach różnych odcinków znajdujących się w identycznych warunkach. Zakłada się, że znany jest podstawowy model prognostyczny, np. model regresji statycznej (sigmoidalnej), który pozwala obliczyć szacunkową wartość wskaźnika stanu w dowolnym momencie czasowym. Przyjmuje się również, że zmienna losowa zachowuje rozkład normalny z zerową wartością średnią, tzn. odchylenia są możliwe zarówno w kierunku wyższych jak i niższych wartości.

Zmienna χ_t , zwana odchyleniem strukturalnym, charakteryzuje różnicę w zmierzonej (rzeczywistej) wartości przewidywanych wartości zgodnie z modelem podstawowym. Jednak badania autorów pokazują, że zastosowanie modelu sigmoidalnego do opisanego procesu degradacji struktury nawierzchni jest w wielu przypadkach nieefektywne. W przypadku odcinków dróg, w których warunki eksploatacyjne różnią się od warunków projektowanych, najlepsze wyniki zapewnia korekta modelu podstawowego na podstawie interpolacji parabolicznej połączonej z komponentem adaptacyjnym.

Rozważmy zatem postawiony problem i metodę jego rozwiązania. Zgodnie z modelem dynamicznym, problem prognozowania jest początkowo sformułowany jako procedura znajdowania odchylenia $\chi_{t+\tau}$ w pewnym określonym momencie w przyszłości, poprzez rozszerzenie tego odchylenia w szereg Taylora:

$$\chi_{t+\tau} = \chi_t + \sum_{n=1}^N \frac{\chi_t^n \tau^n}{n!}, \quad (4)$$

gdzie wskaźnik n w wyrażeniu χ_t^n oznacza pochodną czasu n -tego rzędu.

W tym przypadku, powodem zastosowania szeregu Taylora jest to, że pierwsze wyrażenie w zależności (4) opisuje stan systemu, innymi słowy wyrażenie to opisuje odchylenie od prognozy modelu podstawowego w początkowym momencie czasowym. Drugie wyrażenie $\chi_t^n \tau$ opisuje szybkość zmiany odpowiedniej zmiennej (np. szybkość akumulacji uszkodzeń), a trzecie wyrażenie $\chi_t^n \tau^2/2$ opisuje szybkość

(e.g. the condition index) of the static model are based only on the explanatory variables (e.g. modulus of elasticity). Time is an independent variable. The main problem is to find the relationship on the basis of available data on the system history between the independent and explanatory variables.

In the formation of the mathematical apparatus of a dynamic model of pavement deterioration it is taken into account that in addition to the values of the explanatory variables in the fixed (primary) time moments the rate of change of these variables plays an important role. Therefore, we use the approach proposed in the papers [5, 29] and present value that characterizes pavement condition (e.g. *PCI*) in the following form:

$$P_{real,t} = P_{aux,t} + \chi_t + \delta_t, \quad (3)$$

where $P_{real,t}$ is actual (registered) pavement condition at the time moment t , $P_{aux,t}$ is the pavement condition in accordance with the base model, i.e. calculated with base model condition, χ_t is the deviation of the actual deterioration process from the calculated deterioration process, δ_t is the correction taking into account the effect of random factors, i.e. differences in the states of various segments under identical conditions. It is assumed that we know the base prediction model, for example, the static regression (sigmoidal) model, which allows to calculate the estimated value of the condition index at arbitrary time moment. It is also contemplated that the random variable follows normal distribution with zero mean value, i.e. deviations are equally possible in the direction of higher and lower values.

Variable χ_t , called structural deviation, characterizes the difference in the measured (actual) value of the predicted values in accordance with the base model. However, the Authors' studies show that the use of a sigmoidal model to describe deterioration process of the pavement structure is inefficient in many cases. For road sections with service conditions different from the project ones, the best results are provided by the base model correction based on parabolic interpolation in conjunction with an adaptive component.

Let us consider the proposed problem statement and method of its solution. In accordance with the dynamic model the problem of prediction is initially formulated as a procedure for finding the deviation $\chi_{t+\tau}$ at some instant in the future through the expansion of this deviation in Taylor series:

$$\chi_{t+\tau} = \chi_t + \sum_{n=1}^N \frac{\chi_t^n \tau^n}{n!}, \quad (4)$$

where index n in χ_t^n means the n^{th} order time derivative.

zmiany drugiego parametru (np. przyrostu szybkości akumulacji uszkodzeń). W przypadku funkcji analitycznej, rozszerzenie (4) pozwala wyznaczyć wartość funkcji w pewnym sąsiedztwie τ punktu t , tj. dla $t + \tau$, poprzez wartości funkcji i jej pochodnych w tym punkcie.

Przedstawmy pojęcie wektora odchyień, którego elementami są wartości funkcji opisujące odchylenie stanu nawierzchni drogi od wyniku określonego przez model podstawowy i jego pochodne w danym czasie. Następnie model takiego zachowania systemu, tj. wektor odchyień w określonym momencie czasu $t + \tau$ (w przybliżeniu drugiego rzędu), można wyrazić poprzez wartość wektora odchyień we wcześniejszym momencie czasu t w zbiorze zależności:

$$\begin{aligned}\chi_{t+\tau} &= \chi_t + \chi'_t \tau + \frac{1}{2} \chi''_t \tau^2, \\ \chi'_{t+\tau} &= \chi'_t + \chi''_t \tau, \\ \chi''_{t+\tau} &= \chi''_t.\end{aligned}\quad (5)$$

Zależności te można zapisać w bardziej zwartej formie:

$$\chi_{t+\tau} = A \cdot \chi_t, \quad (6)$$

gdzie:

$$\chi_{t+\tau} = \begin{pmatrix} \chi_{t+\tau} \\ \chi'_{t+\tau} \\ \chi''_{t+\tau} \end{pmatrix}; \quad \chi_t = \begin{pmatrix} \chi_t \\ \chi'_t \\ \chi''_t \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} 1 & \tau & \tau^2 / 2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Ważne jest, aby wybrać odpowiedni model podstawowy degradacji nawierzchni. Faktem jest, że w ramach tego podejścia, odchylenia χ_t są wprowadzane jako odchylenia od podstawowego modelu degradacji nawierzchni, tj. Przyjęto domyślnie dobrą „jakość” podstawowego modelu statycznego (sigmoidalnego). Ponadto, model ten będzie odpowiedni do opisu zachowania innych (standardowych) odcinków, ponieważ jego współczynniki k_1, k_2, k_3 są obliczane na podstawie tych wymagań. Jest to jedna z kluczowych cech proponowanego schematu. Należy podkreślić, że jest to kwestia dynamicznego, ale jeszcze nie adaptacyjnego modelu.

