

УДК 625.731

ПРИМЕНЕНИЕ ЛОГИКИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

¹Беляев Д.С., ^{1,2}Кочетков А.В., ¹Янковский Л.В., ²Глухов А.Т.

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, e-mail: dmitry.belyaev@audi-perm.ru;

²ООО «Научно-исследовательский центр технического регулирования»,
Саратов, e-mail: soni.81@mail.ru;

Описывается способ применения логики нечетких множеств при оценке технического состояния дорог методом анализа спектра виброскорости при проезде автомобильного транспорта. Согласно действующим нормативным документам при проведении диагностики автомобильных дорог измеряются параметры конструкции (модуль упругости, плотность грунта, влажность грунта и т.д.) При этом количественно не нормируются трудноформализуемые параметры, такие как наличие дефектов строительства, температура окружающего воздуха, видимые повреждения и т.д. Логика нечетких множеств позволяет ускорить принятие решения с учетом качественных показателей технического состояния дорог. Выстраиваемые функции принадлежности на основе экспертных оценок позволяют принимать решение о техническом состоянии в зависимости от измеренного спектра виброскорости колебания дорожной одежды. Использование метода нечеткой логики позволяет за счет уменьшения времени на трудноформализуемых этапах диагностики технического состояния дорог и земляного полотна ускорить процесс получения необходимой информации для принятия решения; повысить качество диагностирования за счет накопленного опыта экспертов; уменьшить влияние исполнителя работ на процесс диагностики; автоматизировать систему информационно-аналитического обеспечения управления качеством дорожной сети.

Ключевые слова: логика нечетких множеств, техническое состояние дорог, диагностика

FUZZY LOGIC AS MEAN OF ROAD DIAGNOSTICS

¹Belyaev D.S., ^{1,2}Kochetkov A.V., ¹Yankovskiy L.V., ²Gluhov A.T.

¹Permianationalresearch technical university, Perm, e-mail: dmitry.belyaev@audi-perm.ru;

²Open Company «Research center of technical regulation», Saratov, e-mail: soni.81@mail.ru

Fuzzy logic as mean of road diagnostics by velocity analysis while road traffic is described. According to technical laws, road diagnostics performs by measuring of many parameters (elastic module, soil density, soil humidity and more). However, there are many other parameters what have not quantity standard (construction defects, ambient temperature, surface damages). Fuzzy logic permits to get fast solutions based on non-measuring parameters of road state. Belonging functions based on the expert notes are used for road state rating depending on spectrum velocity of pavements vibration while road traffic. Use of a method of indistinct logic allows: – At the expense of time reduction on stages of diagnostics of a technical road condition and an earthen cloth to accelerate process of reception of the necessary information for a decision-making; – To raise quality of diagnosing at the expense of the saved up experience of experts; – To reduce influence of the executor of works on diagnostics process; – To automate system of information-analytical maintenance of quality management of a high system.

Keywords: fuzzy logic, technical state of roads, diagnostics

В России в последнее время вопросам качества автомобильных дорог уделяется весьма пристальное внимание. Назрела необходимость применения новых технологий строительства, использования современных материалов. Неотъемлемой частью обеспечения качества автомобильных дорог является проведение своевременной диагностики дорожной конструкции.

Под диагностикой автомобильных дорог понимают исследование признаков и установление причин повреждений дорожных конструкций. Исследование базируется на изучении параметров состояния элементов дороги и дорожных сооружений и их изменении в ходе эксплуатации. Диагностика включает в себя три основных этапа:

- визуальная оценка параметров дороги по внешним признакам;
- инструментальное исследование дорог с помощью технических средств;

- анализ полученных диагностических данных с целью составления заключения о техническом состоянии дорог и мероприятиях по их содержанию и ремонту, включающую сбор, хранение и выдачу информации по итогам контроля.

В связи с большой протяженностью сети автомобильных дорог, не последнюю роль в современных методах диагностики играет оперативность проведения исследования и обработки полученных данных для оценки технического состояния.

Цель исследования. Основой для любой методики оценки качества является набор показателей состояния объекта исследования. Показатели качества автомобильных дорог отражены в СНиП Ш-40–78 «Автомобильные дороги. Правила производства и приемки дороги», в которые включены 23 единичных показателя качества, измеряемых инструментально, и около 20 требо-

ваний альтернативного характера. Причем для земляного полотна они являются общими, для оснований и покрытий дифференцируются по видам материалов.

