

УДК 519.6

Б.А. Бондарев, И.А. Седых, А.М. Сметанникова

Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

ОЦЕНКА ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ОКРЕСТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Окрестностные модели обобщают многие дискретные модели и применяются для представления сложных пространственно-распределенных объектов и процессов, они являются перспективным направлением для моделирования автотранспортных систем, а также таких производственных систем, как сталеплавильное производство, цементное производство, процесс очистки сточных вод и другие. В данной работе окрестностный подход применяется для моделирования износа элементов конструкций проезжей части мостовых сооружений. Даны определения таким понятиям, как мостовое сооружение, эксплуатационное требование, износ, ремонт, капитальный ремонт, представлены элементы группы мостового полотна. Описано назначение элементов мостового сооружения, приведены наиболее часто встречающиеся дефекты, которые влияют на износ и долговечность мостового сооружения, выявлен наиболее уязвимый элемент конструкции проезжей части мостового сооружения. Рассмотрены основные элементы проезжей части, связанные с интенсивностью движения транспорта. Объектом исследований является путепровод через железнодорожные пути в городе Невинномыске Ставропольского края. Целью работы является разработка окрестностной модели износа элементов мостового сооружения, позволяющей прогнозировать степень износа элементов конструкций проезжей части. Показана зависимость состояний и выходов динамической окрестностной модели в каждом узле в следующий момент времени от состояний и входов в текущий момент времени, где узлами являются участки мостового сооружения, кроме того, были введены искусственные входной и выходной узлы. Построена линейная динамическая дискретная окрестностная модель и приведены формулы для исследования рассматриваемого процесса износа элементов мостового сооружения. Посчитана средняя абсолютная ошибка идентификации, сделан вывод об адекватности построенной модели. В блоке программирования математического пакета Mathcad была разработана программа, позволяющая выполнять параметрическую идентификацию линейной динамической окрестностной модели, а также производить имитационное моделирование процесса износа элементов мостового сооружения. Работа является актуальной, так как разработанная математическая модель позволяет исследовать и осуществлять транспортно-эксплуатационное состояние мостовых сооружений, в частности, причиненный урон транспортными средствами.

Ключевые слова: транспортно-эксплуатационное состояние, мостовое сооружение, износ, динамическая линейная окрестностная модель.

B.A. Bondarev, I.A. Sedykh, A.M. Smetannikova

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

ESTIMATION OF THE TRANSPORT-OPERATIONAL CONDITION OF STRUCTURAL ELEMENTS OF THE CARRIAGEWAY OF BRIDGE CONSTRUCTIONS USING NEIGHBORHOOD MODELS

Neighborhood models generalize many discrete models and are used to represent complex spatially distributed objects and processes, they are a promising area for modeling of motor transport systems, as well as production systems such as steelmaking, cement production, wastewater treatment processes and others. In this paper, the neighborhood approach is used to model the wear of structural elements of the carriageways of bridge structures. Definitions are given to such concepts as a bridge structure, operational requirement, wear, repair, overhaul, the elements of the bridge sheet group are represented. The purpose of the elements of the bridge structure is described, the most frequently encountered defects are listed, which affect the wear and durability of the bridge structure, the most vulnerable element of the roadway structure of the bridge structure is identified. The main elements of the carriageway, connected with the traffic intensity, are considered. The object of research is the overpass through the railway tracks in the city of Nevinnomyssk, Stavropol Territory. The purpose of the work is to develop a neighborhood model of wear of the elements of the bridge structure, which allows to predict the degree of wear of the elements of the roadway structure. The dependence of the states and outputs of the dynamic neighborhood model in each node at the next instant on the states and inputs at the current time, where the nodes are the parts of the bridge structure, in addition, artificial input and output nodes have been introduced. A linear dynamic discrete neighborhood model is constructed and formulas are given for investigating the process of wear of the elements of a bridge structure. The average absolute identification error is calculated, a conclusion is made about the adequacy of the constructed model. In the programming block of the mathematical package Mathcad, a program was developed that allows parametric identification of a linear dynamic neighborhood model, as well as simulation simulation of the wear process of the elements of a bridge structure. The work is actual, as the developed mathematical model allows to investigate and carry out the transport-operational state of bridge structures, in particular, the damage caused by vehicles.

