

УДК 629.4.015:625.032.4:539.3

Е.А. ОРЛОВ, ОАО „Изюмский вагоноремонтный завод”

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭКИПАЖЕЙ

Описана технология автоматизованого багатоваріантного дослідження динамічних навантажень на рами тепловозів. Створена спеціалізована система автоматизованого моделювання динамічних процесів в системі “рама тепловоза – підвіска”.

The technology of the automated multiple research of dynamic loadings on the diesel engines frames is described. The specialized system of automated modeling of dynamic processes in the system “diesel engine frame – pendant” is created.

Введение. Большую часть тепловозного парка Украины и стран СНГ составляют тепловозы серий 2ТЭ10, 2ТЭ116 [1, 2], выпускаемые в свое время большими партиями и на сегодняшний день в основном выработавшие 20-летний ресурс. Эксплуатационные нагрузки в большей степени сказываются на силовых элементах, в первую очередь – на рамах тепловозов. В связи с этим для определения возможности, целесообразности и схем ремонта необходимо определять характеристики напряженно-деформированного состояния (НДС) рам тепловозов, что в свою очередь требует знания характеристик распределения нагрузок на элементы рамы. Данной схеме посвящено множество публикаций различных авторов [3-29]. Однако разработанное множество математических моделей и соответствующих программных комплексов не обладают таким важным качеством как возможность интеграции в математические модели и программные комплексы более высокого уровня. Действительно, разработанные достаточно подробные математические модели и программное обеспечение не имеют единых общих платформ и форматов описания исследуемых объектов и процессов. В силу этого эти модели и системы сложно сопрягать с другими моделями и системами. В то же время актуальность и важность проблемы ремонта, восстановления и модернизации постоянно увеличивается. Это в свою очередь порождает актуальную и важную задачу разработки на основе единого параметрического подхода математических моделей и программного обеспечения для моделирования динамических нагрузок на рамы тепловозов с целью последующего анализа их НДС.

Конструктивные особенности рам и подвески тепловозов серий 2ТЭ10, 2ТЭ116. Тепловозы серий 2ТЭ10, 2ТЭ116 (рис. 1) с электрической передачей имеют технические характеристики, некоторые из которых приведены в табл.1. Они представляют собой сложные разнокомпонентные системы, элементы которых – агрегаты, машины, узлы, приборы – выполняют различные функции.

Основу главной несущей рамы (рис. 2) тепловоза, конструктивные параметры которой приведены на рис. 3, обычно составляют 2 центральные продольные двутавровые балки (“хребтовые”).