Согласно существующим нормативным документам в области диагностики оценку транспортно-эксплуатационного состояния сети автомобильных дорог производят по фактическому комплексному показателю состояния дорожной сети, который косвенно учитывает показатели качества земляного полотна и дорожной одежды. Для его вычисления используют коэффициент приведения дорог разного технического уровня к эталонной дороге. Коэффициент приведения показывает, какую долю составляют потребительские свойства данной автомобильной дороги (обеспеченная скорость и осевая нагрузка) от потребительских свойств эталонной дороги. Коэффициенты приведения принимают численно равными нормативным значениям комплексного показателя состояния дорог [2].

Нагрузки от автомобилей, природные факторы, строительные дефекты приводят к появлению напряжений и деформаций, которые, постепенно накапливаясь, разрушают дорожную конструкцию. При этом в грунтах внутренних слоев дорожной конструкции происходит потеря прочности и, как следствие, – осадки и сдвиговые процессы, приводящие к провалам, ползучести слоев и осыпанию откосов земляного полотна. При деформациях и разрушениях земляного полотна неизбежно деформируется и разрушается дорожная одежда, что неизбежно сказывается на комфорте и безопасности движения.

Таким образом, объектом изучения при полноценной диагностике дороги должны служить внутренние слои дорожной одежды, т.е. грунты земляного полотна. На грунт передается и распределяется все давление от транспортных средств, и на него существенно воздействуют изменчивые природные факторы, поэтому он является весьма ответственным элементом конструкции.

Материал и методы исследования

Основными параметрами механических свойств грунтов, которые используют в расчетах дорожных конструкций на прочность, являются деформационные и прочностные характеристики: модуль упругости $E_{гр}$, коэффициент Пуассона $\mu_{гр}$, угол внутреннего трения $\varphi_{гр}$ и удельное сцепление $C_{гр}$. К основным физическим свойствам грунтов и их характеристикам относятся: удельный вес грунта γ_s , плотность грунта $\gamma_{св}$, гранулометрический состав, пористость и коэффициент пористости, влажность и степень влажности грунтов [6].

Общепринятый метод оценки качества земляного полотна – измерение прочности дорожной одежды. Для оценки прочности измеряют упругий прогиб

от расчетной нагрузки, вычисляют общий модуль упругости. На основании измерения общего модуля упругости дорожной одежды осуществляется анализ прочности всех слоев земляного полотна.

На показатели оценки состояния земляного полотна влияет большое количество факторов (температура окружающего воздуха, влажность, видимые повреждения, наличие дефектов строительства и т.д.), которые трудно учесть в числовых методах расчета, поэтому оценка состояния технического объекта является приближенной.

Изучение поведения такой сложной конструкции, как автомобильная дорога, невозможно без проведения разнообразных экспериментов. При этом далеко не всегда могут быть поставлены натурные эксперименты, зачастую они слишком дороги и требуют значительного времени, во многих случаях их проведение связано с безопасностью дорожного движения и большими материальными издержками. В таких ситуациях предпочтительнее компьютерное моделирование, которое, однако, невозможно без использования математических моделей изучаемого объекта и процессов в нем.

Математическая модель должна быть адекватной, то есть соответствовать физическому поведению конструкции в рассматриваемых условиях. Для многих технических систем и их элементов существуют весьма точные модели, которые зарекомендовали себя настолько хорошо, что зачастую удается провести процесс проектирования без обращения к натурному эксперименту. Этап испытаний изготовленных изделий (его можно рассматривать как натуральный эксперимент) необходим в основном для выявления производственных дефектов.

Иначе обстоит дело со сложными системами, где человек играет активную роль. Здесь действует так называемый принцип несовместимости: для получения существенных выводов о поведении сложной системы необходимо отказаться от высоких стандартов точности и строгости, которые характерны для сравнительно простых систем, и привлекать к ее анализу подходы, которые являются приближенными по своей природе [5].