Wiadomo, że możliwe jest zbudowanie pojedynczej paraboli za pomocą trzech punktów nie leżących na tej samej prostej. W związku z tym parabola zostanie użyta jako dynamiczna korekta do modelu podstawowego. Aby zbudować pierwotną (dynamiczną) korektę modelu podstawowego (tj. określić współczynniki odpowiedzialne za dynamikę odchyień od modelu podstawowego), należy przeprowadzić minimum trzy pomiary (w celu obliczenia trzech współczynników). Z pewnością parabola będzie inna dla każdego zestawu punktów (konsekwencja dynamicznego charakteru modelu). Innymi słowy, dynamiczny charakter modelu w tym kontekście wykazuje przyspieszone pogorszenie konkretnego odcinka w stosunku do innego (podstawowy model statyczny).

The reason for using Taylor series in this case is that the first term of (4) describes the state of the system, in other words it describes the deviation from the prediction of the base model in initial time moment. The second term $\chi'_t \tau$ describes the rate of change of the corresponding variable (e.g., the rate of damage accumulation), and the third term $\chi''_t \tau^2 / 2$ describes the rate of change of the second parameter (e.g., increment of the rate of damage accumulation). In the case of analytical function, the expansion (4) allows one to determine the function value in some neighbourhood τ of point t , i.e. for $t + \tau$, by the function values and its derivatives at this point.

Let us introduce the concept of the vector of deviations, whose elements are the function values that describe the deviation of the road pavement condition from the result determined by the base model and its derivatives, at a given time. Then model of such system behavior, i.e. the deviation vector at time moment $t + \tau$ (in the second-order approximation), can be expressed by a value of deviation vectors at an earlier moment t with a set of relations:

$$\begin{aligned}\chi_{t+\tau} &= \chi_t + \chi'_t \tau + \frac{1}{2} \chi''_t \tau^2, \\ \chi'_{t+\tau} &= \chi'_t + \chi''_t \tau, \\ \chi''_{t+\tau} &= \chi''_t.\end{aligned}\quad (5)$$

These relations can be written in a more compact form:

$$\chi_{t+\tau} = A \cdot \chi_t, \quad (6)$$

where:

$$\chi_{t+\tau} = \begin{pmatrix} \chi_{t+\tau} \\ \chi'_{t+\tau} \\ \chi''_{t+\tau} \end{pmatrix}; \quad \chi_t = \begin{pmatrix} \chi_t \\ \chi'_t \\ \chi''_t \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} 1 & \tau & \tau^2 / 2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

It is important to choose the correct base model of pavement deterioration. The fact is that under this approach deviations χ_t are introduced as deviations from the base model of the pavement deterioration i.e. good “quality” of base static (sigmoidal) model is implicitly assumed. In addition, this model will be suitable for description of the behaviour of other (standard) sections, as its coefficients k_1, k_2, k_3 are calculated on the basis of these requirements. This is one of the key features of the proposed scheme. We emphasize that it is an issue of the dynamic, but not the adaptive model yet.

It is known that it is possible to build a single parabola using three points not lying on the same straight line. Therefore, a parabola will be used as a dynamic correction to the base model. To build the primary (dynamic) correction to the base model (i.e. determination of the coefficients responsible for the dynamics of deviations from the base

Błędy losowe są zawsze obecne w wynikach pomiarowych. Załóżmy, że pochodne w zależności (5) podlegają również przypadkowym fluktuacjom (odchyleniom) i wprowadźmy wektor odpowiednich korekt ξ , a wtedy stosunek prognozowania (6) można zapisać jako:

$$\begin{pmatrix} \chi_{t+\tau} \\ \chi'_{t+\tau} \\ \chi''_{t+\tau} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \frac{\tau^2}{2} \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \chi_t \\ \chi'_t \\ \chi''_t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \xi_t \\ \xi'_t \\ \xi''_t \end{pmatrix}, \quad (8)$$

lub zwięźlej:

$$\chi_{t+\tau} = A \cdot \chi_t + \xi_t. \quad (9)$$

Ponadto, w niektórych przypadkach dana zmienna, np. wytrzymałość strukturalna, nie może być mierzona bezpośrednio. W takim przypadku stosuje się pomiar pośredni. Oznacza to, że początkowo mierzy się jedną wartość (np. grubość warstw nawierzchni, ocenę ilościową jej stanu), a następnie uzyskuje się oszacowanie wymaganego parametru (moduł sprężystości nawierzchni) poprzez zastosowanie do niego pewnych zestawów zasad (operacji). Zgodnie z matematycznym systemem notacji, dalej oznaczamy zbiór takich działań jako odpowiedni operator np. \hat{L} .

Wynik pomiaru rzeczywistego stanu systemu można zatem zapisać w formie ogólnej za pomocą następującego równania:

$$P_t = \hat{L}(l_t) = P_{aux,t} + f(\chi_t) + \delta_{S,t}, \quad (10)$$

gdzie $\delta_{S,t}$ jest korektą uwzględniającą wszystkie losowe składniki, w tym błędy wyników pomiarów, $\hat{L}(l_t)$ jest wynikiem zastosowania operacji pomiaru i przetwarzania do odpowiednich wartości, takich jak pomiar ugięcia sprężystego l_t czasie t , w celu obliczenia modułu nawierzchni $P_t = \hat{L}(l_t)$, $f(\chi_t)$ jest funkcją odpowiedzialną za korektę modelu podstawowego - zgodnie z (5). Zatem mierzony (rzeczywisty) parametr (np. całkowity równoważny moduł nawierzchni) jest reprezentowany jako wartość predykcyjna oparta na modelu podstawowym $P_{aux,t}$, korekcji „adaptacyjnej” $f(\chi_t)$ i funkcji wpływu losowego błędu $\delta_{S,t}$.

Wiele tak zwanych iteracyjnych metod matematyki stosowanej polega na stopniowej korekcie początkowego przybliżenia do pożądanego rozwiązania. W takim przypadku obliczony stan nawierzchni $P_{aux,t}$ odgrywa rolę takiego wstępnego przybliżenia. Dlatego zależność (10) zapisana jest w dogodniejszej formie:

$$\hat{L}P_t - P_{aux,t} = f(\chi_t) + \delta_{S,t}. \quad (11)$$

Lewa strona równania (11) jest odchyleniem rzeczywistych wartości $\hat{L}P_t$ od obliczonego $P_{aux,t}$. W przypadku absolutnie

model) it is necessary to carry out a minimum of three measurements (to calculate three coefficients). Certainly, the parabola will be different for each set of points (the consequence of the dynamic nature of the model). In other words, the dynamic nature of the model in this context shows accelerated deterioration of a particular segment relative to the other (base static model).

Random errors are always present in the measurement results. Let us assume that the derivatives in (5) are also subject to random fluctuations (deviations) and introduce the vector of appropriate corrections ξ , the relation for prediction (6) then can be written as:

$$\begin{pmatrix} \chi_{t+\tau} \\ \chi'_{t+\tau} \\ \chi''_{t+\tau} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \frac{\tau^2}{2} \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \chi_t \\ \chi'_t \\ \chi''_t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \xi_t \\ \xi'_t \\ \xi''_t \end{pmatrix}, \quad (8)$$

or more compactly:

$$\chi_{t+\tau} = A \cdot \chi_t + \xi_t. \quad (9)$$

Furthermore, in some cases the variable in question, e.g. structural strength cannot be measured directly. In this case, an indirect measurement is used. This means that initially one value is measured (e.g. the thickness of the pavement layers, quantitative assessment of their condition) and then the required parameter estimate is obtained (pavement elastic modulus) by applying to it a certain set of rules (operations). Then we denote the set of such actions as corresponding operator, for example \hat{L} in accordance with the notation system in mathematics.

