

УДК 625.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ СРЕДСТВАМИ ТЕОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН

ЕРШОВА Н. М.^{1*}, *д. т. н., проф.*,
БОНДАРЕНКО И. А.^{2*}, *д. т. н., доцент.*

^{1*} Кафедра «Прикладная математика и информационные технологии». Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (0567) 56-34-10, e-mail: prmat@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-1726-0557.

^{2*} Кафедра «Путь и путевое хозяйство». Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. ул. Лазаряна, 2, 49005, Днепр, Украина, тел. +38 (056) 373-15-42, e-mail: irina_bondarenko@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-4717-3032.

Аннотация. *Цель* авторов статьи расширить возможности получения информации касательно деформации элементов конструкции железнодорожного пути под динамической нагрузкой подвижного состава и определить параметры колебательного процесса системы «экипаж-путь». Современные подходы оценки указанных колебательных процессов изучают только колебания при наличии неровностей железнодорожного пути и не учитывают деформативность железнодорожного пути, что не позволяет учитывать динамику физического процесса колебаний. Возникает необходимость формирования основной концепции рассмотрения данного вопроса с использованием основных положений теории распространения упругих волн, для получения в дальнейшем зависимостей параметров колебательного процесса системы «экипаж-путь». **Методика.** Для достижения цели использованы принципы теории упругости и распространения волнового процесса при описании взаимодействия пути и подвижного состава. **Результаты.** Установлены основные физико-конструктивные условия, на основе которых необходимо проводить моделирование работы элементов железнодорожного пути и подвижного состава для исследования параметров колебательного процесса системы «экипаж-путь». **Научная новизна.** Исследование вопросов динамической нагруженности железнодорожного пути мотивирует разработку новых моделей, которые позволяют рассматривать колебательный процесс системы «экипаж-путь». Существует необходимость определения основных физико-конструктивных условий для составления расчетных схем, на основе которых возможны оценка и прогнозирование изменения параметров колебательного процесса, учитывающего изменение состояний пути под динамической нагрузкой подвижного состава. В работе предложены основные физико-конструктивные принципы составления расчетных схем элементов железнодорожного пути, при которых при рассмотрении четырехмерного пространства: изменения объема во времени. **Практическая значимость.** Одним из главных факторов невозможности применения аналитических моделей, применяемых при определении параметров прочности и устойчивости пути, является квазидинамичный подход. Поэтому, как правило, получают и исследуют не динамический процесс работы железнодорожного пути, а его последствия. Кроме того, такие модели относятся к плоским, что также добавляет определенную сложность при сравнении результатов с экспериментом. Применение численных методов расширяет возможности, но также делает невозможным рассмотрение самого динамического процесса, ибо невозможно ввести процессы, обуславливающие реакцию на нагрузку. Поэтому предложенные основные физико-конструктивные подходы при моделировании позволяют рассматривать непосредственно динамический процесс, локализованный как во времени, так и в пространстве.

Ключевые слова: моделирование; параметры колебательного процесса системы «экипаж-путь»; деформативность пути; волновое распространение, перемещения пути

МОДЕЛЮВАННЯ КОЛИВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ЗАСОБАМИ ТЕОРІЇ ПОШИРЕННЯ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ

ЕРШОВА Н. М.^{1*}, *д. т. н., проф.*,
БОНДАРЕНКО І. О.^{2*}, *д. т. н., доцент.*

^{1*} Кафедра «Прикладна математика та інформаційні технології». Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0567) 56-34-10, e-mail: prmat@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-1726-0557.

^{2*} Кафедра «Колія та колійне господарство». Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. вул. Лазаряна, 2, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-42, e-mail: irina_bondarenko@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-4717-3032.