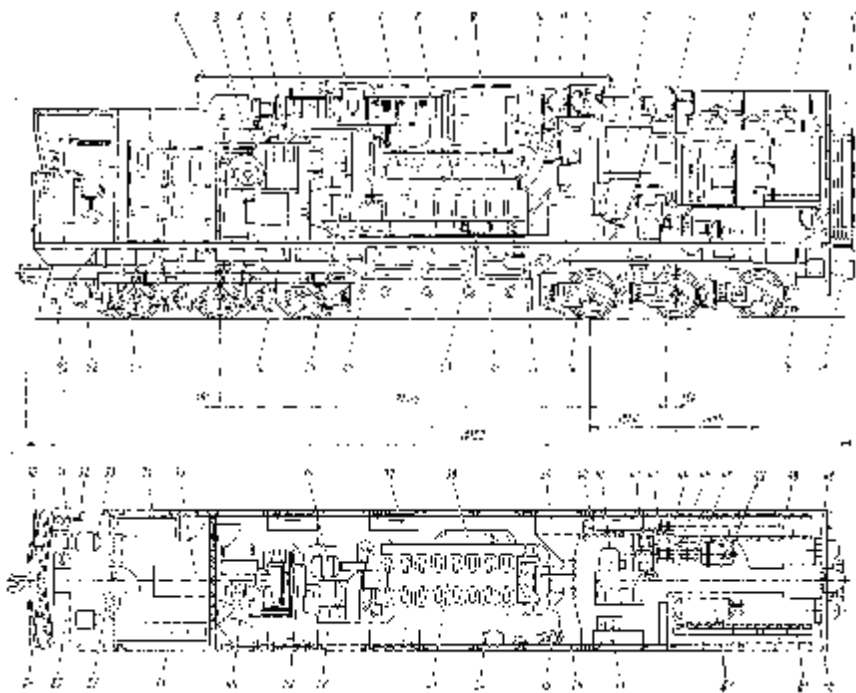


Рис. 1. Тепловоз 2ТЭ116, продольный разрез и план:

1 – антенна радиостанции; 2, 13 – каналы забора воздуха для охлаждения тяговых электродвигателей передней и задней тележек; 3 – электродвигатель вентилятора охлаждения выпрямительной установки; 4 – выпрямительная установка; 5 – тифон; 6 – вентилятор кузова; 7 – канал забора воздуха для охлаждения тягового генератора; 8 – сетчатые кассеты очистки воздуха для охлаждения тяговых электрических машин и выпрямительной установки; 9 – глушитель шума выхлопа дизеля; 10 – компенсатор глушителя; 11 – расширительный бак для воды; 12 – блок осушки сжатого воздуха; 14 – цилиндр привода верхних жалюзи; 15 – лок шахты холодильной камеры; 16 – вентиляторы холодильной камеры; 17 – переходный тамбур; 18 – автосцепка; 19 – трубопровод песка; 20 – тяговый электродвигатель колесного блока; 21 – аккумуляторная батарея; 22 – бак для топлива; 23 – маслопрокачивающий агрегат; 24 – топливомерное стекло; 25 – тяговый генератор; 26 – рама тележки; 27 – главный резервуар; 28 – питательный резервуар; 29 – путеочиститель; 30, 64 – передние бункера песочной системы; 31 – кран машиниста; 32 – кран вспомогательного тормоза; 33 – сиденье машиниста; 34, 35, 61 – правая, центральная и левая аппаратные камеры; 36 – возбудитель; 37 – каналы забора воздуха для охлаждения электрических машин и выпрямительной установки; 38 – охладитель масла; 39, 54 – воздухоочистители дизеля; 40 – полнопоточный фильтр масла; 41, 60 – электродвигатели вентиляторов охлаждения тяговых электродвигателей передней и задней тележек; 42 – тормозной компрессор; 43 – цилиндр привода боковых жалюзи; 44, 46 – муфты привода тормозного компрессора; 45 – редуктор привода тормозного компрессора; 47 – электродвигатель привода тормозного компрессора; 48, 51 – коллекторы секций радиатора; 49, 50 – задние бункера песочной системы; 52 – резервуар для огнегасящей жидкости; 53 – санузел; 55 – топливоподкачивающий агрегат; 56 – подогреватель топлива; 57 – дизель; 58 – стартер–генератор; 59 – блок выпрямителей управления возбуждением; 62 – привод ручного тормоза; 63 – пульт управления и столик помощника машиниста

Технические характеристики тепловозов 2ТЭ10Л, 2ТЭ116

| Элементы характеристики | 2ТЭ116 | 2ТЭ10Л |
|--|------------------------------------|------------------------------------|
| Осевая характеристика | 2(3 _т -3 _о) | 2(3 _т -3 _о) |
| Эффективная мощность дизелей, л. с. | 2х3000 | 2х3000 |
| Длительная сила тяги, кН | 2х250 | 2х270 |
| Скорость длительного режима, км/ч | 24,5 | 23 |
| Конструкционная скорость, км/ч | 100 | 100 |
| Расстояние между осями сцепления автосцепок, м | 2х18,15 | 2х16,97 |
| База тележки, м | 3,7 | 4,2 |
| Сцепной вес, МН | 2х1,26 | 2х1,3 |