Then the measurement result of the current state of the system can be expressed in general form by the following equation:

$$P_t = \hat{L}(l_t) = P_{aux,t} + f(\chi_t) + \delta_{S,t}, \quad (10)$$

where $\delta_{S,t}$ is the correction taking into account all random components, including errors of measurement results, $\hat{L}(l_t)$ is the result of applying the measuring and processing operations to the corresponding values, such as measurement of elastic deflection l_t at time moment t to calculate pavement module $P_t = \hat{L}(l_t)$, $f(\chi_t)$ is function responsible for the correction of base model - according to (5). Thus, the measured (actual) parameter (e.g., the total equivalent module of pavement) is represented as a predictive value based on the base model $P_{aux,t}$, “adaptive” correction $f(\chi_t)$ and the function of random error effect $\delta_{S,t}$.

Many of the so-called iterative methods of applied mathematics are based on a step-by-step adjustment of the initial approximation to the desired solution. In this case, the

dokładnego modelu podstawowego i braku błędów pomiaru lewa strona będzie równa zeru. W rzeczywistości zawsze będzie różna od zera, ale im mniejsze są różnice, tym dokładniejszy jest model podstawowy. Dlatego przy dostosowywaniu modelu należy dążyć do zminimalizowania tych różnic. Z tego powodu wprowadzamy pojęcie funkcji celu, która ma być zminimalizowana a definiujemy ją jako:

$$\psi_t = \left| \hat{L}P_t - P_{aux,t} \right| = \left| f(\chi_t) + \delta_{s,t} \right| \rightarrow \min. \quad (12)$$

Oznacza to, że w ramach dynamicznego modelowania adaptacyjnego, na każdym z poprzednich etapów, aktualizowana jest wstępna aproksymacja w celu dokładniejszego określenia przewidywanych wartości. Wynik stanowi nowe wstępne przybliżenie $P_{aux,t}^{new}$, które jest wykorzystywane w następnym etapie proponowanego schematu. Ostatnim etapem jest dokonanie ocen ilościowych na podstawie dostępnego zestawu danych a także wprowadzenie korekt (12) do zastosowania w dalszych krokach algorytmu. Wyznaczenie oceny można teraz zapisać w następującej zwartej formie:

$$P_{aux,t+\tau}^{new} = P_{aux,t}^{new} + f(\chi_t) + \delta_{s,t}, \quad (13)$$

Oczywiście, im mniejszy jest całkowity błąd pomiaru $\delta_{s,t}$ oraz „dynamizm” modelu podstawowego $f(\chi_t)$, tym wyższa jest dokładność modelu dynamicznego.

Wynikowa, przewidywana ocena stanu odcinka drogi jest wykorzystywana zarówno w konserwacji/naprawie (głównie w badanych obszarach), jak i w późniejszych prognozach w modelach sieci. Niestety, zakres tego artykułu nie pozwala szczegółowo odnieść się do rozwiązania problemu optymalizacji konserwacji/naprawy oraz modelu sieci. Autorzy zamierzają przedstawić odpowiednie wyniki w następnych publikacjach. Rozważmy teraz kwestie praktycznej implementacji modelu.

3.2. ALGORYTM PROGNOZOWANIA

Zgodnie z dynamicznym modelem adaptacyjnym, proces prognozowania stanu nawierzchni odbywa się z uwzględnieniem dodatkowego zbioru danych uzyskanych z poprzednich okresów badawczych. Rozważmy procedurę implementacji algorytmu do obliczania zmiennej oceny prognozytycznej, która charakteryzuje nośność nawierzchni, czyli ogólny równoważny moduł elastyczności nawierzchni E_t .

1. Zgodnie z wynikami badań z poprzednich okresów, określana jest zmienna charakteryzująca stan struktury (moduł sprężystości struktury E_t określony w okresach kolejnych trzech lat t_1, t_2, t_3).
2. Współczynniki podstawowego modelu dynamicznego przedstawione przez szereg potęgowy:

$$E_t = c_0 + c_1 \times t + c_2 \times t^2 \quad (14)$$

calculated pavement condition $P_{aux,t}$ plays the role of such initial approximation. Therefore, the relation (10) may be noted down in the simple form:

$$\hat{L}P_t - P_{aux,t} = f(\chi_t) + \delta_{s,t}. \quad (11)$$

The left side of (11) is the deviation of the actual values $\hat{L}P_t$ from the calculated $P_{aux,t}$ level. In case of an absolutely accurate base model and the absence of measurement errors the left side will be equal to zero. In reality, it will always be different from zero, but the smaller are the differences, the more accurate is the base model. Therefore, when adjusting the model, it is necessary to seek to minimize these differences. For this reason, we introduce the concept of the objective function, which is to be minimized, and define it as:

$$\psi_t = \left| \hat{L}P_t - P_{aux,t} \right| = \left| f(\chi_t) + \delta_{s,t} \right| \rightarrow \min. \quad (12)$$

This means that under the dynamic adaptive modeling at each previous stage the initial approximation is updated for more accurate determination of the predicted values. The result is a new initial approximation $P_{aux,t}^{new}$, which is used at the next stage of the proposed scheme. Finally, the last stage is to find quantitative assessments on the basis of the available data set, and repeat adjustments (12) for use in subsequent steps of the algorithm. Determination of the assessment can now be written in the following compact form:

$$P_{aux,t+\tau}^{new} = P_{aux,t}^{new} + f(\chi_t) + \delta_{s,t}, \quad (13)$$

Obviously, the smaller the total measurement error $\delta_{s,t}$ and “dynamism” of the basic model $f(\chi_t)$, the higher the accuracy of the dynamic model is.

Resulting predicted assessment of the road segment condition is used both in the appointment of maintenance/repair (primarily in the surveyed areas), and the subsequent prediction in the network models. Unfortunately, the extent of this paper does not allow to refer in detail to the solution of the problem of maintenance/repair optimization and network model. The authors hope to present the corresponding results in the following publications. Now, let us consider the issues of the practical implementation of the model.