Анотація. *Мета* авторів статті розширити можливості отримання інформації щодо деформації елементів конструкції залізничної колії під динамічним навантаженням рухомого складу і визначити параметри коливального процесу системи «екіпаж-колія». Сучасні підходи оцінки зазначених коливальних процесів вивчають тільки коливання при наявності нерівностей залізничної колії і не враховують деформативність залізничної колії, що не дозволяє враховувати динаміку

фізичного процесу коливальних. Виникає необхідність формування основної концепції розгляду даного питання з використанням основних положень теорії поширення пружних хвиль, для отримання в подальшому залежностей параметрів коливального процесу системи «екіпаж-колія». **Методика.** Для досягнення мети використані принципи теорії пружності і поширення хвильового процесу при описі взаємодії колії та рухомого складу. **Результати.** Встановлено основні фізико-конструктивні умови, на основі яких необхідно проводити моделювання життєвого циклу роботи елементів залізничної колії для дослідження параметрів коливального процесу системи «екіпаж-шлях». **Наукова новизна.** Дослідження питань динамічної навантаженості залізничної колії мотивує розробку нових моделей, які дозволяють розглядати коливальний процес системи «екіпаж-колія». Існує необхідність визначення основних фізико-конструктивних умов для складання розрахункових схем, на основі яких можливі оцінка і прогнозування зміни параметрів коливального процесу, що враховує зміну станів колії під динамічним навантаженням рухомого складу. В роботі запропоновані основні фізико-конструктивні принципи складання розрахункових схем елементів залізничної колії, при яких при розгляді чотиривимірного простору: зміни обсягу в часі. **Практична значимість.** Одним з головних чинників неможливості застосування аналітичних моделей, що застосовуються при визначенні параметрів міцності і стійкості колії, є квазідинамічний підхід. Тому, як правило, отримують і досліджують не один динамічний процес роботи залізничної колії, а його наслідки. Крім того, такі моделі відносяться до плоских, що також додає певні складності при порівнянні результатів з експериментом. Застосування чисельних методів розширює можливості, але також робить неможливим розгляд самого динамічного процесу, оскільки неможливо ввести процеси, які обумовлюють реакцію на навантаження. Тому запропоновані основні фізико-конструктивні підходи при моделюванні дозволяють розглядати безпосередньо динамічний процес, локалізований як у часі, так і в просторі.

Ключові слова: моделювання; параметри коливального процесу системи «екіпаж-колія»; деформативність колії; хвильове поширення, переміщення колії

MODELING OF VIBRATIONAL PROCESSES BY MEANS OF THE THEORY OF ELASTIC WAVE DISTRIBUTION

ERSHOVA N. M. ^{1*}, *Dr. Sc. (Tech), prof.*,

BONDARENKO I. A. ^{2*}, *Dr. Sc. (Tech), associate professor.*

^{1*} Department of Applied Mathematics and Information Technology. State Higher Educational Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevsky, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0567) 56-34-10, e-mail: prmat@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-1726-0557.

^{2*} Department "Path and track economy". Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan. ul. Lazaryan, 2, 49005, Dnipro, Ukraine, tel +38 (056) 373-15-42, e-mail: irina_bondarenko@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-4717-3032.

Annotation. The *Purpose* of the authors of the article is to expand the possibilities of obtaining information on the deformation of railroad track construction elements under the dynamic load of the rolling stock and to determine the parameters of the oscillating process of the "crew-way" system. Modern approaches to the assessment of these oscillatory processes study only the variations in the presence of roughness of the railway track and do not take into account the deformability of the railway track, which does not allow for the dynamics of the physical process of oscillations. There arises the need to formulate the basic concept of considering this issue using the basic principles of the theory of propagation of elastic waves, in order to obtain later dependences of the parameters of the oscillating process of the "crew-path" system. **Methodology.** To achieve the goal, the principles of the theory of elasticity and propagation of the wave process are used in describing the interaction of the track and the rolling stock. **Findings.** The basic physico-constructive conditions are established, on the basis of which it is necessary to carry out the modeling of the life cycle of the elements of the railway track for studying the parameters of the oscillating process of the "crew-way" system. **Originality.** The study of the issues of dynamic loading of the railway path motivates the development of new models that allow us to consider the oscillating process of the "crew-way" system. There is a need to determine the basic physico-constructive conditions for the compilation of design schemes on the basis of which it is possible to estimate and predict the change in the parameters of the oscillatory process, taking into account the change in the state of the path under the dynamic load of the rolling stock. The basic physical-constructive principles of computation of computational schemes of railroad track elements are offered in the work, when considering the four-dimensional space: volume changes in time. **Practical value.** Analytical models applied in determining the parameters of strength and resistance lines, fully satisfy the task, but cannot be used to determine the parameters of track reliability. One of the main impossibility factors of these models is quasidynamic approach. Therefore, as a rule, receive and examine not only dynamic process of a railway track, but also its consequences. Besides, these models are related to flat ones, and it also adds some complexity in results comparing with an experiment, as well as the process is not easy to distinguish the impact of volume in its limited parts. The use of numerical methods extend the possibilities, and it also make it impossible for the consideration of the dynamic process, as well as it is impossible to introduce processes, causing the reaction to stress load. Thus the basic physical and constructive approaches in modeling make it possible to consider the dynamic process of localized both in time and in space directly.

