

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

## УДК 629.42.015

С. В. МЯМЛИН<sup>1</sup>, Н. Е. НАУМЕНКО<sup>2</sup>, О. М. МАРКОВА<sup>3</sup>, Е. Н. КОВТУН<sup>4</sup>,  
В. В. МАЛЫЙ<sup>5\*</sup><sup>1</sup>Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 84 98, эл. почта sergeyuyamlin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304<sup>2</sup>Отдел «Динамика многомерных механических систем», Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, ул. Лешко-Попеля, 15, Днепропетровск, Украина, 49005, тел. +38 (056) 375 68 01, эл. почта dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-6913-2568<sup>3</sup>Отдел «Динамика многомерных механических систем», Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, ул. Лешко-Попеля, 15, Днепропетровск, Украина, 49005, тел. +38 (056) 375 68 03, эл. почта dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-9390-4046<sup>4</sup>Отдел «Динамика многомерных механических систем», Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, ул. Лешко-Попеля, 15, Днепропетровск, Украина, 49005, тел. +38 (0562) 46 79 35, эл. почта dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-2961-3682<sup>5\*</sup>Отдел «Динамика многомерных механических систем», Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, ул. Лешко-Попеля, 15, Днепропетровск, Украина, 49005, тел. +38 (0562) 46 79 35, эл. почта dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-6501-1398ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ШЕСТИОСНОГО ЛОКОМОТИВА

**Цель.** Работа посвящена оценке динамических качеств локомотива перспективной конструкции и определению возможности его использования на железных дорогах Украины. **Методика.** Для достижения поставленной цели использованы методы математического и компьютерного моделирования динамики железнодорожных транспортных средств, а также методы численного интегрирования систем обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. **Результаты.** Для решения поставленной задачи построена расчетная схема локомотива на трехосных тележках, которая представляет собой систему твердых тел, соединенных элементами различной реологии. С использованием этой расчетной схемы разработана математическая модель пространственного движения локомотива, позволяющая исследовать его пространственные колебания при движении по прямолинейным и криволинейным участкам пути со случайными неровностями в плане и профиле. При составлении математической модели принимались во внимание как геометрические (нелинейность профиля поверхности катания колеса), так и физические нелинейности системы (работа сил сухого трения, нелинейность характеристик сил взаимодействия колес и рельсов). С помощью компьютерного моделирования проведены многовариантные расчеты, позволившие оценить динамические качества локомотива при его движении по прямолинейным и криволинейным участкам пути. При этом определялись показатели плавности хода локомотива в горизонтальной и вертикальной плоскостях, рамные силы, коэффициенты вертикальной динамики в первой и второй ступенях подвешивания, коэффициенты запаса устойчивости против схода колеса с рельса. Кроме того, проведено сравнение полученных результатов с аналогичными характеристиками широко используемого на железных дорогах Украины шестиосного тепловоза ТЭ116. Определено влияние скорости движения и технического состояния пути на безопасность движения локомотива. **Научная новизна.** Разработана математическая модель пространственного движения шестиосного локомотива перспективной конструкции, учитывающая особенности его конструкции, и сделана оценка динамических характеристик при движении экипажа по пути произвольного очертания. **Практическая значимость.** Разработанная математическая модель движения шестиосного локомотива может быть использована при проведении научных исследований по созданию перспективных конструкций локомотивов.

*Ключевые слова:* подвижной состав; локомотив; математическая модель; динамические показатели

## Введение

В настоящее время техническое состояние тягового подвижного состава Украины не

в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к современным транспортным системам. Одной из самых острых проблем железных дорог Украины является физический и мо-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ральный износ локомотивного парка. Так, в настоящее время средний износ парка тепловозов составляет 97 %, электровозов – 90 %. В Программе обновления тягового подвижного состава железных дорог Украины на период до 2020 года заложены потребности в закупке подвижного состава нового поколения. Использование таких локомотивов позволит повысить безопасность движения поездов и значительно уменьшить потребление топлива и эксплуатационные расходы на их содержание [2, 4, 6, 10, 12].