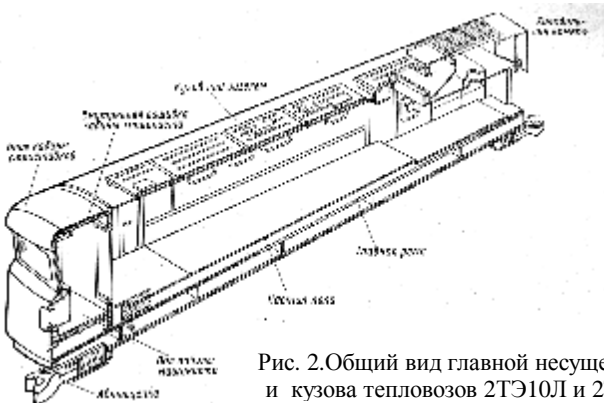


Рис. 2. Общий вид главной несущей рамы и кузова тепловозов 2ТЭ10Л и 2ТЭ10В

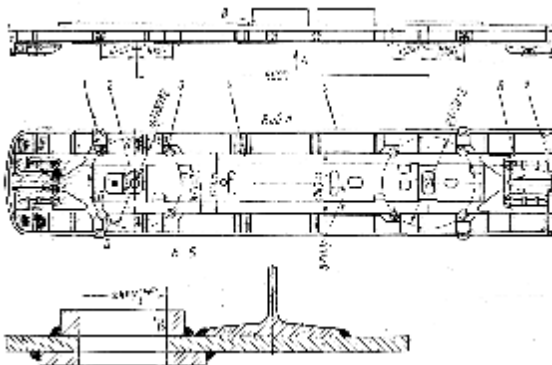


Рис. 3. Рама тепловоза:

- 1 – кронштейн для подъема тепловоза; 2 – шкворень; 3 – опора рамы;
 4 – хребтовые балки; 5 – обносный швеллер; 6 – стяжной ящик; 7 – лобовой лист;
 8 – аккумуляторный ящик

Рама является основным силовым элементом, воспринимающим динамические нагрузки как от расположенных в кузове дизеля, генератора, других систем и агрегатов (рис. 4), так и от опор главной рамы тепловоза и шкворневых гнезд, расположенных на двух тележках (рис. 5). В свою очередь каждая тележка с тремя колесными парами представляет собой сложную динамическую систему (рис. 6), которая через колесные пары (рис. 7) взаимодействует с рельсами. Таким образом, конструктивные элементы исследуемых тепловозов составляют звенья в цепи взаимодействующих элементов “рельс – колесная пара – экипажная часть – подрессоренная часть”. В этой системе элементом, замыкающим на себе силовые потоки и кинематические связи, является рама. В то же время усилия, действующие на нее, можно получить только как результат анализа тепловоза как целостной динамической системы.

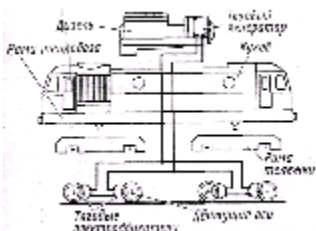
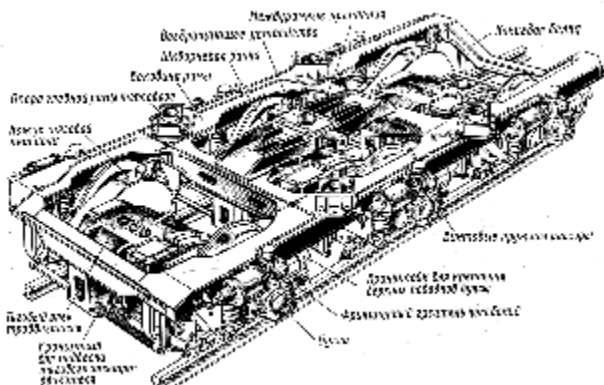
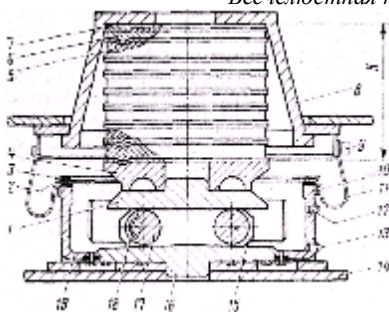