3.2. PREDICTION ALGORITHM

According to the dynamic adaptive model process of prediction of pavement condition is carried out taking into account the additional set of data obtained from the previous survey periods. Let us consider the procedure of implementation of the algorithm for calculation of predictive assessment variable that characterizes the bearing capacity of the pavement, that is a general equivalent modulus of pavement elasticity E_t .

są wyznaczane z rozwiązania liniowego układu równań algebraicznych:

$$\begin{aligned} c_{0,3+1} + c_{1,3+1} \cdot t_1 + c_{2,3+1} \cdot t_1^2 &= E_{t_1}, \\ c_{0,3+1} + c_{1,3+1} \cdot t_2 + c_{2,3+1} \cdot t_2^2 &= E_{t_2}, \\ c_{0,3+1} + c_{1,3+1} \cdot t_3 + c_{2,3+1} \cdot t_3^2 &= E_{t_3}, \end{aligned} \quad (15)$$

gdzie $c_{0,3+1}, c_{1,3+1}, c_{2,3+1}$ są poszukiwanymi współczynnikami podstawowego modelu dynamicznego; t_1, t_2, t_3 są znanymi liczbami (wartościami zmiennej niezależnej); $E_{t_1}, E_{t_2}, E_{t_3}$ są wartościami zmiennej zależnej (znanej). Drugi indeks (3 + 1) pokazuje, że współczynniki te są używane do dostosowania modelu podstawowego dla okresu $T = 3 + 1$. Tak więc, teraz inny zestaw współczynników (zróżnicowany od segmentu do segmentu) $c_{0,3+1}, c_{1,3+1}, c_{2,3+1}$ jest dodawany do podstawowych współczynników początkowego modelu statycznego (1): k_1, k_2, k_3 .

3. Następny etap polega na obliczeniu wartości zmiennej zależnej $E_{t+\tau}$ modelu w określonym czasie $T + \tau$:

$$E_{t_{3+1}} = E_{t_4} = c_{0,3+1} + c_{1,3+1} \cdot t_{3+1} + c_{2,3+1} \cdot t_{3+1}^2. \quad (16)$$

4. Odchylenie $\chi_{t_{3+1}}$ wartości zmiennej zależnej modelu $E_{T+\tau} = E_{t_{3+\tau}}$ obliczone jest na poprzednim etapie z rzeczywistego stanu konstrukcji w określonym czasie $t_3 + \tau$ (τ wynosi domyślnie jeden rok).

5. Przyjęte są trzy wartości zmiennych charakteryzujących stan nawierzchni na trzy lata. Jest to następujący zestaw zmiennych: t_2, t_3, t_4 .

6. Obliczenia z p. 2-4 powtarzane są w celu uzyskania wartości $\chi_{t_{4+1}}$. Wynikiem obliczeń jest zestaw odchyłeń strukturalnych wartości, które są wystarczające do zbudowania funkcji odchyłeń strukturalnych. W proponowanym modelu występują trzy wartości $\chi_{t_{3+1}}, \chi_{t_{4+1}}, \chi_{t_{5+1}}$ ponieważ funkcja odchyłeń strukturalnych jest reprezentowana jako szereg potęgowy pozwalający na różniczkowanie (co najmniej dwa razy).

7. Oblicza się pochodne pierwszego i drugiego rzędu, a następnie zgodnie ze wzorem (5) oblicza się nową wartość korekty $\chi_{t_{6+1}}$ dostosowującej model podstawowy do dynamicznych pomiarów (nie jest to określone przez wyniki badania, tak jak na poprzednich etapach).

8. Wynikiem obliczeń jest zbudowanie podstawowego modelu adaptacyjnego umożliwiającego prognozowanie stanu struktury (bez wykorzystania danych eksperymentalnych z wyników badań):

$$\begin{aligned} E_{t_{6+1}} &= c_{0,6+1} + c_{1,6+1} \cdot t_{6+1} + \\ &+ c_{2,6+1} \cdot t_{6+1}^2 + \chi_{5+1} + \chi'_{5+1} \tau + \frac{\chi''_{5+1}}{2!} \tau^2. \end{aligned} \quad (17)$$

1. According to the survey results of previous periods, the variable characterizing the condition of the structure (elasticity modulus of structure E_t at time moments t_1, t_2, t_3 (for three years) is determined.

2. Coefficients of base dynamic model presented by a power series:

$$E_t = c_0 + c_1 \times t + c_2 \times t^2 \quad (14)$$

are determined from the solution of the linear algebraic equation system:

$$\begin{aligned} c_{0,3+1} + c_{1,3+1} \cdot t_1 + c_{2,3+1} \cdot t_1^2 &= E_{t_1}, \\ c_{0,3+1} + c_{1,3+1} \cdot t_2 + c_{2,3+1} \cdot t_2^2 &= E_{t_2}, \\ c_{0,3+1} + c_{1,3+1} \cdot t_3 + c_{2,3+1} \cdot t_3^2 &= E_{t_3}, \end{aligned} \quad (15)$$

where $c_{0,3+1}, c_{1,3+1}, c_{2,3+1}$ are sought coefficients of the base dynamic model; t_1, t_2, t_3 are known numbers (the values of independent variable); $E_{t_1}, E_{t_2}, E_{t_3}$ are values of dependent variable (known). The second index (3 + 1) shows that these coefficients are used to adjust the base model for the period $T = 3 + 1$. Thus, now another coefficient set (varying from segment to segment) $c_{0,3+1}, c_{1,3+1}, c_{2,3+1}$ is added to the primary coefficients of the initial static model (1): k_1, k_2, k_3 .

3. The next stage makes calculation of dependent variable value $E_{t+\tau}$ of the model in time moment $T + \tau$:

$$E_{t_{3+1}} = E_{t_4} = c_{0,3+1} + c_{1,3+1} \cdot t_{3+1} + c_{2,3+1} \cdot t_{3+1}^2. \quad (16)$$

4. The deviation $\chi_{t_{3+1}}$ of value of dependent variable of the model $E_{T+\tau} = E_{t_{3+\tau}}$ calculated at the previous stage from actual structure condition in time moment $t_3 + \tau$ (τ is one year by default).

5. Three values of the variable characterizing the condition of the pavement for three years are accepted. Now this is the following set of variables: t_2, t_3, t_4 .

6. Calculations p. 2-4 are repeated to obtain the value $\chi_{t_{4+1}}$. The result of the calculation is a set of structural deviations of values sufficient for building a function of structural deviations. Under the proposed model, there are three values $\chi_{t_{3+1}}, \chi_{t_{4+1}}, \chi_{t_{5+1}}$, because a function of structural deviations is represented as a power series allowing differentiation (at least twice).

7. Derivatives of the first and second orders are calculated, and then according to the formula (5) a new value of correction $\chi_{t_{6+1}}$ adapting the base model to the dynamic measurements is calculated (it is not determined by the results of the survey, as at previous stages).

8. The result of the calculation is building a base adaptive model allowing to predict the structure condition (without use of the experimental data of the survey results):

Pierwsze trzy wyrażenia w tym wzorze zapewniają dynamiczny charakter modelu, a trzy ostatnie zapewniają jego adaptacyjny charakter. W najprostszym przypadku (przy braku pełnych danych) liczba okresów obserwacji może zostać zredukowana do czterech. Oczywiście, sprawi to, że model ten będzie mniej dokładny.

4. WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Rozważmy proces prognozowania stanu odcinka drogi, na którym przeprowadzono wstępne badania (Rys. 3). Zmienne charakteryzujące stan struktury nawierzchni tworzą dwie główne grupy. Pierwsza grupa tworzy klasę parametrów zewnętrznych, które obejmują transportowe i konserwacyjne zmienne nawierzchni: gładkość, obecność i rodzaj uszkodzenia oraz deformację wierzchniej warstwy (pęknięcia siatki, koleiny, puste miejsca, dziury, pęknięcia poprzeczne itd.). Druga grupa to grupa wewnętrznych parametrów i ukrytych wad: zmiana grubości warstw nawierzchni, obecność i charakter pęknięć podpowierzchniowych, obszary zalane wodą, lokalne obszary dekompresji warstw niższych. Zmienne te określono na podstawie wyników diagnostyki GPR (Rys. 4).