Большую работу по созданию современных локомотивов проводят практически все мировые производители, в том числе и компания Siemens. В созданных ими тепловозах реализована значительная часть требований, предъявляемых к перспективным локомотивам будущего: возможность эксплуатации во всех странах Европы, использование как в грузовом, так и в пассажирском движении. Одним из таких перспективных локомотивов является шестиосный тепловоз с электрической передачей серии ER20, который может быть использован и на железных дорогах Украины после соответствующей адаптации [8, 14, 15].

### Цель

Цель работы заключается в оценке динамических качеств локомотива перспективной конструкции при его движении по прямолинейным и криволинейным участкам железнодорожного пути и определение возможности его использования на железных дорогах Украины.

### Методика

Для решения поставленной задачи была выбрана расчетная схема локомотива и составлена математическая модель, описывающая его пространственные колебания. На основе построенной математической модели разработан алгоритм и составлена компьютерная программа, предназначенная для оценки динамических характеристик движущегося локомотива.

Расчетная оценка динамических показателей локомотива проведена путем анализа результатов решения нелинейных дифференциальных уравнений, представляющих динамическую модель пространственных колебаний экипажа.

### Результаты

Кузов тепловоза типа ER20 выполнен как самонесущая модульная конструкция и подразделяется на следующие компоненты: главную раму, боковые стенки, кабины управления и смонтированные лобовые части. Главная рама состоит из двух буферных брусьев, двух наружных и двух центральных продольных балок, четырех поперечных балок. Буферные брусья воспринимают ударно-тяговые усилия, которые через автосцепное устройство передаются от состава поезда на локомотив. Силы тяги и торможения передаются от тележек на кузов через штангу, присоединенную к буферному брусу. Кузов тепловоза опирается на две трехосные тележки. Конструкция тележки бесчелюстная с двухступенчатым рессорным подвешиванием с использованием винтовых пружин и гидравлических гасителей колебаний. Подвешивание тяговых электродвигателей опорно-рамное. Нагрузка от кузова передается на каждую тележку через упругое рессорное подвешивание второй ступени [1, 9].

Расчетная схема тепловоза типа ER20 (рис. 1) построена как механическая система, состоящая из девяти твердых тел (кузова, двух рам тележек и шести колесных пар).

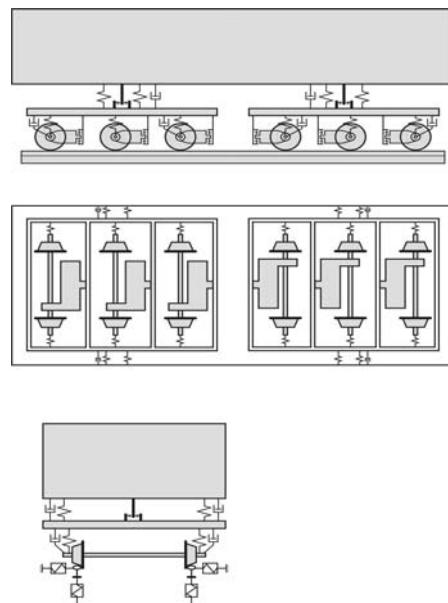


Рис. 1. Расчетная схема тепловоза типа ER20

Fig. 1. Design scheme of the locomotive, type ER20

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Выбранная конфигурация твердых тел расчетной схемы позволяет учесть следующие особенности тепловоза типа ER20:

- упруго-диссипативную с вязким трением связь кузова и рамы тележки;
- упруго-вязкую связь между рамой тележки и колесными парами: комплекты пружин буксового подвешивания допускают взаимные перемещения этих тел во всех направлениях;
- форму профилей поверхности катания колес.

Железнодорожный путь моделируется в виде приведенной к каждому колесу массой (двенадцать приведенных масс), имеющей только вертикальное и поперечное горизонтальное перемещения и опирающейся в этих направлениях на пружины и демпферы вязкого трения, моделирующие упруго-диссипативные свойства рельсов и подрельсового основания. Продольные и угловые перемещения элементов верхнего строения пути данной моделью не учитываются.

Конфигурация рассматриваемой механической системы описывается  $9 \times 6 + 12 \times 2 = 78$  координатами.