Keywords: transport-operational state, bridge structure, wear, dynamic linear neighborhood model.

Введение. Мостовое сооружение (мост, путепровод, виадук и т.д.) состоит из трех основных частей: опор, пролетных строений, проезжей части. Проезжую часть моста составляют конструкции, служащие для размещения на мосту движущихся транспортных средств, безопасного, плавного их проезда, передвижения пешеходов и защищающие все сооружение от воздействия внешней среды, а именно (рис. 1): плита проезжей части, система гидроизоляции – водоотвод, деформационные швы, въездные приспособления, дорожная одежда, тротуары и перила, барьеры безопасности, конструкции освещения и контактной сети автотранспорта, приспособления для укладки и сохранности инженерных коммуникаций, конструкции распределения полос движения, дорожные знаки [1].

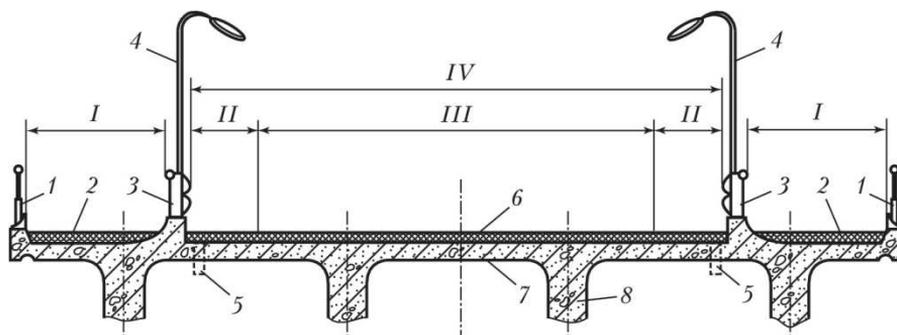


Рис. 1. Элементы проезжей части

На рис. 1 представлены: 1 – перильное ограждение, 2 – тротуарный блок, 3 – ограждение проезжей части, 4 – плита проезжей части, 5 – кабельные коммуникации, 6 – мачта освещения, 7 – водоотвод, 8 – деформационный шов, 9 – стяжка, 10 – гидроизоляция, 11 – дорожная одежда, 12 – переходные плиты.

Основное эксплуатационное требование, которое предъявляется к конструкциям проезжей части, – это требование удобства и надежности содержания этих конструкций в исправном состоянии при правильно поставленной службе эксплуатации.

Под износом понимается степень несоответствия эксплуатируемой конструкции современным требованиям (изменение потребительских или основных функций). К этим функциям могут быть отнесены: несущая способность, площадь, толщина, жесткость элемента с повреждениями и дефектами.

Группа «мостовое полотно» включает элементы:

- покрытие;
- гидроизоляция, включая выравнивающий и защитный слой;
- сопряжение моста с насыпью, включая переходные плиты и покрытие в зоне сопряжения на подходах (при отсутствии четких границ подходов – на участке длиной 10 м с каждой стороны);
- система водоотвода;
- тротуары;
- перила;
- деформационные швы;
- ограждения.

Показатель износа элемента (частный износ) определяется как процент отличия основных качеств (функций) от требуемых. Критерии оценки нарушения функций для каждого элемента свои, соответствующие назначению этого элемента.

Назначения элементов мостового сооружения:

- переходные плиты – обеспечение плавного въезда на мост;
- покрытие – обеспечение плавности и комфортности движения автомобилей;
- гидроизоляция – предотвращение попадания фильтрационной воды с ездового полотна на несущие конструкции;
- водоотвод – обеспечение безопасных условий движения и быстрого отвода воды с проезжей части полотна;
- тротуары – обеспечение безопасного прохода пешеходов;
- перила – исключение случайного падения пешеходов с моста;
- деформационные швы – создание плавного переезда с пролета на пролет и исключение попадания воды на торцы пролетных строений и опорные площадки;
- ограждения – предотвращение падения транспортных средств с моста; обеспечение безопасности пассажиров в случае наезда транспортных средств на тротуары;
- плита – непосредственное восприятие воздействия подвижной нагрузки и передача ее на основные несущие элементы.