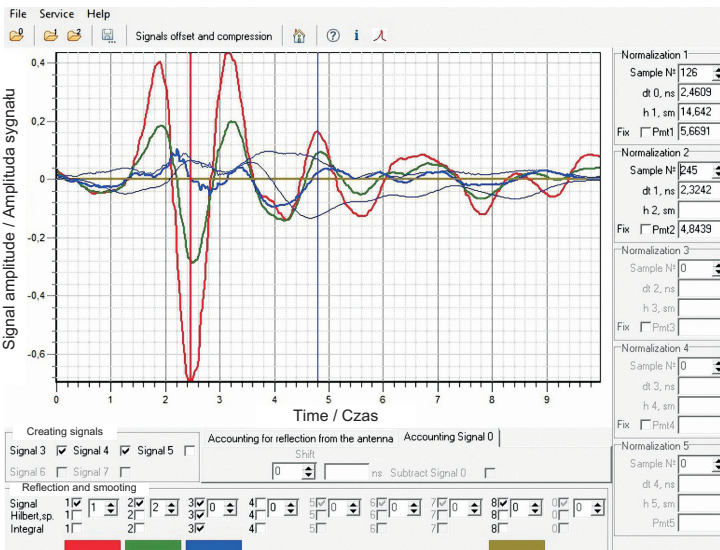


Fig. 4. Example window of the signal processing software
Rys. 4. Przykładowe okno oprogramowania stosowanego do przetwarzania sygnałów

Odcinki drogi M03 (Kijów-Charków-Dovzhanskiy) zostały wybrane na podstawie oceny wizualnej, badań instrumentalnych i analizy szybkości deformacji i degradacji nawierzchni. Badanie przeprowadzono zarówno na odcinkach w dobrym stanie (km 396 + 700, km 416 + 300) jak i zadowalającym (km 397 + 020), a także na odcinkach charakteryzujących się

$$E_{t_{6+1}} = c_{0,6+1} + c_{1,6+1} \cdot t_{6+1} + c_{2,6+1} \cdot t_{6+1}^2 + \chi_{5+1} + \chi'_{5+1} \tau + \frac{\chi''_{5+1}}{2!} \tau^2. \quad (17)$$

In this formula, the first three terms provide the dynamic nature of the model, and the last three captions provide the adaptive nature of the model. In the simplest case (in the absence of complete data), the number of observation periods can be reduced to four. Obviously, that will make this model less reliable.

4. RESULTS AND DISCUSSION

Let us consider the process of predicting the condition of the road section on which the preliminary survey was carried out (Fig. 3). Variables characterizing the condition of pavement structures form two main groups. The first group makes the class of external parameters, which include transport and maintenance pavement variables: smoothness, presence and nature of the damage and deformation of the upper layer (mesh cracks, rutting, hollow spots, potholes, transverse cracks, etc.). The second group makes the collection of the internal parameters and hidden defects: changing the thickness of the pavement layers, the presence and nature of subsurface cracks, water-logged areas, local areas of decompression of the lower layers. These variables were determined according to the results of GPR diagnostics (Fig. 4).



Fig. 3. GPR diagnostics of the pavement - transverse profile scanning

Rys. 3. Diagnostyka GPR nawierzchni - skanowanie profilu poprzecznego

Sections of road M03 (Kiev-Kharkiv-Dovzhanskiy) are selected based on visual assessment, instrumental surveys and analysis of the rate of deformation and deterioration of the pavement. The survey was carried out both on sections in good (km 396 + 700, km 416 + 300) and satisfactory

wysokim stopniem deformacji i degradacji, czyli były w złym stanie technicznym (km 403 + 000, km 428 + 500). Skanowanie nawierzchni wykonano zarówno w kierunku podłużnym, jak i poprzecznym. Podczas przetwarzania wyników badań GPR, określono grubość warstw strukturalnych nawierzchni; wilgotność podłoża gruntowego oraz obecność wad podpowierzchniowych (pęknięć).

Zgodnie z przepisami na Ukrainie, które regulują zasady napraw i konserwacji dróg [30] oraz wymaganiami dotyczącymi nawierzchni drogowych [31], w czasie badań diagnostycznych określa się rzeczywisty moduł sprężystości konstrukcji nawierzchni [31], oblicza się naprężenia rozciągające w warstwie monolitycznej konstrukcji oraz naprężenia ścinające w podłożu gruntowym, a współczynniki zapewnienia dla odpowiednich kryteriów (Rys. 5) określane są na podstawie wyników badań GPR.

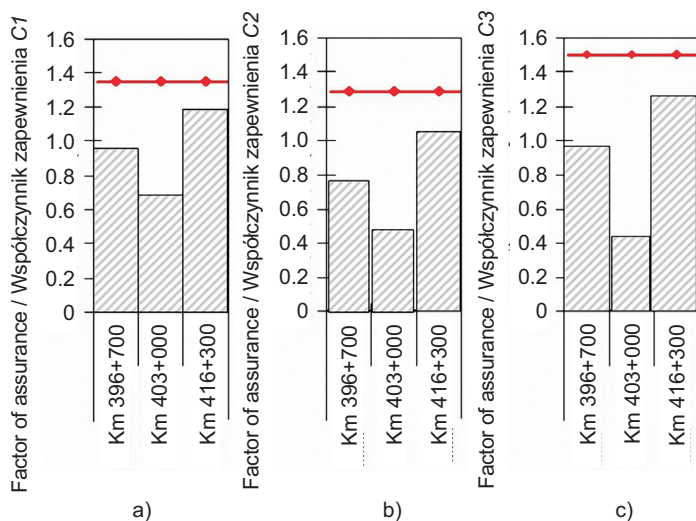


Fig. 5. Section condition assessment according to strength criteria: a) C1 factor of assurance of allowed elastic deflection, b) C2 factor of assurance of resistance of monolithic layers to tensile stress, c) C3 factor of assurance of shear strength in the sub-grade soil Rys. 5. Ocena stanu przekroju według kryteriów wytrzymałościowych: a) współczynnik C1 zapewnienia dopuszczalnego odkształcenia sprężystego, b) współczynnik C2 zapewnienia odporności warstw monolitycznych na rozciąganie, c) współczynnik C3 zapewnienia wytrzymałości na ścinanie podłoża gruntowego

Stan odcinka km 416 + 300 odpowiada raczej statycznemu modelowi podstawowemu (przewidywany czas eksploatacji), a przy niewielkiej korekcie można zastosować model podstawowy do przewidywania degradacji tego odcinka. Stan drugiego i trzeciego odcinka (odpowiednio odcinki km 396 + 700 i km 403 + 000) charakteryzuje się znacznym odchyleniem (degradacją). Dlatego konieczne jest dostosowanie modelu podstawowego.