Один из таких подходов связан с введением так называемых лингвистических переменных, описывающих неточное (нечеткое) отражение человеком состояния объекта диагностики. Коротко остановимся на понятии лингвистической переменной. Не вдаваясь в тонкости, ее можно определить как переменную, значениями (термами) которой являются не числа, а слова или предложения естественного (или формального) языка. Например, лингвистическая переменная «техническое состояние объекта» может принимать следующие значения: очень плохое, плохое, удовлетворительное, хорошее, идеальное и другие – в зависимости от требуемой степени детальности описания. Ясно, что переменная «техническое состояние объекта» будет обычной переменной, если ее значения – точные числа; лингвистической она становится, будучи использована в нечетких рассуждениях человека [3]. Для того чтобы лингвистические переменные стали полноправными математическими объектами, потребовалось расширить одно из базовых понятий математики – понятие множества. Для этого было введено определение нечеткого множества и разработана теория нечетких множеств, включившая в себя обычные множества как частный случай. Повышение эффективности оценки технического со-

состояния дороги может быть достигнуто применением правил принятия решений экспертами на основе теории нечеткой логики. В этом случае экспертные оценки представлены как нечеткие множества или числа, выраженные с помощью функций принадлежности.

С появлением нечеткой логики стало возможно подвергать количественному анализу те явления, которые раньше либо могли быть учтены только на качественном уровне, либо требовали использования весьма грубых моделей.

Результаты исследования и их обсуждение

В [1] предлагается способ оценки состояния автомобильных дорог при помощи анализа спектра виброскорости. Для генерации в дорожной конструкции колебаний используется реальная нагрузка от колес проезжающего автомобиля. Предпосылкой создания предлагаемого способа является то, что вибросигнал от конструкции содержит большое количество информации о ее техническом состоянии. В грунте, слоях и на покрытии формируется адекватный отклик на данную нагрузку, проявляющийся в затухающих колебаниях элементов. Само измерение не привязано к прямому измерению прочности, ровности т.д., а дает возможность получить оценку степени деградации свойств конструкции.

Каждому конкретному техническому состоянию дорожной конструкции будет соответствовать свой спектр виброскорости. Рост уровня виброскорости означает деградацию свойств конструкции. Если провести запись спектра виброколебаний для нового, отвечающего всем требованиям участка дороги, то мы получим некий эталон спектра. После определенного срока эксплуатации при приложении стандартизированной нагрузки можно получить спектр дороги с деградировавшими свойствами. В качестве интегрального параметра оценки предлагается использовать разницу площадей спектров эталонного и действующего состояний для данного участка дороги. В результате получаем некоторую величину, пропорциональную техническому состоянию дорожной конструкции. Назовем её «интегральный диагностический признак».

Принятие решения о техническом состоянии объекта основывается на зависимости интегрального диагностического признака от изменений фактических показателей технического состояния (прочности, ровности и т.д.) или комплекса факторов воздействий на дорогу (нагрузка, природные условия) от нормативных. Тогда интегральный диагностический признак может быть определен экспертами с использованием действующих норм и требований, а также по накопленному опыту и существующим наработкам.

При составлении эталонных зависимостей огромное значение имеют мнения экспертов, так как некоторые зависимости носят вероятностный характер. Такие зависимости называются экспертными оценками и представляются в виде функций принадлежности. Основные этапы процесса подготовки эталонных зависимостей включают в себя следующие процедуры:

- определение начальных параметров дорожной одежды и грунтов как функции технологического процесса производства (изменение в пределах допуска размеров, свойств материалов, качества изготовления, режимов работы строительных машин и другие показатели);

- установление предельно допустимых значений выходных параметров дорожной конструкции;

- оценка влияния процессов старения на выходные параметры дорожной конструкции на основе физики накопления повреждений и отказов с учетом их стохастической природы;

- оценка влияния режимов нагрузок, скоростей и условий эксплуатации на выходные параметры дорожной конструкции;

- расчет вероятности безотказной работы конструкции автомобильной дороги по каждому из параметров в функции времени;

- при анализе информации об эксплуатации дороги, для которой проводится построение функций принадлежности, производится сравнение полученных и расчетных данных и выявляются причины их расхождения.