В работе процесс износа мостового сооружения будет представлен в виде динамической линейной окрестностной модели.

1. Элементы проезжей части, их дефекты. В данной статье рассматриваются элементы проезжей части, напрямую связанные с интенсивностью движения транспорта:

- переходные плиты (строение с насыпью);
- покрытие;
- гидроизоляция;
- водоотвод;
- деформационные швы;
- плита проезжей части.

В таблице приведены наиболее часто встречающиеся дефекты, а также причины их возникновения, влияние их на долговечность мостовых строений.

Дефекты элементов конструкции моста и их последствия

№ п/п	Дефекты элементов конструкции моста, причины их возникновения	Последствия развития дефектов и их влияние на долговечность моста	Меры по ликвидации дефектов
Покрытие ездового полотна и тротуаров			
1.	Неровности дорожного полотна, наплывы, образование колеи высотой до 5–10 см вследствие низкого качества, недостаточного уплотнения асфальтобетона	Повышение динамического воздействия на несущие конструкции, сокращение сроков службы	Ремонт, полная замена покрытия
2.	Выбоины, ямы на покрытии из-за некачественного выполнения, малой толщины. песок, грязь, снег и лед, вода на ездовом полотне и тротуарах	Снижение скорости движения, повышение динамических нагрузок, сокращение долговечности искусственных сооружений	Поверхностная обработка, ямочный ремонт полотна
3.	Трещины и разрывы в асфальтобетонном покрытии над деформационными швами, ребрами жесткости, диафрагмами, стыками из-за температурных воздействий, неисправностей закрытых деформационных швов, различной жесткости элементов плиты и балок	Увеличение динамических воздействий, снижение безопасности движения и сроков службы моста	Ремонт, замена элементов деформационных швов, повышение жесткости элементов плиты.
4.	Застой – скопление воды на покрытии и под ним, замокание, вспучивание асфальтобетона вследствие несоблюдения проектных уклонов, неисправностей водоотводных трубок (забиты асфальтом, землей), неровностей защитного слоя	Разрушение покрытия, гидроизоляции, защитного слоя, снижение безопасности, долговечности пролетного строения	Ремонт покрытия и гидроизоляции, защитного слоя, восстановление уклонов, работы водоотводных трубок
Деформационные швы и гидроизоляция			
5.	Разрушение покрытия в зоне закрытых деформационных швов, отсутствие температурного зазора между торцами блоков пролетного строения, разрушение (подвижность) закладных элементов деформационных швов, ослабление прижимных элементов и фиксирующих приспособлений, разрушение лотков компенсаторов под проезжей частью и тротуарами, засорение грязью, фильтрация воды через деформационный шов	Разрушение элементов главных балок, снижение несущей способности, безопасности движения, долговечности пролетного моста	Спецобследование, ремонт деформационных швов с укреплением ослабленных элементов
6.	То же самое в деформационных швов открытого типа, кроме того, отрыв (срезание) элементов окаймления деформационных швов, креплений перекрывающих листов ввиду воздействий ударов колес проходящего транспорта	То же	Обследование технического состояния спецбригадой, разработка проекта ремонта и усиления деформационных швов
7.	Дефекты гидроизоляции и системы водоотвода: низкое качество выполнения, отсутствие или несоблюдение продольных и поперечных уклонов проезжей части, отсутствие гидроизоляции на тротуарах, слезников на консольных свесах пролетного строения и тротуарных блоках, недостаточная длина водоотводных трубок, застой и фильтрация воды через стыки	Коррозия бетона и металла пролетного строения и опор, снижение долговечности сооружения	Ремонт элементов гидроизоляции и водоотвода, обеспечение регулярного водоотвода

Система «гидроизоляция–водоотвод» является наиболее уязвимым элементом конструкции проезжей части мостового сооружения [1–8].