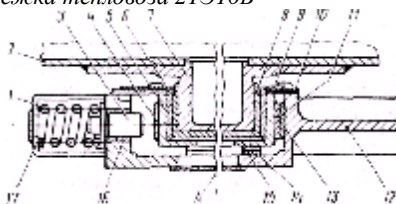
Рис. 4. Схема расположения основных по массе элементов тепловоза



Бесчелостная тележка тепловоза 2ТЭ10В



Комбинированная опора



Шкворневой узел

Рис. 5. Общий вид бесчелостной тележки тепловоза 2ТЭ10В, комбинированной опоры и шкворневого узла

галопирования и боковой качки.

В этой же работе [4] приведены различные математические модели, в том числе и модель вынужденных колебаний шестиосного локомотива (рис.8). Образую из указанных на рис.8 степеней свободы вектор обобщенных координат \mathbf{q} и применяя известную технологию уравнений Лагранжа 2 рода, можно уравнение колебаний локомотива представить в виде [3, 4]:

$$M\ddot{\mathbf{q}} + C\dot{\mathbf{q}} + K\mathbf{q} = \mathbf{R}, \quad (1)$$

где M, C, K – матрицы масс, демпфирования и жесткости; \mathbf{R} – вектор обобщенных нагрузок.

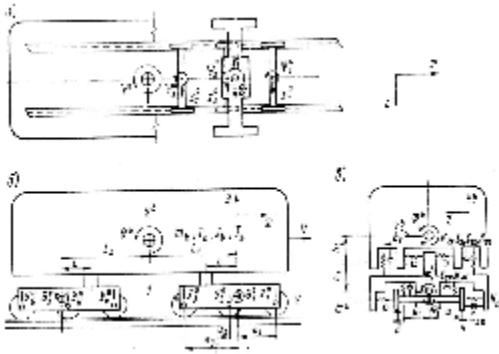


Рис.8. Модель колебаний шестиосного локомотива

(а – план; б – вид сбоку; в – вид сзади):

1 – задняя тележка; 2 – передняя тележка; 3 – правый рельс; 4 – левый рельс

Система уравнений (1) может быть проинтегрирована методами Рунге–Кутты, на основе схем Вильсона, Ньюмарка, Парка–Гира [4].

Важным фактором является вид правой части системы уравнений (1). Например, вертикальное кинематическое возмущение представляется в виде 3-х основных частей [3]:

$$\eta(t) = \eta_{сл}^p(t) + \eta_{пер}^p(t) + \eta_{пер}^k(t), \quad (2)$$

где $\eta_{сл}^p(t)$, $\eta_{пер}^p(t)$ – случайная и периодическая составляющие неровностей на рельсе; $\eta_{пер}^k(t)$ – периодически повторяющиеся воздействия от нерегулярностей колеса.

Первое слагаемое в выражении (2) присутствует всегда, второе и третье могут отсутствовать (одно или оба). Случайная составляющая определяется спектральной плотностью характерного для той или иной железной дороги

вида. Например, в работе [3] приведен один из вариантов спектральной плотности в виде функции от пространственной частоты

$$F = \frac{\omega}{2\pi v},$$

где ω – частота возникающего возмущения, v – скорость движения экипажа:

$$S_{\eta_{\text{сн}}}(F) = 0,5 \cdot 10^{-8} (0,011 + F)^{-4} \sqrt{|\lg F|}. \quad (3)$$

Для описания периодической составляющей возмущения, возникающего при прохождении стыковых неровностей, в качестве формы профиля отдельной неровности длиной l_n принимают, например, сдвинутую косинусоиду [3]

$$u(x) = 0,5 d \left(1 + \cos \frac{2\pi x}{l_n} \right), \quad |x| \leq l_n / 2, \quad (4)$$

где d – глубина неровности, или гауссову кривую

$$u(x) = e^{-4 \ln 2 \frac{x^2}{l_n^2}}, \quad (5)$$

или другие функции.