Keywords: modeling; parameters of the oscillating process of the "crew-way" system; deformability of the path; wave propagation.

Введение

Железнодорожный транспорт Украины является ведущей отраслью в транспортно-дорожном комплексе страны, который обеспечивает 58% грузооборота и 36% пассажирооборота страны. Сейчас большей частью элементов инфраструктуры железных дорог практически исчерпан технический ресурс по причине большой степени физического износа и отклонения от необходимого объема проведения регламентных ремонтных и восстановительных работ, что ставит под угрозу их дальнейшее эффективное и безопасное функционирование.

В рамках концепции дальнейшего развития железнодорожного транспорта Украины предусмотрено соблюдение межгосударственных стандартов Европейского Сообщества. В Директиве 2008/57/ЕСИ указано «Существуют существенные различия между национальными регламентами и внутренними правилами, техническими спецификациями, которые применяются на железных дорогах, поскольку они включают технологии, которые являются специфическими для отраслей промышленности, и предусматривают специальные размеры, приборы и характеристики ... В частности необходимо установить четкую границу между стандартами или частями стандартов, которые должны быть обязательными для достижения целей настоящей Директивы, и «гармонизированным» стандартам, которые были разработаны в духе нового подхода к технической гармонизации и стандартизации». Согласно Директиве 2004/49/ЕС «Национальные правила безопасности», которые часто базируются на национальных технических стандартах, должны постепенно заменяться правилами, основанными на общих стандартах, установленными техническими стандартами эксплуатационной совместимости. Введение новых особых национальных правил, не базирующихся на таких общих стандартах, должно сводиться к минимуму. Новые национальные правила должны соответствовать законодательству Сообщества и облегчать переход к общему подходу к безопасности на железной дороге». Таким образом, появилась необходимость в разработке механизма приведения нормативной базы, примененной на транспорте в Украине, законодательству Сообщества, о чем указано в «Транспортной стратегии Украины на период до 2020 года», утвержденной Распоряжением Кабинета Министров Украины № 2174-р от 20.10.2010 г. В связи с этим основным направлением совершенствования нормативной базы на железнодорожном транспорте Украины за последние годы стал учет реального технического состояния элементов инфраструктуры и подвижного состава с безусловным соблюдением требований безопасности движения. Оценка показателей безопасной эксплуатации конструкций магистрального и промышленного железнодорожного пути, как подсистемы железнодорожного транспорта, должна

базироваться на соблюдении требований по ее надежной и функционально безопасной работе. Отсутствие методов и критериев оценки и прогнозирования работы пути под влиянием подвижного состава с учетом долговечности и уровня полноты безопасности взаимодействия пути и подвижного состава требует проведения дополнительного научного исследования.

При исследовании необходимо учесть работу пути под динамической нагруженностью от подвижного состава. Однако отсутствует сама концепция создания динамических моделей, учитывающих динамическую деформативность железнодорожного пути и его реакцию во времени под воздействием подвижного состава с динамической нагрузкой от подвижного состава.

Решение задачи по созданию математической модели, которая описывает колебательный процесс системы «экипаж-путь», позволит найти решения в вопросах устройства и содержания железнодорожного пути с учетом требований функциональной безопасности; создания комплексов диагностики для контроля качества пути с учетом влияния нагрузок и скоростей движения на исследуемом участке пути; определения демпфирующих характеристик самого подвижного состава и приборов защиты технических и биологических объектов от вибраций при проходе подвижного состава.

Цель

Определение основных физико-конструктивных условий при моделировании колебательного процесса системы «экипаж-путь» с учетом работы элементов железнодорожного пути под динамическим воздействием подвижного состава, для исследования функционально безопасных условий работы системы «экипаж-путь», как основы создания методов и критериев оценки и прогнозирования работы пути под влиянием подвижного состава с учетом долговечности и уровня полноты безопасности взаимодействия пути и подвижного состава.