При описании движения тепловоза по участкам пути произвольного очертания выбрана неподвижная система координат  $\tilde{O}\xi\eta\zeta$ , а для каждого твердого тела – по две подвижные системы координат: естественная  $Oxyz$  и связанная с твердым телом  $Cx'y'z'$  ( $Cx'$ ,  $Cy'$ ,  $Cz'$  – главные центральные оси инерции). Все системы координат приняты правыми, причем считается, что оси  $\tilde{O}\xi$ ,  $Ox$ ,  $Cx'$  направлены слева направо, а оси  $\tilde{O}\zeta$ ,  $Oz$ ,  $Cz'$  – вниз (рис. 2). Оси естественной системы координат направлены соответственно по касательной, нормали и бинормали – к оси пути. Начало координат  $O$  для каждого твердого тела находится на расстоянии  $s$  от его положения в начальный момент времени (здесь  $s$  – пройденный путь). Положение естественной системы координат относительно неподвижной характеризуется дуговой координатой вдоль оси пути  $s$ , углом  $\chi$  между осями  $Ox$  и  $\tilde{O}\xi$  в плане, а также углами  $\varphi_i$  и  $\theta_i$  между этими осями в вертикальных плоскостях, которые определяются возвышением наружного рельса  $h_r$ . Параметры рельса  $\chi$ ,  $h_r$  – задан-

ные функции координаты  $s$ , для круговой кривой  $\dot{\chi}$  и  $h_r$  – постоянные, для прямой – равняются нулю [11].

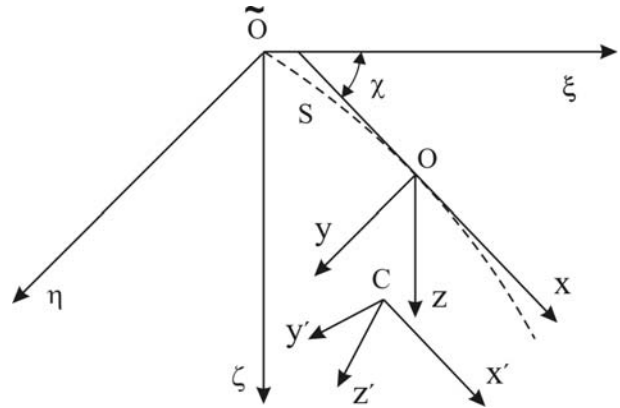


Рис. 2. Системы координат

Fig. 2. Coordinate system

Положение твердого тела относительно естественной системы координат описывается величинами  $x, y, z, \psi, \varphi, \theta$ . Поступательные перемещения  $x, y, z$  и углы поворота  $\psi, \varphi, \theta$  описывают подергивание, боковой отклон, подпрыгивание и виляние, галомирование, боковую качку твердого тела соответственно [3].

При обозначении координат твердых тел системы введены следующие индексы: кузов –  $f$ , рама тележки –  $bk$  ( $k = 1, 2$ ), колесная пара –  $i$  ( $i = \overline{1, 6}$  – номер колесной пары по ходу движения экипажа), колесо –  $ij$  ( $j = 1$  – левая сторона вагона,  $j = 2$  – правая), рельсы в точках контакта –  $rij$ .

Для определения числа степеней свободы рассматриваемой механической системы приняты во внимание ограничения, наложенные на перемещения тел с учетом общепринятых допущений и конструктивных особенностей ходовых частей локомотива.

Вертикальные перемещения и боковая качка колесных пар выражаются через вертикальные перемещения колес:

$$z_i = \frac{z_{i1} + z_{i2}}{2}; \quad \theta_i = \frac{z_{i2} - z_{i1}}{2d_1}; \quad (i = \overline{1, 6}), \quad (1)$$

где  $2d_1$  – расстояние между средними кругами катания колесной пары.

Предполагается, что радиусы  $r$  кругов ката-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ния всех колес равны между собой. Тогда при совпадении продольных плоскостей симметрии пути и тележки при перемещении вагона вдоль оси пути все колеса при отсутствии проскальзывания повернутся на один и тот же угол:

$$\varphi_i = -\frac{x_i + s}{r}, \quad (i = \overline{1,6}), \quad (2)$$

где  $s$  – текущее значение пройденного пути.