Для построения функции принадлежности эксперты учитывают следующее:

- 1) любую конструкцию автомобильной дороги можно описать некоторым количеством независимых параметров, которые будут характеризовать дорогу, технологию ее производства и условия эксплуатации;

- 2) всегда можно выделить группу параметров, которые в наибольшей степени определяют качество дороги;

- 3) основные параметры, которые отличаются по величине у контролируемой дороги и аналога, являются параметрами сравнения.

Рассмотрим пример построения функции принадлежности интегрального диагностического признака S и принятия решения по данному показателю.

Условно считаем, что эталонная вероятностная кривая распределения диагностического признака S , построенная экспертами, будет выглядеть следующим образом (рис. 1).

Нечетким множеством на универсальном множестве S называется совокупность пар $(\mu_A^{(s)}, s)$, где $(\mu_A^{(s)})$ – степень принадлеж-

ности элемента $s \in S$ к нечеткому множеству. Степень принадлежности μ – число из диапазона $[0, 1]$. Чем выше степень принадлежности, тем в большей мере элемент универсального множества соответствует свойствам нечеткого множества. Функцией принадлежности будет функция, которая позволяет вычислить степень принадлежности произвольного элемента универсального множества S к нечеткому множеству. Если универсальное множество состоит из конечного количества элементов $S = (S_1, S_2, \dots, S_n)$, тогда нечеткое множество записывается в виде $A = \sum \frac{\mu_A^{(S)}}{S_i}$. Знак \sum означает совокупность пар $\mu_A^{(S)}$ и S .

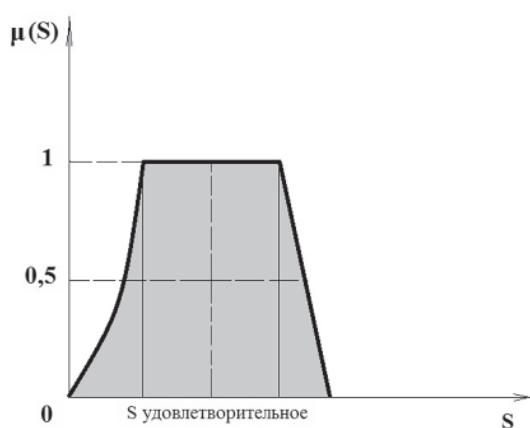


Рис. 1. Эталонная кривая распределения интегрального диагностического признака

Результаты экспериментов (измерений на реальном участке дороги) дают кривую распределения признака S для каждого отдельного участка автомобильной дороги (рис. 2).

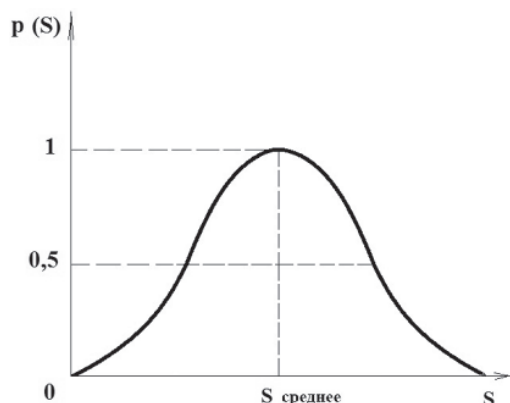


Рис. 2. Кривая распределения диагностического признака S

Для расчета оценочных коэффициентов совмещаем кривую распределения признака и эталонную кривую (рис. 3).

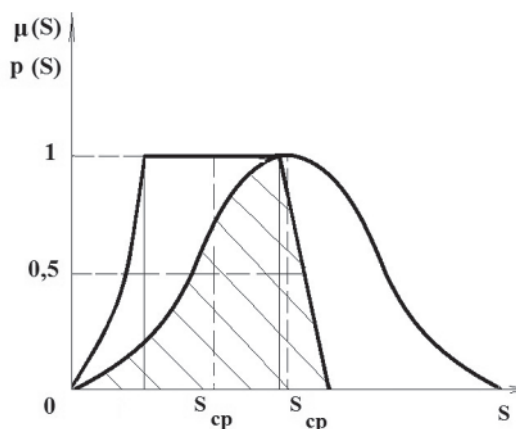


Рис. 3. Совмещенные эталонная кривая и кривая распределения

Рассчитаем коэффициент для отдельно взятого участка дороги K по формуле

$$K = \sum \mu_i(S)p(S),$$

где $p(S)$ – вероятность распределения S .