Методика

Вопросы динамики движения рельсовых экипажей исследовались многими учеными, при этом предложены различные расчётные схемы экипажей, изучены вопросы математического описания возмущений, действующих на экипаж [1-3, 5-9]. Причинами колебаний экипажей являются различные несовершенства железнодорожного пути и экипажа. Но основная проблема при исследовании динамического поведения пути и подвижного состава состоит в том, что изучение таких явлений требует точного определения геометрии пути. Она должна отражать не только представление о плане и профиле железнодорожного пути, а также состоянии колес и рельсов, но и давать описание неровностей,

имеющих место, как в ненагруженном состоянии пути, так и возникающих при движении подвижного состава, включая деформации за счет элементов конструкции пути и наличие люфтов в конструкции пути.

При решении задач, посвящённых динамике движения рельсовых экипажей, используют два разных подхода, которые описывают геометрию железнодорожного пути в модели взаимодействия подвижного состава и пути. Первый представляет задание траектории при движении экипажей в виде абсолютных измеренных значений. Второй подход состоит из введения неровностей железнодорожного пути в виде стохастических данных.

При первом подходе, неровности конечных отрезков пути описывают функциями с конкретными параметрами. Так описываются вертикальные, горизонтальные и продольные неровности пути.

При втором подходе, неровности пути описываются амплитудно-частотными характеристиками по длине пути, учитывающими статистические параметры неровностей, полученных при проведении экспериментов. Таким образом, получают амплитудно-частотные параметры, эквивалентные исходным характеристикам.

При решении задач, посвящённых определению напряженно-деформированного состояния пути, неровности пути учитываются дополнительным силовым воздействием от колеса на рельс в виде среднеквадратического отклонения динамической нагрузки колеса на рельс. При известной балловой оценки состояния пути или известными геометрическими характеристиками неровностей пути по записям путеизмерительного вагона, рассчитывают средний уклон одиночной неровности, характеризующий указанную силовую добавку воздействия подвижного состава на путь.

Таким образом, использование существующих моделей расчетов пути (использующих основные положения теории упругости), при решении задачи посвящённой динамике движения рельсовых экипажей, невозможно. Что объясняется тем, что не изучен механизм формирования неровностей пути, при восприятии нагрузки от подвижного состава учитывающий деформацию элементов конструкции пути в зависимости от их совокупного состояния, характеризующий статистические параметры и пространственный спектр динамических неровностей железнодорожного пути.

Данный вопрос может быть решен при использовании в моделях расчета пути не только основных положений теории упругости, но и теории распространения упругих волн. Последняя позволяет определять изменения, происходящие в элементах конструкции пути в зависимости от интенсивности и скорости влияния экипажей на путь, времени воздействия силовой нагруженности в элементах конструкции пути, физико-механических и геометрических характеристик элементов конструкции пути [4]. Что характеризует как

процессы непосредственного восприятия элементами конструкции пути воздействия подвижного состава, так и реакцию пути на него.

Поскольку развитие моделей по расчету динамических показателей рельсового экипажа и деформативности железнодорожного пути под воздействием подвижного состава происходило не согласованно, существует необходимость координирования получения исходных и выходных данных для решения общей задачи.

Исходными данными для расчета деформативности железнодорожного пути со стороны подвижного состава являются:

- траектория движения колес вдоль рельсов;
- состояния колес и рельсов;
- зазоры между колесом и рельсом по траектории;
- параметры контактных площадок по траектории;
- силы, передаваемые от колеса на рельс в моменты контакта;
- скорость движения подвижного состава.

Указанные исходные данные формируют следующие исходные данные для подвижного состава:

- реакционные силы, передаваемые от пути подвижному составу;
- амплитудно-частотные параметры колебания колес в вертикальной и горизонтальной плоскости;
- амплитудно-частотные параметры колебания вагонов, вызванные колебаниями колес;
- реакционные связи между вагонами.

Перечисленные параметры вносят корректировку в исходные данные для расчета деформативности пути. Таким образом, первоочередной задачей при решении вопросов о нахождении динамических параметров взаимодействия железнодорожного пути и подвижного состава является координация данного процесса по времени с учетом времени распространения данного процесса как в элементах конструкции подвижного состава, так и в элементах конструкции пути.