(km 397 + 020) condition as well as on sections characterized by high rate of deformation and deterioration, and are in poor condition (km 403 + 000, km 428 + 500). Pavement scanning was performed both in the longitudinal and transverse directions. During the results processing of the GPR surveys the thickness of the pavement structural layers; sub-grade soil moisture, the presence of subsurface defects (cracks) were determined.

In accordance with the regulations of Ukraine, governing the rules of repair and maintenance of roads [30] and the requirements to the road surface [31] the actual modulus of elasticity of pavement structure [31] is determined, tensile stresses in monolithic layer structures and shear stresses of sub-grade soils are calculated, factors of assurance on the relevant criteria (Fig. 5) are determined based on the results of GPR survey.

The condition of section km 416 + 300 corresponds rather well to the base static model (expected lifetime) and, with a minor adjustment, the base model can be applied for predicting its deterioration. The condition of the second and third sections (sections km 396 + 700 and km 403 + 000, respectively) has significant deviation (deterioration). Therefore, it is necessary to adjust the base model.

The essence of adaptive dynamic models is included in taking into account not only the function behavior (dependence of the construction condition on the time), but also function derivatives with time (first and second order). That is, under dynamic adaptive model additional conditions are imposed not only by the function itself, but also by its derivatives. In this case the data can be obtained over a relatively short period of time. This allows to obtain predictive assessment based on the real course of the deterioration process (Fig. 6).

The solid line indicates the progress of the deterioration corresponding to the base static model, which in this case can be rewritten as:

$$E = E_0 - k_1 \cdot \exp(-k_2 \cdot k_3^t), \quad (18)$$

where E, E_0 are the current and initial values of total equivalent elasticity modulus of pavement structure in [MPa], k_1, k_2, k_3 are constant model coefficients.

The actual condition of the structure (from 2009 year up to 2015 year) in accordance with the results of the survey is marked as "0". Let us suppose that survey results for the period 2009 - 2014 are initially known, and it is required to make a prediction for 2015. In this case, the prediction algorithm at the first stage is to construct the assessment curve in accordance with the model (17) based on data of

Istota adaptacyjnych modeli dynamicznych zawiera się w uwzględnieniu nie tylko zachowania funkcji (zależność stanu konstrukcji od czasu), ale także funkcji pochodnych po czasie (pierwszego i drugiego rzędu). Oznacza to, że w ramach dynamicznego modelu adaptacyjnego narzucają się dodatkowe warunki nie tylko dla samej funkcji, ale także jej pochodnych. W takim przypadku dane można uzyskać w stosunkowo krótkim czasie. Pozwala to na uzyskanie oceny prognostycznej na podstawie rzeczywistego przebiegu procesu degradacji (Rys. 6).

Linia ciągła wskazuje postęp degradacji odpowiadający statycznemu modelowi podstawowemu, który w tym przypadku można zapisać jako:

$$E = E_0 - k_1 \cdot \exp(-k_2 \cdot k_3^t), \quad (18)$$

gdzie E , E_0 to obecne i początkowe wartości całkowitego równoważnego modułu sprężystości konstrukcji nawierzchni wyrażone w [MPa]; k_1 , k_2 , k_3 to stałe współczynniki modelu.

Rzeczywisty stan konstrukcji (od 2009 r. do 2015 r.) zgodnie z wynikami badania oznaczony jest jako „0”. Załóżmy, że wyniki badania dla okresu od 2009 r. do 2014 r. są początkowo znane, a wymagane są prognozy na rok 2015. W tym przypadku algorytm prognozowania na pierwszym etapie polega na skonstruowaniu krzywej oceny zgodnie z modelem (17) na podstawie danych z lat 2009 - 2011. Przyjęto przynajmniej trzy wartości, ponieważ budowanie krzywej oceny (tj. zasadniczo podstawowego modelu dynamicznego) na pierwszym etapie polega na konstruowaniu paraboli przechodzącej przez trzy dane punkty. Na tym etapie zakłada się, że korekta losowa $\xi = 0$, ponieważ przewidziany jest stan jednego odcinka, na którym pomiary przeprowadzono z dostateczną dokładnością. Wynikiem obliczeń jest funkcja przedstawiona w postaci szeregu potęgowego (16) (krzywa „2” na Rys. 6). Należy zauważyć, że na tym etapie obliczeń wartość uzyskanej funkcji odpowiadającej okresowi prognozowanemu (2012 r.) nie jest wielkością prognozowaną.

Następnie obliczamy odchylenie strukturalne $\chi_t = \chi_{12}$ charakteryzujące odchylenie rzeczywistego procesu niszczenia w modelu, jako różnicę między rzeczywistym stanem konstrukcji (2012 r.) a przewidywanym stanem zgodnie z pierwszym przybliżeniem modelu dynamicznego.

Obliczenia krzywej oceny i odchylenia strukturalnego powtarza się dla zestawu danych z badań z lat 2010-2012. Wynikiem obliczeń jest model postaci (16) z nowym zestawem współczynników (krzywa „3”, Rys. 6). Na tym etapie przeprowadzana jest więc aktualizacja modelu, co nadaje mu dynamiczny charakter. Operacje powtarza się dla zestawu

2009-2011. At least three values are accepted, because building the assessment curve (i.e. essentially the base dynamic model) at the first stage involves constructing a parabola passing through three given points. At this stage, it is assumed that the random correction $\xi = 0$, because condition of one segment is predicted, where measurements were carried out with sufficient accuracy. The result of calculation is a function presented in the form of a power series (16) (curve “2” in Fig. 6). It is noted that the value of the obtained function corresponding to the predictive period (2012), at this stage of calculations is not a predictive value.

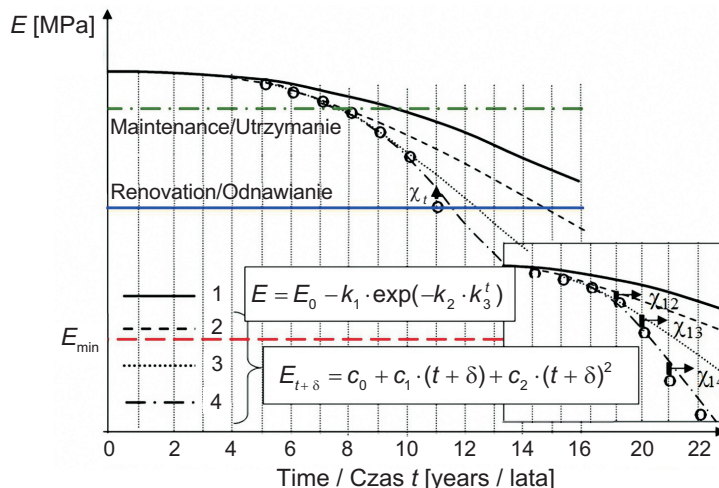


Fig. 6. Scheme of the deterioration prediction of section km 403+000 using adaptive dynamic model (by the example of the total equivalent elasticity modulus of pavement structure): 1 - base static model; 2 - model built according to data of 2009-2011, 3 - model built according to data of 2010-2012; 4 - model built according to data of 2013-2014 is the final base model

Rys. 6. Schemat prognozowania niszczenia odcinka km 403+000 za pomocą adaptacyjnego modelu dynamicznego (na przykładzie całkowitego równoważnego modułu sprężystości konstrukcji nawierzchni): 1 - podstawowy model statyczny; 2 - model zbudowany według danych z lat 2009-2011, 3 - model zbudowany na podstawie danych z lat 2010-2012; 4 - model zbudowany na podstawie danych z lat 2013-2014 jest ostatecznym modelem podstawowym

Then we calculate structural deviation $\chi_t = \chi_{12}$ characterizing deviation of the actual deterioration process of the model, as the difference between the actual construction condition (2012) and predicted condition according to the first approximation of the dynamic model.