Рассчитав для каждого отдельного участка сети дорог свой коэффициент расхода, выбираем максимальный, то есть участок с самым большим значением, который будет приближен к эталонному состоянию. Это будет участок с наилучшим техническим состоянием. Его сравниваем с остальными и получаем оценочные характеристики всех отдельных участков.

Предварительный анализ позволяет задать множество классов технического состояния объекта контроля $A = A_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$)

в виде нечеткого множества $A = \sum \frac{\mu_i^A}{A_i}$ с

ответствующими функциями принадлежности μ_i^A . Оценка технического состояния объекта контроля проводится по реализации определенных параметров состояния – признаков контроля, образующих в совокупности множество $\Pi = \Pi_j$ ($j = 1, 2, \dots, m$). Соответствующая информация поступает из результатов расчета, математических моделей и т.д.

Множества A классов технического состояния и признаков контроля Π находятся между собой в определенном отношении $A \rightarrow \Pi$, которое можно представить в форме матрицы (A_p, Π_j) , т.е. каждое техническое состояние отображается в соответственном наборе признаков контроля.

Данная методика была реализована на примере автомобильных дорог общего пользования Пермского края и дорожного кольцевого стенда Московского автомобильно-дорожного государственного университета.

Выводы

Использование метода нечеткой логики позволяет [1]:

- за счет уменьшения времени на трудно-формализуемых этапах диагностики технического состояния дорог и земляного полотна ускорить процесс получения необходимой информации для принятия решения;
- повысить качество диагностирования за счет накопленного опыта экспертов;
- уменьшить влияние исполнителя работ на процесс диагностики;
- автоматизировать систему информационно-аналитического обеспечения управления качеством дорожной сети.

Список литературы

1. Беляев Д.С. Способ оценки состояния дорожных конструкций анализом спектра виброскорости при проезде транспортных средств // Строительные материалы. – 2012. – №5. – С. 68–71.
2. Евгеньев И.Е. Операционный контроль качества земляного полотна и дорожных одежд / И.Е. Евгеньев, А.Я. Тулаев, В.С. Порожняков и др. – Транспорт, 1985. – 224 с.
3. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 306 с.
4. Илиополов С.К. О разработке новых современных методов расчета и конструирования дорожных одежд / С.К. Илиополов, А.А. Ляпин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2000. – №1. – С. 40–42.
5. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. – М.: Радио и связь, 1982. – 192 с.
6. Черкасов И.И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1976. – 360 с.

References

1. Beljaev D.S. Sposob ocenki sostojanija dorozhnykh konstrukcij analizom spektra vibroskorosti pri proезде transportnykh sredstv / D.S. Beljaev // Stroitelnyematerialy. 2012. no. 5. pp. 68–71.
2. Evgenjev I.E.. Operacionnyj kontrol kachestva zemlja no gopolotna i dorozhnykh odezhd / I.E. Evgen'ev, A. Ja. Tulaev, V.S. Porozhnikov dr. Transport, 1985. 224 p.
3. Zade L. Ponjatie lingvisticheskoj peremenoj i ee primenenie k prinjatiju priblizhennykh reshenij / L. Zade. M.: Mir, 1976. 306 p.
4. Iljopolov S.K. O razrabotke novykh sovremennykh metodov rascheta i konstruirovaniya dorozhnykh odezhd / S.K. Iljopolov, A.A. Ljapin // Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli. 2000. no. 1. pp. 40–42.
5. Kofman A. V vedenie v teoriju nechetkikh mnozhestv / A. Kofman. M. : Radio isvjaz', 1982. 192 p.
6. Cherkasov I.I. Mekhanicheskie svojstva gruntov v dorozhnom stroitelstve / I.I. Cherkasov. M.: Transport, 1976. 360 p.

Рецензенты:

Овчинников И.Г., д.т.н., профессор кафедры «Транспортное строительство» Саратовского государственного технического университета, г. Саратов;

Кадыров Ж.Н., д.т.н., профессор Казахского автомобильно-дорожного института, г. Алматы;

Гилев А.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Горные машины и комплексы» ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» Министерства образования и науки РФ, г. Красноярск.

Работа поступила в редакцию 20.07.2012.