Решение указанной проблемы возможно только с использованием основных положений теории распространения упругих волн.

Задача решается только при рассмотрении начала движения подвижного состава из положения покоя, которое характеризуется статическими параметрами. Процессы происходящие в элементах конструкций подвижного состава и пути при малых скоростях сопоставимы со статическими процессами. Процесс набирания скорости подвижного состава становится более ощутимым по значениям амплитудно-частотных параметров, при движении подвижного состава свыше 12 км/час.

Таким образом, для решения первого этапа необходимо:

- наличие трехмерных геометрических моделей элементов конструкции пути и подвижного состава, аналогичных при задании в расчетах методом конечных элементов;

- формирование геометрии процессов распространения упругих волн в твердых телах по направлениям во времени в элементах конструкций пути и экипажа с учетом их свойств;

- задание указанных выше исходных данных для определения деформативности железнодорожного пути;

- определение исходных данных для возмущений, действующих на подвижной состав со стороны железнодорожного пути во времени;

- определение реакции подвижного состава на путь для корректировки исходных данных по определению деформативности пути.

Результаты

Установлены основные физико-конструктивные условия, на основе которых необходимо проводить моделирование работы элементов железнодорожного пути и подвижного состава для исследования параметров колебательного процесса системы «экипаж-путь».

Научная новизна и практическая значимость

Исследование вопросов динамической нагруженности железнодорожного пути мотивирует разработку новых моделей, которые позволяют исследовать колебательный процесс системы «экипаж-путь». Существует необходимость определения основных физико-конструктивных условий для составления расчетных схем, на основе которых возможны оценка и прогнозирование изменения параметров колебательного процесса, учитывающего изменение состояний пути под динамической нагрузкой подвижного состава. В работе предложены основные физико-конструктивные принципы составления расчетных схем элементов железнодорожного пути: рассмотрение четырехмерного пространства – изменения объема во времени.

Одним из главных факторов невозможности применения аналитических моделей, применяемых при определении параметров прочности и устойчивости пути, является квазидинамичный подход. Поэтому, как правило, получают и исследуют не динамический процесс работы железнодорожного пути, а его последствия. Кроме того, такие модели относятся к плоским, что также добавляет определенные сложности при сравнении результатов с экспериментом. Применение численных методов расширяет возможности, но также делает невозможным рассмотрение самого динамичного процесса, ибо невозможно ввести процессы, обуславливающие реакцию на нагрузку. Поэтому предложенные основные физико-конструктивные подходы при моделировании позволяют рассматривать непосредственно

динамический процесс, локализованный как во времени, так и пространстве.

Выводы

Осведомленность в процессах взаимодействия пути и подвижного состава приводит к рассмотрению новых задач. Одним из новых аспектов этого процесса является решение задач по оценке показателей безопасного взаимодействия пути и подвижного состава, базирующихся на соблюдении требований по их надежной работе при взаимодействии. Составной частью надежности взаимодействия пути и подвижного состава является функциональная безопасность. Таким образом, направление исследований является актуальным, но требующим нового подхода при решении поставленной проблемы, в котором нельзя применять существующие модели.

Исследование развития физико-математических методов решения задач по определению напряженно-деформированного состояния в механике деформируемого твердого тела позволили выбрать метод решения поставленной задачи. Таким методом является метод распространения упругих волн.

Анализ работы конструкции пути помог определить:

- предпосылки для составления расчетных схем конструкций пути и подвижного состава;

- необходимость координации процессов распространения нагруженности в элементах конструкций пути и подвижного состава с учетом времени распространения данного процесса;

- исходные данные для расчета деформативности железнодорожного пути со стороны подвижного состава;

- необходимость наличия трехмерных геометрических моделей элементов пути и подвижного состава;

- корректировки, которые необходимо применять для рассмотрения динамического колебательного процесса взаимодействия пути и подвижного состава;

- необходимость формирования геометрии процессов распространения упругих волн в твердых телах по направлениям во времени в элементах конструкций пути и экипажа с учетом их свойств.