В продольном направлении кузов теплового вагона и рамы тележек совершают одинаковые линейные перемещения:

$$x_f = x_{b1} = x_{b2}. \quad (3)$$

С учетом связей (1) – (3) система «локомотив-рельсовая колея» имеет  $78-20=58$  степеней свободы.

Уравнения движения локомотива составлены в форме уравнений Лагранжа II рода [3]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} = Q_i + S_i, \quad (i = \overline{1, \dots, 58}), \quad (4)$$

где  $T$  и  $\Pi$  – кинетическая и потенциальная энергии системы;  $\Phi$  – функция рассеяния;  $q_i, \dot{q}_i$  – обобщенные координаты и их скорости;  $Q_i$  – соответствующие им обобщенные силы, не имеющие потенциала;  $S_i$  – внешние силы.

Кинетическая энергия системы получена путем сложения кинетических энергий тел, входящих в систему, определенных по теореме Кенига:

$$T = T_f + \sum_{k=1}^2 T_{bk} + \sum_{i=1}^6 T_i + T_{\Pi}, \quad (5)$$

где  $T_f$  – кинетическая энергия кузова теплового вагона;  $T_{bk}$  – кинетическая энергия  $k$ -ой рамы тележки;  $T_i$  – кинетическая энергия  $i$ -ой колесной пары;  $T_{\Pi}$  – кинетическая энергия пути.

В общем случае выражение для вычисления кинетической энергии для  $j$ -го твердого тела имеет следующий вид:

$$T_j = \frac{1}{2} m_j \left[ (\dot{s} + \dot{x}_j - y_j \dot{\chi}_j)^2 + (\dot{y}_j + x_j \dot{\chi}_j)^2 + (\dot{z}_j - \dot{h}_{rj})^2 \right] + \frac{1}{2} I_{xy} (\dot{\theta}_j + \dot{\theta}_{hj})^2 + \frac{1}{2} I_{zj} (\dot{\psi}_j + \dot{\chi}_j)^2 + \frac{1}{2} I_{yj} (\dot{\phi}_j + \dot{\phi}_{hj})^2, \quad (6)$$

где  $m_j$  – масса  $j$ -го твердого тела;  $I_j$  с соответствующими индексами обозначают главные центральные моменты инерции  $j$ -го тела;  $\dot{\chi}_j = VK_j$ ,  $K_j$  – кривизна пути под  $j$ -ым телом;  $V$  – скорость движения;  $h_{rj}$  – возвышение пути под центром масс  $j$ -го тела, вызванное возвышением в кривой наружного рельса на величину  $h_r = \theta_h 2d_1$ .

Кинетическая энергия системы, моделирующей путь, в соответствии с принятыми допущениями записывается следующим образом:

$$T_{\Pi} = \frac{1}{2} m_{rh} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 \dot{y}_{rij}^2 + \frac{1}{2} m_{rv} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 \dot{z}_{rij}^2, \quad (7)$$

где  $m_{rh}, m_{rv}$  – массы пути, приведенные к одному колесу в горизонтальном поперечном и вертикальном направлениях.

Потенциальная энергия системы ( $\Pi$ ) равна сумме потенциала сил тяжести ( $\Pi_{L1}$ ), энергии сжатия упругих элементов подвешивания ( $\Pi_{L2}$ ) и потенциальной энергии приведенных масс пути ( $\Pi_{\Pi}$ ).

Потенциальная энергия, обусловленная опусканием центров тяжести тел, определяется из выражения:

$$\Pi_{L1} = -m_f g (\theta_{hfb} y_f + z_f) - m_b g \sum_{k=1}^2 \theta_{hbk} y_{bk} - + z_{bk}) - m_{kp} g \sum_{i=1}^6 (\theta_{hj} y_i + z_i), \quad (8)$$

где  $m_f, m_b, m_{kp}$  – массы кузова, рамы тележки и колесной пары соответственно;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\theta_{hj}$  – угол между горизонтальной плоскостью под центром масс  $j$ -го тела и плоскостью пути, вызванный возвышением наружного рельса над внутренним

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

в криволинейном участке пути.