Возмущения от неровностей колеса (ползуны, навары, выщербины – короткие неровности; неравномерный прокат – непрерывные неровности; дисбаланс, эксцентриситет) также могут задаваться различными функциями. Так, дефект типа ползуна длиной l_n приближается по форме к косинусоидальному виду [3]:

$$u_n = 1 - \cos \frac{2\pi x}{l_n}. \quad (6)$$

Данные распределения служат в качестве исходной информации для вычисления усилий R в правой части уравнений (1). После интегрирования системы дифференциальных уравнений (1) определенные законы изменения обобщенных координат от времени дают возможность вычислять динамические усилия, действующие на раму тепловоза.

Для придания создаваемой математической модели динамики тепловоза цельности и связности целесообразно применение единого параметрического подхода. В соответствии с этим подходом все параметры в разрешающих уравнениях выражаются как функции некоторых параметров $p_i, i = 1 \div n$, образующих массив базовых параметров системы:

$$M = M(p), C = C(p), K = K(p), R = R(p). \quad (7)$$

Задавая тот или иной набор p , можно получать различные динамические системы, а, значит, и различные решения $q(t)$. Анализируя получаемые временные распределения $q(t)$, можно вычленить кинематические и силовые параметры, которые в свою очередь могут входить в системы ограничений или в целевые функции при выборе того или иного проектного решения. Таким образом можно организовывать многовариантные исследования динамики тепловоза, определение нагрузок на рамы при варьировании параметров исследуемого локомотива, а также проводить оптимизационные процедуры.

Приняв в качестве всех параметров, присутствующих в уравнениях (1)–(6), величины, являющиеся функциями от базовых параметров p , можно, не меняя по структуре сложившуюся динамическую модель, проводить параметрический анализ и синтез элементов исследуемого локомотива. Таким образом можно, не изменяя структуру традиционной технологии исследования динамики железнодорожного экипажа, внести в нее элементы параметрического подхода. Полученная модель нуждается в алгоритмической и программной реализациях.

Алгоритмическая и программная реализация предлагаемого подхода. Существует несколько альтернативных путей исследования описанной динамической системы. В настоящее время создано большое количество программных комплексов, реализующих численную процедуру интегрирования системы уравнений (1). Это, например, разработанные в Институте теоретической механики НАН Украины программные комплексы “Сигма», “Интег”, “Дельта”, “Брус” [3]. Как отмечается в [6], для этих целей были разработаны такие программные продукты как Vampire (Британские железные дороги), Medyna (Германское авиационное и космическое агентство), Nucars (США) и др. Эти программные комплексы в высокой степени специализированы и оптимизированы с точки зрения минимизации вычислительных затрат при моделировании. Среди недавних разработок можно отметить программный комплекс Gensys, который вышел в свет в 1999 г. Программы для моделирования динамики механических систем общего назначения (такие как Adams, Simpack, Dads) с недавнего времени также стали включать в себя специализированные модули, ориентированные на расчет динамики железнодорожных экипажей. Adams, Gensys, Nucars, Simpack, Medyna и Vampire были протестированы при помощи тестов, разработанных в Манчестерском университете. Это направление исследований реализуют также программные комплексы “Универсальный механизм” (Брянский государственный технический университет), “Дионин” (МИИТ) и другие.

Перечисленные программные комплексы в той или иной мере реализуют задачу моделирования динамики и некоторые аспекты оптимизации исследуемых систем. Однако, как отмечалось, при осуществлении параметрического анализа и синтеза с помощью этих систем затруднительно реализо-

вывать сквозную параметризацию исследований, особенно в связи с сопутствующими задачами исследования напряженно-деформированного состояния рамы или другими подобными задачами.