На базе вышеуказанного разработан алгоритм проведения исследований, т. е. полный комплекс моделирования работы элементов железнодорожного пути и подвижного состава для определения параметров колебательного процесса системы «экипаж-путь» для обеспечения надежности и безопасности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ершова Н. М. Современные методы теории проектирования и управления сложными динамическими системами: монография / Н.М. Ершова. Днепропетровск: ПГАСА, 2016. - 272 с.
2. Ушкалов В. Ф. Расчетные возмущения для оценки динамических качеств грузовых вагонов / В. Ф.Ушкалов, Л. Г.Лапина, И. А. Машенко // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2013. №4 (46). – С.135-144.
3. A structural articulation method for assessing railway bridges subject to dynamic impact loading from track irregularities / G. Gu , D. M. Lilley & F. J. Franklin // Vehicle System Dynamics Vol. 48, 2010 - Issue 10, pp. 1077-1095.
4. Bondarenko I. Development of algorithm for calculating dynamic processes of railroad track deformability work / I. Bondarenko. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – №6/7(84). – С. 28–36.
- 5 Effect of track irregularities on the dynamic behavior of a tram vehicle / . Liang Ling, Yongquan Deng, Qinghua Guan, Xuesong Jin // Journal of Advances in Vehicle Engineering, Vol 3, No 1 (2017), pp. 29 – 39.
6. Influence of long-wavelength track irregularities on the motion of a high-speed train /C. F. Hung & W. L. Hsu // Vehicle System Dynamics, Issue 7 (2015), pp. 1 – 18.
7. Pombo, J. An alternative method to include track irregularities in railway vehicle dynamic analyses / J. Pombo, J. Ambrósio. // Nonlinear Dynamics Vol. 68, Issue 1–2 (2012), pp 161–176.
8. S. Sezer, Dynamic modeling and fuzzy logic control of vibrations of a railway vehicle for different track irregularities Simulation / Sezer S., Atalay A.E// Modelling Practice and Theory Vol. 19, Issue 9, October 2011, pp 1873-1894.
9. The influence of track irregularities on the running behavior of high-speed trains/ I I-Yoon Choi, J-H. Um, J. S. Lee, H.-H. Choi // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit Vol 227, Issue 1 (2013), pp. 94 – 102.

REFERENCES

1. Ershova N.M. *Sovremennyye metody teorii proyektirovaniia i upravleniia slozhnymi dinamicheskimi sistemami* [Modern methods of the theory of design and management of complex dynamic systems]: monografiia. Dnipropetrovsk: PGASA, 2016, 272 p. (in Russian).
2. Ushkalov V.F., Lapina L.G. and Mashhenko I.A. *Raschetnyye vozmushheniia dlia otsenki dinamicheskikh kachestv gruzovykh vagonov* [Calculated disturbances for evaluation of dynamic properties of freight cars]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta* [Science and progress of transport. Announcer of the Dnepropetrovsk national university of railway transport]. 2013, №4 (46), pp.135-144. (in Russian).
3. G. Gu , D. M. Lilley and F. J. Franklin.. *A structural articulation method for assessing railway bridges subject to dynamic impact loading from track irregularities. Vehicle System Dynamics*, Vol. 48, 2010, Iss. 10, pp. 1077-1095.
4. Bondarenko I. *Development of algorithm for calculating dynamic processes of railroad track deformability work. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, №6/7(84), p. 28–36.
- 5 Liang Ling, Yongquan Deng, Qinghua Guan and Xuesong Jin *Effect of track irregularities on the dynamic behavior of a tram vehicle. Journal of Advances in Vehicle Engineering*, Vol 3, No 1 (2017), pp. 29 – 39.
6. Hung and C. F. and Hsu W. L. *Influence of long-wavelength track irregularities on the motion of a high-speed train .Vehicle System Dynamics*, Issue 7 (2015), pp. 1 – 18.
7. Pombo, J. and Ambrósio J. *An alternative method to include track irregularities in railway vehicle dynamic analyses. Nonlinear Dynamics* Vol. 68, Issue 1–2 (2012), pp 161–176.
8. Sezer S. and Atalay A. E. *Dynamic modeling and fuzzy logic control of vibrations of a railway vehicle for different track irregularities Simulation. Modelling Practice and Theory* Vol. 19, Issue 9, October 2011, pp 1873-1894.
9. I I-Yoon Choi, J-H. Um, J. S. Lee and H.-H. Choi *The influence of track irregularities on the running behavior of high-speed trains. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* Vol 227, Issue 1 (2013), pp. 94 – 102.