Составляющая потенциальной энергии  $\Pi_{L2}$  определяется по теореме Клапейрона как сумма энергий, накапливаемых в упругих элементах системы при их деформациях. В общем случае  $\Pi_{L2}$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \Pi_{L2} = & \frac{1}{2} \left( \sum_{l=1}^4 k_{cz} \Delta_{czl}^2 + k_{cy} \Delta_{cyl}^2 \right) + \\ & + \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 (k_{ax} \Delta_{axij}^2 + k_{ay} \Delta_{ayij}^2 + k_{az} \Delta_{azij}^2) \right) + \\ & + \frac{1}{2} k_z \sum_{i=1}^4 \Delta_{zi}^2, \quad (9) \end{aligned}$$

где  $\Delta_{czl}, \Delta_{cyl}$ , – изменение длины  $l$ -ых упругих элементов центрального подвешивания в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях;  $k_{cz}, k_{cy}$  – жесткости пружин центрального подвешивания соответственно в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях;  $\Delta_{azij}, \Delta_{ayij}, \Delta_{axij}$  – деформации пружин буксового подвешивания в вертикальном, горизонтальном поперечном и продольном направлениях;  $k_{az}, k_{ay}, k_{ax}$  – соответствующие жесткости пружин буксового подвешивания;  $k_z$  – жесткость скользуна, установленного на раме тележки, ограничивающего вертикальные перемещения кузова;  $\Delta_{zi}$  – взаимное вертикальное перемещение кузова и рамы тележки в зоне  $i$ -го скользуна.

Выражение для определения потенциальной энергии пути имеет вид:

$$\Pi_{II} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 (k_{rz} \Delta_{rzij}^2 + k_{ry} \Delta_{ryij}^2), \quad (10)$$

где  $\Delta_{rzij} = z_{rij}$ ;  $\Delta_{ryij} = y_{rij}$  ( $i = \overline{1,6}, j = \overline{1,2}$ ).

Функция рассеивания энергии в экипаже учитывает действие сил вязкого трения в обеих ступенях подвешивания и при взаимных поворотах кузова относительно ходовых частей в плане:

$$\begin{aligned} \Phi_L = & \frac{1}{2} (\beta_{cz} \sum_{i=1}^4 \dot{\Delta}_{czi}^2 + \beta_{cy} \sum_{i=1}^2 \dot{\Delta}_{cyl}^2) + \\ & + \frac{1}{2} \beta_{az} \sum_{i=1}^8 \dot{\Delta}_{zi}^2 + \frac{1}{2} \beta_{\psi} \sum_{i=1}^2 \dot{\Delta}_{\psi i}^2, \quad (11) \end{aligned}$$

где  $\beta_{cz}, \beta_{cy}$  – коэффициенты вязкого трения в центральном подвешивании в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях соответственно;  $\beta_{az}$  – коэффициент вязкого трения в буксовом подвешивании в вертикальном направлении;  $\beta_{\psi}$  – коэффициент вязкого трения при взаимных поворотах кузова относительно рамы тележки в плане;  $\dot{\Delta}$  – относительные скорости перемещений тел, связанных диссипативными элементами.

Относительные скорости  $\dot{\Delta}$  перемещений тел, связанных диссипативными элементами, определяются как производные по времени от относительных перемещений соответствующих тел.

Функция рассеивания энергии в пути имеет следующий вид:

$$\Phi_{II} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 (\beta_{ry} \dot{\Delta}_{ryij}^2 + \beta_{rz} \dot{\Delta}_{rzij}^2), \quad (12)$$

где  $\beta_{ry}, \beta_{rz}$  – коэффициенты рассеивания энергии в пути в горизонтальном и вертикальном поперечном направлениях.

Обобщенные силы  $Q_i$  являются силами взаимодействия колес и рельсов. Действие сил в контакте колес и рельсов (силы псевдоскольжения) моделируется по методике, описанной в работе [5].