На рис. 2 и 3 приведены наиболее характерные дефекты и повреждения гидроизоляции мостовых сооружений.



Рис. 2. Замокание, разрушение бетона в нижней части насадки опоры с обнажением и интенсивной коррозией арматуры из-за повреждения гидроизоляции (мост через р. Липовка по ул. Фрунзе в г. Липецке)



Рис. 3. Разрушение защитного слоя бетона с оголением и коррозией арматуры в плите проезжей части из-за повреждения гидроизоляции (мост через р. Липовка по ул. Фрунзе в г. Липецке)

Объектом исследований является путепровод через железнодорожные пути в городе Невинномысске Ставропольского края. Наблюдения за износом элементов конструкций проезжей части велись с 2001 по 2017 года. Дважды за этот период элементы конструкции проезжей части подвергались ремонту и капитальному ремонту соответственно. При этом под капитальным ремонтом понимается ремонт, в процессе которого производится восстановление всех элементов с заменой изношенных конструкций, с доведением всех параметров до первоначального уровня (капитальный ремонт первого типа) или до требуемых для технической категории дороги, на которой расположено сооружение (капитальный ремонт второго типа), а под ремонтом – восстановление первоначальных транспортно-эксплуатационных характеристик и потребительских свойств сооружения с устранением всех повреждений.

2. Окрестностное моделирование процесса износа мостового сооружения. Окрестностные модели [9–14] можно представить в виде ориентированного графа. По дугам этого графа от узла к узлу передаются данные, которые представляют собой векторные значения [15].

Смоделируем процесс износа элементов мостового сооружения с помощью дискретной динамической окрестностной системы.

На рис. 4 представим граф динамической окрестностной модели [16–18] износа элементов мостового сооружения.

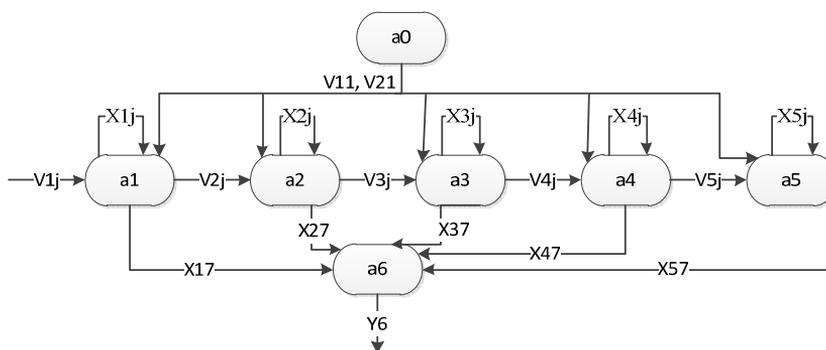


Рис. 4. Граф динамической окрестностной модели износа элементов мостового сооружения

На рис. 4 показана зависимость состояний и выходов динамической окрестностной модели [19–20] в каждом узле в следующий момент времени от состояний и входов в текущий момент времени, где $v_{ij} = x_{i-1,j}$, v_{11}, v_{21} – количество лет после ремонта и интенсивность движения соответственно.

Узлы окрестностной модели $A = \{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}$, где a_0 – узел входных данных, a_1 – узел 1-го участка моста, a_2 – узел 2-го участка моста, a_3 – узел 3-го участка моста, a_4 – узел 4-го участка моста, a_5 – узел 5-го участка моста, a_6 – узел общего износа участков моста.

В узлах x_{i1} – это износ асфальтобетонного покрытия, x_{i2} – износ деформационных швов, x_{i3} – износ водоотвода, x_{i4} – износ гидроизоляции, x_{i5} – износ плит проезжей части, x_{i6} – износ въездного приспособления.