В связи с этим возникла необходимость разработки таких алгоритмов и программного обеспечения, которые были бы лишены этого недостатка. Эта задача решена на основе предложенного параметрического подхода (рис.9).

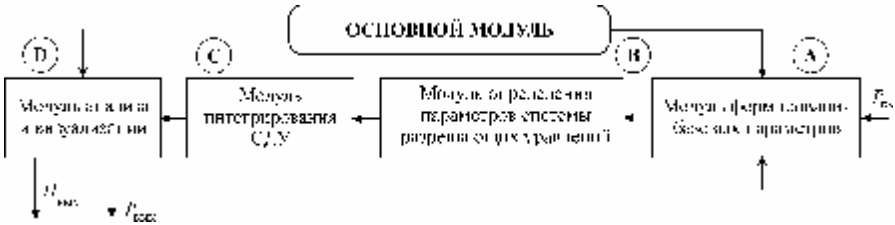


Рис.9. Структура программного комплекса для моделирования динамики железнодорожного экипажа

Характерными особенностями структуры предложенного программного комплекса является разделение этапов формирования множества базовых параметров p и коэффициентов разрешающей системы дифференциальных уравнений (СДУ). В результате все изменения исследуемой системы осуществляется модулем \textcircled{A} , а модули \textcircled{B} , \textcircled{C} , \textcircled{D} не меняются (см. рис.9). Кроме того, важным свойством предложенной структуры является ее открытость и интегрируемость с другими системами. Это обеспечивается наличием параметрического входа в модуль \textcircled{A} (см. рис.9), куда подается массив входных параметров $p_{вх}$, и двух выходов из блока \textcircled{D} : параметрического $p_{вых}$, из которого данные могут передаваться либо внутри системы в блок \textcircled{A} , либо во внешнюю систему, а также модельного выхода, из которого полученные результаты анализа и производные от них величины (в совокупности обозначенные $P_{вых}$) могут передаваться в другую систему анализа или синтеза. Нужно отметить, что в составе передаваемой информации могут выдаваться и распределения обобщенных координат во времени, и функции от этих координат, и обобщенные усилия.

Предложенная структура реализована в виде программного обеспечения в среде программирования Delphi. На рис.10 представлены программные окна на разных этапах моделирования динамики железнодорожного экипажа (в данном случае – вертикальные колебания), демонстрирующие его работоспособность и возможности на примере решения тестовых задач.

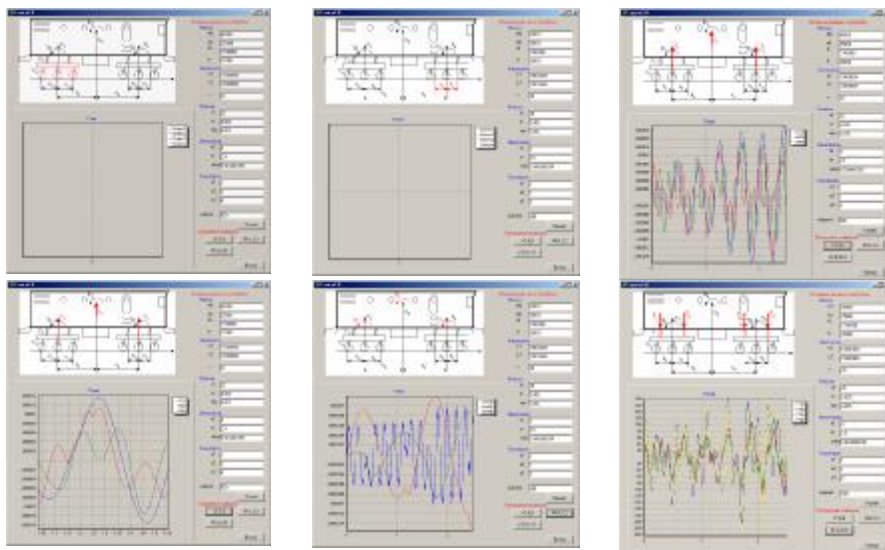


Рис.10. Этапы моделирования динамики железнодорожного экипажа

Заключение. В работе предложены новый параметрический подход к решению задачи моделирования динамики железнодорожного экипажа. Он отличается следующими особенностями:

- естественным встраиванием в существующие математические модели анализа динамических процессов в железнодорожных экипажах;
- способностью отражать и реализовывать предложенную технологию исследований в виде специализированного программного комплекса модульной структуры;
- интегрируемость с внешними программными комплексами, в т.ч. с возможностью передачи информации в системы анализа напряженно-деформированного состояния элементов локомотива;
- возможность организации естественным образом процедур параметрического анализа и синтеза не только внутри „малого круга” (т.е. в рамках исследования динамических процессов в железнодорожном экипаже), но и при включении в более разветвленные схемы исследований (например, анализ напряженно-деформированного состояния рам тепловозов или синтез конструктивных схем и параметров по массовым, жесткостным и прочностным критериям).

Отмеченные факторы дают возможность использовать инструмент и технологию исследований в процессе дальнейших разработок, в частности, математических моделей и программных комплексов более высокого уровня, в т.ч. для решения задач обеспечения прочности, жесткости и долговечности рам тепловозов серий 2ТЭ10, 2ТЭ116.

Список литературы. 1. *Тепловоз 2ТЭ116* / С.П.Филонов, А.И.Гибалов, В.Е.Быковский и др. – М.: Транспорт, 1985. – 328 с. **2.** *Тепловозы 2ТЭ10М и 3ТЭ10М: Устройство и работа* / С.П.Филонов, А.Е.Зиборов, В.В.Ренкунас и др. – М.: Транспорт, 1986. – 228 с. **3.** *Ушкалов В.Ф., Резников Л.М., Иккол В.С., Трубецкая Е.Ю., Редько С.Ф., Залесский А.И.* Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств. – Киев: Наук. думка, 1989. – 240 с. **4.** *Гарг В.К., Дуккипати Р.В.* Динамика подвижного состава. – М.: Транспорт, 1988. – 391 с. **5.** *Лазарян В.А.* Динамика транспортных средств. – Киев: Наук. думка, 1985. – 528 с. **6.** *Ковалев Р.В.* Разработка и реализация эффективных методик компьютерного исследования динамики и оптимизации параметров ходовых частей железнодорожных экипажей. – Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Брянск. – 2004. – 154 с. **7.** *Андрейчиков А.В. и др.* Применение поисковых методов при выборе структур рессорного подвешивания подвижного состава железных дорог / А.В.Андрейчиков, В.А.Камаев, С.В.Никитин, И.В.Сорокин // Проблемы механики железнодорожного транспорта. – Днепропетровск, 1984. – С.95-96. **8.** *Братчев Э.П., Камаев В.А.* Оценка динамических качеств железнодорожного подвижного состава в системе автоматизированного проектирования его ходовой части // Проблемы механики железнодорожного транспорта. – Днепропетровск, 1984. – С.97-98. **9.** *Бартенева Л.И., Кудрявцев Н.Н., Сычев В.А.* Особенности динамических качеств 8-осных вагонов // Вестн. ВНИИЖТ. – 1976. – № 2. – С.25—29. **10.** *Белоусов В.Н.* Идентификация параметров модели сцепа пассажирских вагонов по результатам ходовых испытаний // Вестн. ВНИИЖТ. – 1985. – № 1. – С.36-40. **11.** *Беляев А. И., Белов В.К.* Вероятностные характеристики стохастических колебаний колесной пары тепловоза 2ТЭ10Л // Вестн. ВНИИЖТ. – 1971. – № 1. – С.36-40. **12.