Составляющие сил крипа определяются по формулам:

$$\begin{aligned} T_{xij} &= \frac{\varepsilon_{xij}}{\varepsilon_{ij}} T_{ij}; \\ T_{\alpha ij} &= \frac{\varepsilon_{yij} \sec \alpha_{ij}}{\varepsilon_{ij}} T_{ij} \quad (i = \overline{1,6}, j = \overline{1,2}), \quad (13) \end{aligned}$$

где  $T_{xij}$  – проекция полной силы  $T_{ij}$  на продольную ось  $x$ ;  $T_{\alpha ij}$  – проекция силы  $T_{ij}$  на касательную к профилю поверхности катания ко-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

леса в точке контакта;  $\alpha_{ij}$  – угол между касательной к профилю поверхности колеса в точке контакта и поперечной осью  $y$ ;  $\varepsilon_{ij}$  – относительная скорость проскальзывания  $j$ -го колеса  $i$ -ой колесной пары по рельсу (крип);  $\varepsilon_{xij}, \varepsilon_{yij}$  – продольная и поперечная составляющие относительной скорости проскальзывания  $j$ -го колеса  $i$ -ой колесной пары по рельсу;

$$T_{ij} = -F_{ij}\varepsilon_{ij} \left[ \left( \frac{F_{ij}\varepsilon_{ij}}{f_{tr}N_{ij}} \right)^4 + 1 \right]^{-\frac{1}{4}}, \quad (14)$$

где  $N_{ij}$  – нормальное давление  $j$ -го колеса  $i$ -ой колесной пары на рельс;  $f_{tr}$  – коэффициент трения скольжения;  $F_{ij}$  – коэффициент крипа  $j$ -го колеса  $i$ -ой колесной пары.

Полный крип  $\varepsilon_{ij}$  определяется выражением:

$$\varepsilon_{ij} = (\varepsilon_{xij}^2 + \varepsilon_{yij}^2 \sec^2 \alpha_{ij})^{\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

Обобщенные силы  $Q_i$  вычисляются как коэффициенты при вариациях обобщенных координат в выражениях возможных работ сил псевдоскольжения  $T_{xij}, T_{\alpha ij}$ .

Внешними силами, действующими на локомотив, являются: сила тяги  $F_T$ , развиваемая локомотивом, тормозная сила  $B$ , возникающая при включении тормозов, и силы сопротивления движению  $W$ , к которым относятся все остальные внешние силы.

В общем случае внешние силы, действующие на локомотив, могут быть представлены в виде:

$$S = W + B + F_T. \quad (16)$$

После подстановки в уравнение Лагранжа (4) выражений кинетической и потенциальной энергий, функции рассеивания, обобщенных и внешних сил получена система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая движение рассматриваемого локомотива по прямолинейным и криволинейным участкам пути.

На основе разработанной математической модели разработан алгоритм и создана компьютерная программа, предназначенная для

оценки динамических характеристик движущегося локомотива. Разработанная компьютерная программа позволяет имитировать широкий спектр различных расчетных случаев, охватывающих всевозможные сочетания параметров ходовых частей, вагона в целом и пути. В результате расчетов может быть получен практически любой набор необходимых выходных величин.

Расчетная оценка динамических показателей локомотива проведена путем анализа результатов решения нелинейных дифференциальных уравнений, представляющих динамическую модель колебаний экипажа. Решения нелинейных дифференциальных уравнений получены численно по методу Адамса-Башфорта.

Ходовые качества, безопасность движения и плавность хода локомотива оценивались по следующим показателям [7]:

$W_G, W_V$  – показатели плавности хода в горизонтальной и вертикальной плоскостях;  $H_r$  – рамные силы;  $k_{dv1}, k_{dv2}$  – коэффициенты вертикальной динамики в первой и второй ступенях подвешивания;  $k_{st}$  – коэффициенты запаса устойчивости против схода колеса с рельса.

Для сравнительного анализа также проведены расчеты по оценке динамических показателей серийного локомотива ТЭ116 [16], который широко эксплуатируется на железных дорогах Украины в настоящее время.

Движение локомотивов моделировалось с учетом действия внешних возмущений, связанных с геометрическим несовершенством рельсовой колеи (просадки, уширения, углы в плане, стыки, неравномерный износ). Возмущения, имеющие случайный характер, моделировались под колесами локомотива с транспортным запаздыванием, которое зависит от расстояния между колесными парами и скорости движения вагона. В качестве возмущений принимались случайные неровности рельсовой колеи в вертикальном и поперечном горизонтальном направлениях, соответствующие удовлетворительному состоянию пути [13].