Состояния каждого i -го промежуточного узла вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{cases} x_{ij}(t+1) = \varphi_{ij}(v_{11}(t), v_{21}(t), x_{i1}(t), \dots, x_{i6}(t), v_{i1}(t), \dots, v_{i6}(t)); \\ x_{17}(t+1) = \varphi_{i6}(x_{11}(t), \dots, x_{16}(t)); \\ \dots \\ x_{57}(t+1) = \varphi_{i6}(x_{51}(t), \dots, x_{56}(t)); \end{cases}$$

где φ_{ij} – функции пересчета состояний; $i = 1, \dots, 5$; $j = 1, \dots, 6$; $v_{ij}(t)$ – входы в момент времени t ; $x_{ij}(t)$ – состояния в момент времени t ; $x_{ij}(t+1)$ – состояния в момент времени $t+1$.

Выходы шестого узла общего износа участков моста вычисляются по формуле:

$$y_6(t) = \psi_{51}(x_{17}(t), \dots, x_{57}(t)).$$

Рассмотрим линейную динамическую окрестностную модель процесса износа элементов мостового сооружения:

$$\begin{cases} x_{ij}(t+1) = a_{i0} + a_{i1} \cdot v_{11}(t) + a_{i2} \cdot v_{21}(t) + a_{i3} \cdot x_{i1}(t) + \dots + \\ + a_{i8} \cdot x_{i6}(t) + a_{i9} \cdot v_{i1}(t) + \dots + a_{i,10} \cdot v_{i6}(t); \\ x_{17}(t+1) = a_{60} + a_{61} \cdot x_{11}(t) + \dots + a_{66} \cdot x_{16}(t); \\ \dots \\ x_{57}(t+1) = a_{10,0} + a_{10,1} \cdot x_{51}(t) + \dots + a_{10,6} \cdot x_{56}(t); \\ y_6(t) = b_{60} + b_{61} \cdot x_{17}(t) + \dots + b_{66} \cdot x_{57}(t). \end{cases}$$

Была создана программа для выполнения параметрической идентификации линейной динамической окрестностной модели в блоке программирования математического пакета Mathcad.

Входными данными в разработанной программе является обучающая выборка, выходными – параметры линейной окрестностной модели. С помощью данной программы можно осуществлять имитационное моделирование процесса износа элементов мостового сооружения.

На рис. 5 представлен график зависимости исходных и модельных данных процесса износа элементов мостового полотна для асфальтобетонного покрытия выходного узла a_6 , где x – исходные данные; x^{\wedge} – модельные данные.

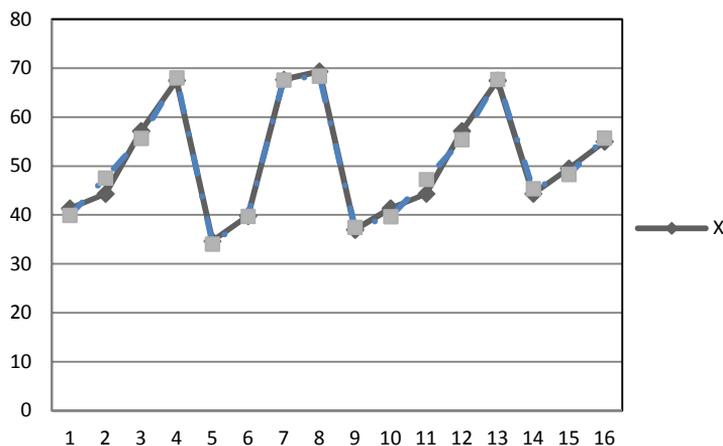


Рис. 5. График зависимости модельных и исходных данных износа асфальтобетонного покрытия выходного узла a_6

На рис. 6 показан график зависимости модельных и исходных данных износа асфальтобетонного покрытия для узла a_2 , где x – исходные данные; x^{\wedge} – модельные данные.