Calculations of assessment curve and structural deviation are repeated for a set of survey data of 2010-2012. The result of the calculation is model of the form (16) with a new set of coefficients (curve “3”, Fig. 6). Thus, at this stage, the update of the model is carried out, which gives it

danych z badań z lat 2011-2013. Wynikiem wdrożenia tych operacji jest ostateczny podstawowy model dynamiczny i zbiór wartości odchylenia strukturalnego $\chi_t: \chi_{12}, \chi_{13}, \chi_{14}$. Ostatni zestaw jest wymagany do określenia współczynników odchylenia strukturalnych (analitycznie) i obliczenia całkowitego odchylenia strukturalnego $\sum_{j=1}^N \frac{\chi_t^j}{j!} \tau_j$ zgodnie

z (4). Pochodne funkcji odchylenia strukturalnego można określić numerycznie. Na tym etapie przeprowadza się zatem adaptację modelu do danych uzyskanych z badań, co sprawia, że model staje się adaptacyjny. Uzyskane prognozy dla danego odcinka prawie dokładnie pokrywają się z rzeczywistym stanem odcinka z badania z 2015 r. Podsumowując, zauważamy, że zwiększenie liczby wstępnych pomiarów poprawia dokładność prognozowania, umożliwiając dostosowanie wartości pochodnych i samego modelu.

5. WNIOSKI

W artykule zaproponowano model prognozowania stanu nawierzchni. Model ten opiera się na wynikach diagnostyki odcinka drogi o nawierzchni asfaltobetonowej jako danych wejściowych. Opracowany model ma kilka ważnych zalet w stosunku do wcześniej znanych modeli. Pierwszą kluczową cechą jest wykorzystanie danych z badań GPR (jako podstawy) razem z innymi danymi określonymi przez standardy kontroli jakości stanu nawierzchni drogowej. Zestawy danych GPR pozwalają ocenić aktualny stan wewnętrzny nawierzchni obejmujący geometrię i właściwości fizyczne i mechaniczne). Pokazano, że przetwarzanie danych GPR z badań nieniszczących za pomocą specjalistycznych algorytmów i oprogramowania rozwiązuje jednocześnie dwa ważne problemy: określanie grubości warstw i szacowanie przenikalności dielektrycznej materiałów konstrukcyjnych warstw drogowych. Ważną cechą korzystania z GPR w tym przypadku jest możliwość odbierania danych podczas ruchu pojazdu. Następną zaletą danych GPR jest możliwość ich konwersji na właściwości mechaniczne materiałów oraz wykrycie i oszacowanie parametrów pęknięć podpowierzchniowych i innych nieprawidłowości. Na podstawie przetwarzania uzyskanych informacji zaproponowano nowy ogólny schemat oceny i prognozowania stanu nawierzchni.

Opis matematyczny dynamicznego modelu adaptacyjnego degradacji nawierzchni oparty jest nie tylko na zliczaniu wartości zmiennych objaśniających w ustalonych czasach, ale także na tempie i charakterze zmian tych zmiennych. Te cechy sprawiają, że model jest dynamiczny i adaptacyjny, co poprawia wiarygodność ocen prognostycznych. Wyniki modelu przedstawiono na podstawie studium przypadku.

a dynamic character. The operations are repeated up to a set of survey data of 2011-2013. The outcome of the implementation of these operations is the final base dynamic model and a set of structural deviation values $\chi_t: \chi_{12}, \chi_{13}, \chi_{14}$. The last set is required to determine the coefficients of structural deviations (analytically) and calculate the total structural deviation $\sum_{j=1}^N \frac{\chi_t^j}{j!} \tau_j$ in accordance with (4). The

derivatives of structural deviation function can be determined numerically. Thus, at this stage, the adaptation of the model to the survey data is carried out, which makes the model adaptive. Obtained prediction for the given section almost exactly coincides with the actual section condition of the 2015 survey. In conclusion we note that increasing the number of preliminary measurements improves prediction accuracy by allowing the adjustment of derivative values and the model itself.

5. CONCLUSIONS

A model for the prediction of pavement condition is proposed in the present paper. This model is also based on the results of road section diagnostics of asphalt concrete flexible pavement as input data. The model developed in this paper has several important advantages over the previously known models. The first key feature is to use the data of the GPR survey as the base, in cooperation with other data prescribed by the quality control standards of road pavement condition. GPR data sets allow to take into account current internal condition of the pavement (geometrical, physical, and mechanical characteristics). It is shown that the processing of GPR data of non-destructive testing using specialized algorithms and software solves simultaneously two important problems: determining the thickness of layers and estimating the dielectric permittivity of materials of road structure layers. An important feature of using GPR in this case is the ability to receive data during vehicle traffic. Another advantage of the GPR data is the ability to convert them to mechanical properties of materials and to detect and estimate the parameters of subsurface cracks and other irregularities. A new general scheme for the assessment and prediction of pavement condition build on the processing of obtained information is proposed.

The mathematical apparatus of dynamic adaptive model of pavement deterioration based not only on accounting the values of the explanatory variables at fixed times, but also the rate and character of change of these variables. Namely these features make the model dynamic and adaptive, improving the reliability of predictive assessment. Results of the model are shown with case study.