** *Беляев Г.Д., Иккол В.С.* Колебания и нагруженность длиннобазных транспортных средств с фрикционными демпферами в подвешивании // Колебания и прочность механических систем. – Киев, 1986. – С.42-46. **13.** *Березовский А.М.* Метод оценки плавности хода при широкополосных случайных процессах // Тр. ВНИИВ. – 1968. – Вып. 7. – С.55-64. **14.** *Бирюков И.В., Рыбников Е.К.* Методика исследования динамики тяговых приводов электроподвижного состава при сложном спектре возмущения // Тр. МИИТ. – 1971. – Вып. 374. – С.3-35. **15.** *Блохин Е.П., Манашкин Л.А.* Динамика поезда: Нестационарные продольные колебания. – М.: Транспорт, 1982. – 222 с. **16.** *Бурчак Г.П., Вольнов М.В.* Определение инерционных и диссипативных характеристик пути из опыта на вынужденные колебания // Тр. МИИТ. – 1976. – Вып. 542. – С.43-67. **17.** *Вагоны: Конструкция, теория и расчет* / Под ред. Л.А.Шадура. – М.: Транспорт, 1980. – 439 с. **18.** *Данилов В.Н., Яковлев В.Ф., Семенов И.И.* Динамические характеристики рельсового основания // Вестн. ВНИИЖТ. – 1964. – № 4. – С.16-18. **19.** *Демин Ю.В. и др.* Автоколебания и устойчивость движения рельсовых экипажей / Ю.В.Демин, Л.А.Длугач, М.Л.Коротенко, О.М.Маркова. – К.: Наукова думка, 1984. – 160 с. **20.** *Динамика установившегося движения локомотивов в кривых* / Под ред. С.М.Куценко. – Харьков: Выща школа, 1975. – 132 с. **21.** *Исследование динамики и прочности вагонов* / Под ред. С.И.Соколова. – М.: Машиностроение, 1976. – 224 с. **22.** *Кудрявцев Н.Н., Белоусов В.Н., Бурчак Г.П.* Определение вертикальных возмущений, вызывающих колебания обрессоренных частей вагона при движении по рельсовому пути // Вестн. ВНИИЖТ. – 1982. – № 5. – С.33-37. **23.** *Лазарян В.А.* Динамика вагонов. – М.: Транспорт, 1964. – 256 с. **24.** *Лазарян В.А. и др.* Теоретическое прогнозирование динамических напряжений в конструкциях проектируемых экипажей / В.А.Лазарян, В.Ф.Ушкалов, В.В.Кулябко, А.К.Шерстюк // *Некоторые задачи механики скоростного наземного транспорта.* – Киев: 1974. – С.101-110. **25.** *Ушкалов В.Ф., Редько С.Ф., Бояринцева Л.П.* Математическая модель случайных вертикальных возмущений рельсовых экипажей // Вестн. ВНИИЖТ. – 1986. – № 6. – С.21-25. **26.** *Ушкалов В.Ф., Резников Л.М., Редько С.Ф.* Статистическая динамика рельсовых экипажей. – К.: Наукова думка, 1982. – 360 с. **27.** *Коган А.Я.* Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. – М.: Транспорт, 1997. – 326 с. **28.** *Коссов В.С., Галичев А.Г., Ковалев Р.В.* Влияние триботехнических характеристик системы "колесо – рельс" на динамические качества грузового тепловоза / Оптимизация прочностных и транспортных характеристик транспортных машин. Материалы юбилейной науч. конф. 15-16 ноября 1999 г. – Брянск: БГТУ, 1999. – С.87-89. **29.** *Михальченко Г.С., Погорелов Д.Ю., Симонов В.А.* Совершенствование динамических качеств подвижного состава железных дорог средствами компьютерного моделирования // Тяжелое машиностроение. – № 12. – 2003. – С.2-6.

Поступила в редколлегию 08.05.2006