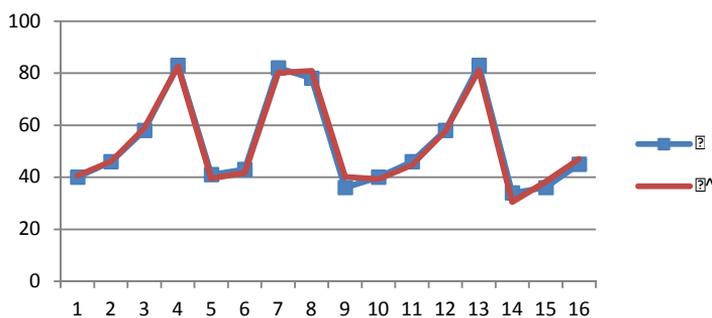


Рис. 6. График зависимости модельных и исходных данных износа асфальтобетонного покрытия узла a_2

Средняя абсолютная ошибка идентификации вычисляется по формуле:

$$A = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^N \left| \frac{\varepsilon_{ij}}{x^k_{ij}(t+1)} \right| + \sum_{k=1}^N \left| \frac{\hat{y}_6^k(t) - y_6^k(t)}{y_6^k(t)} \right| \cdot 100 \%,$$

где N – объем выборки; $\varepsilon_{ij} = x_{ij}(t+1) - \hat{x}_{ij}(t+1)$, $i = 1, \dots, 5$; $j = 1, \dots, 7$; $x^k_{ij}(t+1), y^k_6(t)$ – исходные данные системы; $\hat{x}^k_{ij}(t+1), \hat{y}^k_6(t)$ – модельные данные.

Выводы. По результатам моделирования была получена средняя абсолютная ошибка идентификации для состояний процесса износа элементов мостового сооружения $A = 1,37\%$, что свидетельствует об адекватности модели. Таким образом, линейную дискретную динамическую окрестностную модель можем рекомендовать для прогнозирования износа элементов мостового полотна. Также с помощью разработанной программы в математическом пакете Mathcad можно осуществлять прогноз транспортно-эксплуатационного состояния элементов мостового сооружения без фактического выезда на объект при наличии ранее собранных данных состояния конструкций.

Библиографический список

1. Лившиц Я.Д., Виноградский Д.Ю., Руденко Ю.Д. Автодорожные мосты (Проезжая часть). – Киев: Будівельник, 1980. – 160 с.
2. СНиП 3.06.07-86. Мосты и трубы. Правила обследования и испытаний. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988.
3. СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
4. СНиП 2.05.03-84* «Мосты и трубы» // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
5. СНиП 3.06.04-91 «Мосты и трубы» // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
6. ОДМ 218.4.001-2008. Методические рекомендации по организации обследования и испытания мостовых сооружений на автомобильных дорогах. – М., 2008. – 120 с.
7. ОДМ 218.3.014-2011. Методика оценки технического состояния искусственных сооружений на автомобильных дорогах // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
8. ОДН 218.0.017-03. Руководство по оценке транспортно-эксплуатационного состояния искусственных сооружений // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
9. Окрестностное моделирование процесса очистки сточных вод / А.М. Шмырин, И.А. Седых, А.М. Сметанникова, Е.Ю. Никифорова // Вестник ТГУ. Сер. Естественные и технические науки. – 2017. – Т. 22. – Вып. 3. – С. 596–604.

10. Седых И.А., Сметанникова А.М. Проверка устойчивости линейных динамических окрестностных моделей процесса очистки сточных вод // *Материалы областного профильного семинара «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук (17 ноября 2017 г.)*. – Липецк, 2017. – С. 125–129.

11. Седых И.А., Сметанникова А.М. Критерий Гурвица для проверки устойчивости линейных динамических окрестностных моделей процесса очистки сточных вод // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. – Пенза: Изд-во Пензен. гос. техн. ун-та, 2018. – С. 67–71.

12. Седых И.А., Сметанникова А.М. Применение пакета MatLab для параметрической идентификации окрестностных моделей на основе генетических алгоритмов // *Вестник ВГУ. Сер. Системный анализ и информационные технологии*. – Воронеж, 2017. – С. 24–29.

13. Седых И.А. Управление динамическими окрестностными моделями с переменными окрестностями // *Системы управления и информационные технологии*. – 2018. – № 1(71). – С. 18–23.

14. Седых И.А., Сметанникова А.М. Параметрическая идентификация окрестностной модели с помощью генетического алгоритма и псевдообращения // *Интерактивная наука*. – 2017. – Т. 4. – Вып. 14. – С. 113–116.