Рассмотрено движение обоих локомотивов по пути, который включает в себя как прямолинейные, так и криволинейные участки пути (входные переходные кривые, круговые кривые

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

разного радиуса, выходные переходные кривые).

При этом начальная скорость движения экипажа принималась равной 40 км/ч, а затем увеличивалась с шагом 10 км/ч до 170 км/ч на прямолинейном участке пути, до 120 км/ч на кривой радиусом 650 м и до 100 км/ч на кривой радиусом 300 м. Участок пути длиной 1 250 м включает в себя прямолинейный отрезок длиной 500 м, входную переходную кривую длиной 150 м, круговую кривую длиной 300 м, выходную переходную кривую длиной 150 м и еще один прямолинейный отрезок длиной 150 м. Радиусы круговых кривых составляли 650 и 300 м. При движении по круговой кривой радиусом 650 м (допустимое непогашенное ускорение согласно Нормам равно  $0,7 \text{ м/с}^2$  [7]) с возвышением наружного рельса 0,11 м наибольшая допустимая скорость движения составляет 108 км/ч. Для круговой кривой радиусом 300 м с возвышением наружного рельса 0,15 м наибольшая допустимая скорость движения составляет 80 км/ч.

При движении экипажа по круговой кривой дополнительным критерием оценки его динамических характеристик является коэффициент устойчивости экипажа от опрокидывания ( $k_{opr}$ ).

На рис. 3–8 приведены максимальные расчетные значения показателей плавности хода ( $W_G, W_V$ ), рамных сил ( $H_r$ ), коэффициентов вертикальной динамики ( $k_{dv1}, k_{dv2}$ ) и коэффициентов запаса устойчивости против схода колес с рельсов ( $k_{st}$ ), полученные для рассматриваемых локомотивов. Как видно из приведенных рисунков, значения динамических показателей как тепловоза ТЭ116, так и локомотива типа ER20 по большинству нормируемых величин не превышают допустимых значений во всем исследованном диапазоне изменения скоростей движения.

При этом значения некоторых рассматриваемых динамических характеристик для обеих экипажей несущественно отличаются друг от друга. Существенно худшие показатели по коэффициентам вертикальной динамики обеих ступеней рессорного подвешивания имеет тепловоз ТЭ116.

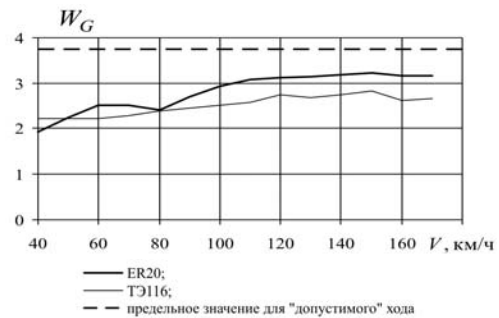


Рис. 3. Зависимости максимальных значений показателя плавности хода в горизонтальном направлении от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по прямым участкам пути

Fig. 3. Dependences of maximum values of smoothness in the horizontal direction on the speed of the locomotive ER20 and TE116 on straight sections of the track

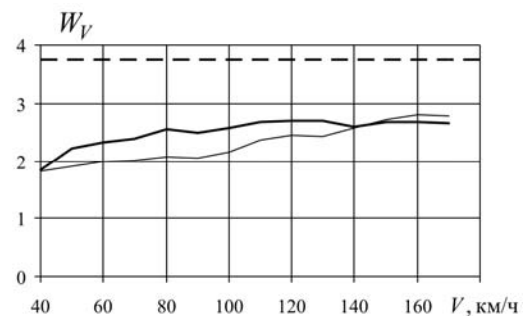


Рис. 4. Зависимости максимальных значений показателя плавности хода в вертикальном направлении от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по прямым участкам пути

Fig. 4. Dependences of maximum values of smoothness in the vertical direction on the speed of the locomotive ER20 and TE116 on straight sections of the track