Wykorzystanie dynamicznych modeli adaptacyjnych do rozwiązywania problemów prognozowania stanu nawierzchni na poziomie poszczególnych odcinków pokazuje ich skuteczność i daje możliwość wyboru różnych sposobów radzenia sobie z problemami optymalizacji i planowaniem drogowych działań naprawczych.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Modeling Road Deterioration and Maintenance Effects in HDM-4. RETA 5549-REG Highway Development and Management Research, Final Report. Prepared for Asian Development Bank by N.D. Lea International Ltd, October, 1995, 351p.
<http://www.lpcb.org/index.php/edocman-test/1995-modelling-road-deterioration-and-maintenance-effects-in-hdm-4/viewdocument> 14.12.2017
- [2] *Paterson W.D.O.*: Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management. A World Bank Publication. The Johns Hopkins University Press., Baltimore, 1987, 454p.
- [3] Proceedings of the International Workshop on HDM-4 held at the Institut Kerja Raya (IKRAM), Kuala Lumpur, 28 November to 1 December, 1994, 424p.
<http://www.lpcb.org/index.php/edocman-test/1994-proceedings-of-international-workshop-on-hdm-4/viewdocument> 14.12.2017
- [4] *Prozzi J.A.*: Modeling Pavement Performance by Combining Field and Experimental Data. A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering, Civil and Environmental Engineering in the Graduate Division of the University Of California, Berkeley UC, Berkeley, 2001, 126p.
<https://pdfs.semanticscholar.org/9b31/fa34492d20b5c6f49c9184e4c7d19a3e3276.pdf> 14.12.2017
- [5] *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, May, 2005, 156p.
<https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/1617/liz94338.pdf> 14.12.2017
- [6] *Ayadi A.El., Picoux B., Lefeuve-Mesgouez G., Mesgouez A., Petit C.*: An Improved Dynamic Model for the Study of a Flexible Pavement. *Advances in Engineering Software*, **44**, 1, 2012, 44-53
- [7] *Batrakov D.O., Antyufeyeva M.S., Antyufeyev A.V., Batrakova A.G.*: UWB Signal Processing During Thin Layers Thickness Assessment. 2016 IEEE Radar Methods and Systems Workshop, RMSW 2016, Proceedings, Kyiv, 2016, 36-39 (doi: 10.1109/RMSW.2016.7778545)
- [8] *Jol H. M.* (Ed.): Ground penetrating radar, theory and applications. Elsevier B.V., Amsterdam, 2009, 508p.
- [9] *Saarenketo T.*: Electrical Properties of Road Materials and Subgrade Soils and the Use of Ground Penetrating Radar in Traffic Infrastructure Surveys. Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Academic dissertation, 2006, 125p.
<http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514282221.pdf> 14.12.2017
- [10] *Evans R.D.*: Optimising Ground Penetrating Radar (GPR) to Assess Pavements. A dissertation thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of the degree Doctor of Engineering (EngD), at Loughborough University, 2009, 219p.
<http://www.lboro.ac.uk/media/wwlboroacuk/content/cice/downloads/alumnitheses/2010/robert-evans.pdf> 14.12.2017
- [11] *Pochanin G.P., Masalov S.A., Ruban V.P., Kholod P.V., Batrakov D.O., Batrakova A.G., Urdzik S.N., Pochanin O.G.*: Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying, in: *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications*. CRC Press - Taylor & Francis Group, London, 2016, 20-65
- [12] *Zieliński A., Mazurkiewicz E., Łyskowski M., Wieczorek D.*: Use of GPR Method for Investigation of the Mass Movements Development on the Basis of the Landslide in Kałków. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **15**, 1, 2016, 61-70
- [13] *Maser K., Carmichael A.*: Ground Penetrating Radar Evaluation of New Pavement Density. Final Report, WSDOT Research Office, 2015, 20p.
<https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/839.1.pdf> 14.12.2017
- [14] *Batrakova A.G., Batrakov D.O., Pochanin G.P.*: Method for detection and determination of location of cracks, with subsurface included, in asphalt-concrete pavement. Patent for Utility Model UA 81296, 2013
- [15] *Batrakov D.O., Golovin D.V., Batrakova A.G., Pochanin G.P.*: Determination of the Crack Width in One of the Layers of the Pavement Using Results of UWB GPR Probing. 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort impulse Signals, UWBUSIS-2014, Kharkiv, 15-19 Sept., 2014, 52-54
- [16] ASTM D6433-11 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, Current Edition, Approved Dec. 1, 2007

- [17] Present Serviceability Index. 30 October 2006
<http://www.pavementinteractive.org/present-serviceability-index/> 14.12.2017
- [18] *Garcia Diaz A., Riggins M.*: Serviceability and Distress Methodology for Predicting Pavement Performance. Transportation Research Record 997, TRB, National Research Council, Washington, DC., 1984, 56-61
- [19] *Haas R., Hudson R.W., Lynne C.F.*: Pavement Asset Management. John Wiley & Sons, 2015, 432p.
<https://books.google.com.ua/books?isbn=1119038820>
 14.12.2017
- [20] *Batrkov D.O., Batrkova A.G., Golovin D.V., Simachev A.A.*: Hilbert Transform Application to the Impulse Signal Processing. Proceedings of UWBUSIS-2010, Sevastopol, Ukraine, 2010, 113-115
- [21] *Batrkov D.O., Antyufeyeva M.S., Antyufeyev A.V., Batrkova A.G.*: Inverse problems and UWB signals in biomedical engineering and remote sensing. 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 5-11 Sept., 2016, Odessa, Ukraine, 148-151
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7724174/> 14.12.2017
- [22] *Batrkov D.O., Batrkova A.G., Golovin D.V.*: Numerical Simulation of UWB Impulse Response of Plane Layered Media with 2D Inclusion. 6th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, UWBUSIS-2012 Conference Proceedings, 17-21 Sept., 2012, Sevastopol, Ukraine, 153-155
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6379763/> 14.12.2017
- [23] *Batrkov D.O., Urdzik S.N., Batrkova A.G., Pochanin G.P.*: Method for Detecting Subsurface Cracks in Asphalt-Concrete Pavement During Diagnostic Laboratory Moving in a Transport Stream. Patent for Utility Model UA 108136, 2016
- [24] *Batrkov 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, **8**, 6, 1994, 759-779
- [25] *Zhuck N.P., Batrkov D.O.*: Determination of Electrophysical Properties of a Layered Structure With a Sttistically Rough Surface via an Inversion Method. Physical Review B. (Condensed Matter), **51**, 23, 1995, 17073-17080
- [26] *Batrkov D.O., Zhuck N.P.*: Solution of a General Inverse Scattering Problem Using the Distorted Born Approximation and Iterative Technique. Inverse Problems, **10**, 1, 1994, 39-54
- [27] *Batrkov D.O.*: Quality and Efficiency of Information Monitoring at Radio Wave Testing of Inhomogeneous Dielectric Layers by Using a Multifrequency Method. Defektoskopiya. (Russian Journal of Nondestructive Testing), **8**, 1998, 68-76 (in Russian)
- [28] *Batrkov D.O., Tarasov M.M.*: Algorithm of Solving Inverse Scattering Problems Using the Pontryagin Maximum Principle, Radiotekhnika i Elektronika (Journal of Communications Technology and Electronics), **44**, 2, 1999, 137-142 (in Russian)
- [29] *Madanat S., Prozzi J.A., Han M.*: Effect of Performance Model Accuracy on Optimal Pavement Design. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering. **17**, 1, 2002, 22-30
<https://trid.trb.org/view/709481> 14.12.2017
- [30] Technichni pravila remontu ta utrymannia avomobilnykh dorig zagalnogo korystuvannya Ukraini: P-G.1-218-113:2009, w: Derzhavna sluzhba avtomobilnykh dorig Ukraini (UKRAvtodor), 2009, 258p. (Pravila, in Ukrainian)
- [31] Sporudy transport. Dorojniy odyag nezhorstkogo tipu: VBN B.2.3-218-186-2004, w.: Derzhavna sluzhba avtomobilnykh dorig Ukraini (UKRAvtodor), 2005, 176p. (Vidomchi Budivelny Normy, in Ukrainian)