15. Shmyrin A., Sedykh I. Neural Networks Neighborhood Models // *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*. – 2016. – Vol. 12, № 6. – P. 5039–5046.

16. Седых И.А., Сметанникова А.М. Применение генетических алгоритмов для параметрической идентификации линейных и нелинейных динамических окрестностных моделей // *Летняя школа молодых ученых ЛГТУ – 2017: сб. науч. тр. науч.-практ. конф. студ. и аспирантов*. Липецк. гос. техн. ун-та. – Липецк, 2018. – С. 44–47.

17. Shmyrin A., Sedykh I. A Measure of the Non-Determinacy of a Dynamic Neighborhood Model // *Systems*. – 2017. – 5(49). DOI: 10.3390/systems5040049

18. Shmyrin A., Sedykh I. Identification and control algorithms of functioning for neighborhood systems based on petri nets // *Automation and Remote Control*. – 2010. – Vol. 71, № 6. – P. 1265–1274.

19. Шмырин А.М., Мишачёв Н.М. Окрестностные системы и алгоритм Качмажа // *Вестник Тамбов. ун-та. Сер. Естественные и технические науки*. – 2016. – Т. 21. – Вып. 6. – С. 2113–2120.

20. Седых И.А. Окрестностные производственные сети // XVII Международные научные чтения (памяти В.К. Зворыкина): сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 1 ноября 2017 г.). – М.: ЕФИР, 2017. – С. 16–19.

References

1. Livshits Ia.D., Vinogradskii D.Iu., Rudenko Iu.D. Avtodorozhnye mosty (proezzhaia chast') [Road bridges (Roadway)]. Kiev: Budivel'nik, 1980. 160 p.

2. SNiP 3.06.07-86. Mosty i truby. Pravila obsledovaniia i ispytanii [Bridges and pipes. Inspection and test rules]. Moscow: TSITP Gosstroia SSSR, 1988.

3. SP 35.13330.2011 “Mosty i truby” [Bridges and pipes]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

4. SNiP 2.05.03-84* “Mosty i truby” [Bridges and pipes]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

5. SNiP 3.06.04-91 “Mosty i truby” [Bridges and pipes]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

6. ODM 218.4.001-2008. Metodicheskie rekomendatsii po organizatsii obsledovaniia i ispytaniia mostovykh sooruzhenii na avtomobil'nykh dorogakh [Methodical recommendations on the organization of inspection and testing of bridge structures on highways]. Moscow, 2008. 120 p.

7. ODM 218.3.014-2011. Metodika otsenki tekhnicheskogo sostoiianiia iskusstvennykh sooruzhenii na avtomobil'nykh dorogakh [Method for assessing the technical state of artificial structures on highways]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

8. ODN 218.0.017-03. Rukovodstvo po otsenke transportno-ekspluatatsionnogo sostoiianiia iskusstvennykh sooruzhenii [Guidance on the assessment of the transport-operational state of man-made structures]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

9. Shmyrin A.M., Sedykh I.A., Smetannikova A.M., Nikiforova E.Iu. Okrestnostnoe modelirovanie protsessa ochistki stochnykh vod [Surrounding modeling of sewage treatment process]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2017, vol. 22, iss. 3, pp. 596-604.

10. Sedykh I.A., Smetannikova A.M. Proverka ustoichivosti lineinykh dinamicheskikh okrestnostnykh modelei protsessa ochistki stochnykh vod [Verification of the stability of linear dynamic neighborhood models of wastewater treatment]. *Materialy oblastnogo profil'nogo seminara “Shkola*

molodykh uchenykh” po problemam tekhnicheskikh nauk (17 November 2017). Lipetsk, 2017, pp. 125-129.

11. Sedykh I.A., Smetannikova A.M. Kriterii Gurvitsa dlia proverki ustoichivosti lineinykh dinamicheskikh okrestnostnykh modelei protsessa ochistki stochnykh vod [[Hurwitz criterion for testing the stability of linear dynamic neighborhood models of wastewater treatment]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoiashchego plius*. Penza: Penzenskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet, 2018, pp. 67–71.

12. Sedykh I.A., Smetannikova A.M. Primenenie paketa MatLab dlia parametriceskoi identifikatsii okrestnostnykh modelei na osnove geneticheskikh algoritmov [Application of the MatLab package for parametric identification of neighborhood models based on genetic algorithms]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii*. Воронеж, 2017, pp. 24-29.

13. Sedykh I.A. Upravlenie dinamicheskimi okrestnostnymi modeliami s peremennymi okrestnostiami [Control of dynamic neighborhood models with variable neighborhoods]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii*, 2018, no. 1(71), pp. 18-23.

14. Sedykh I.A., Smetannikova A.M. Parametriceskaia identifikatsiia okrestnostnoi modeli s pomoshch'iu geneticheskogo algoritma i psevdobrashcheniia [Parametric identification of the neighborhood model by means of a genetic algorithm and pseudo-inversion]. *Interaktivnaia nauka*, 2017, vol. 4, iss. 14, pp. 113-116.

15. Shmyrin A., Sedykh I. Neural Networks Neighborhood Models. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2016, vol. 12, no. 6, pp. 5039-5046.

16. Sedykh I.A., Smetannikova A.M. Primenenie geneticheskikh algoritmov dlia parametriceskoi identifikatsii lineinykh i nelineinykh dinamicheskikh okrestnostnykh modelei [Application of genetic algorithms for the parametric identification of linear and nonlinear dynamic neighborhood models]. *Sbornik nauchnykh trudov naucho-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov “Letniia shkola molodykh uchenykh LGTU - 2017”*. Lipetskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. Lipetsk, 2018, pp. 44-47.

17. Shmyrin A., Sedykh I. A Measure of the Non-Determinacy of a Dynamic Neighborhood Model. *Systems*, 2017, 5(49). DOI: 10.3390/systems5040049

18. Shmyrin A., Sedykh I. Identification and control algorithms of functioning for neighborhood systems based on petri nets. *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71, no. 6, pp. 1265-1274.

19. Shmyrin A.M., Mishachev N.M. Okrestnostnye sistemy i algoritm Kachmazha [Surrounding systems and Kachmazh's algorithm]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2016, vol. 21, iss. 6, pp. 2113-2120.

20. Sedykh I.A. Okrestnostnye proizvodstvennye seti [Neighboring production networks]. *XVII Mezhdunarodnye nauchnye chteniia (Pamiati V.K. Zvorykina). Sbornik statei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Moscow, 1 November 2017)*. Moscow: EFIR, 2017, pp. 16-19.

Сведения об авторах

Бондарев Борис Александрович (Липецк, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные материалы» Липецкого государственного технического университета (398055, Липецк, ул. Московская, 30, e-mail: LNSP-48@mail.ru).

Седых Ирина Александровна (Липецк, Россия) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Липецкого государственного технического университета (398055, Липецк, ул. Московская, 30, e-mail: sedykh-irina@yandex.ru).

Сметанникова Анастасия Михайловна (Липецк, Россия) – студентка Липецкого государственного технического университета (398055, Липецк, ул. Московская, 30, e-mail: n.smetannickowa@yandex.ru).

About the authors

Bondarev Boris Aleksandrovich (Lipetsk, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Building Materials Lipetsk State Technical University (398055, Lipieczk, 30, Moskovskaya ave., e-mail: LNSP-48@mail.ru).

Sedykh Irina Aleksandrovna (Lipetsk, Russian Federation) is a Ph.D. in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor Department of Higher Mathematics Lipetsk State Technical University (398055, Lipieczk, 30, Moskovskaya ave., e-mail: sedykh-irina@yandex.ru).

Smetannikova Anastasiya Mikhaelovna (Lipetsk, Russian Federation) is a Student Lipetsk State Technical University (398055, Lipieczk, 30, Moskovskaya ave., e-mail: n.smetannickowa@yandex.ru).

Получено 08.10.2018