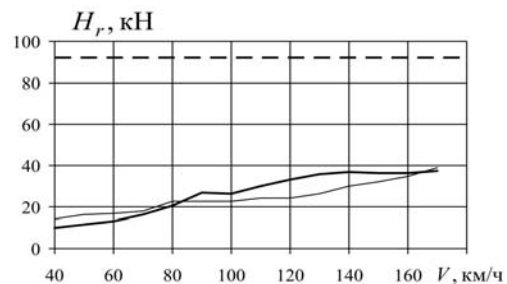


Рис. 5. Зависимости максимальных значений рамных сил от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по прямым участкам пути

Fig. 5. Dependences of maximum values of frame forces on the speed of the locomotive ER20 and TE116 on straight sections of the track

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

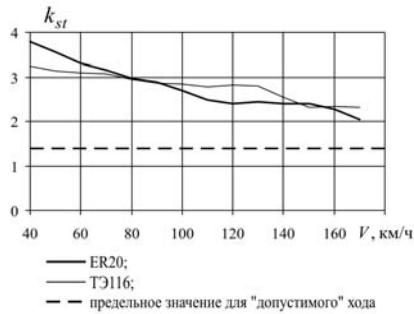


Рис. 6. Зависимости минимальных значений коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельсов от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по прямым участкам пути

Fig. 6. Dependences of the minimum values of safety factor against derailment of the wheel from the rail on the speed of locomotive ER20 and TE116 on straight sections of the track

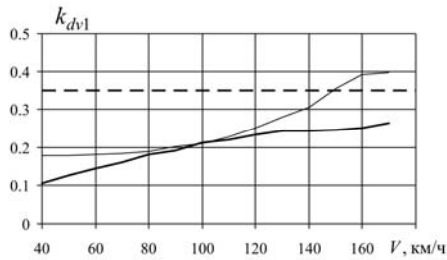


Рис. 7. Зависимости максимальных значений коэффициентов вертикальной динамики первой ступени подвешивания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по прямым участкам пути

Fig. 7. Dependences of maximum values of the coefficients of the vertical dynamics of the first stage hanging on the speed of the locomotive ER20 and TE116 on straight sections of the track

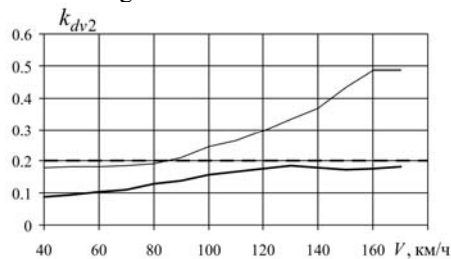


Рис. 8. Зависимости максимальных значений коэффициентов вертикальной динамики второй ступени подвешивания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по прямым участкам пути

Fig. 8. Dependences of maximum values of the coefficients of the vertical dynamics of the second stage hanging on the speed of the locomotive ER20 and TE116 on straight sections of the track

На рис. 9–18 приведены графики зависимости максимальных значений рамных сил, коэффициента устойчивости экипажа от опрокидывания, коэффициентов вертикальной динамики, коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельсов для тепловозов ТЭ116 и ER20, движущихся по круговым кривым радиуса 650 м (рис. 9–13) и радиуса 300 м (рис. 14–18) от скорости движения.

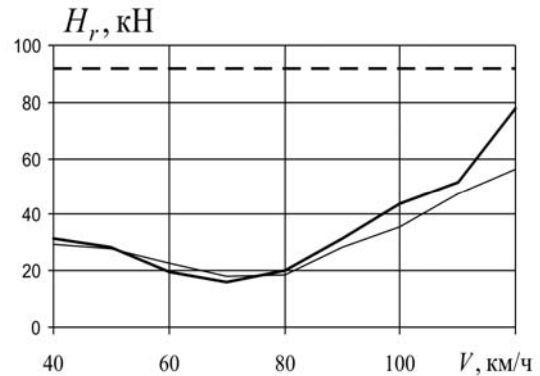


Рис. 9. Зависимости максимальных значений рамных сил от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 650 м

Fig. 9. Dependences of maximum values of frame forces on the speed of the locomotive ER20 and TE116 along a circular curve, radius of 650 m

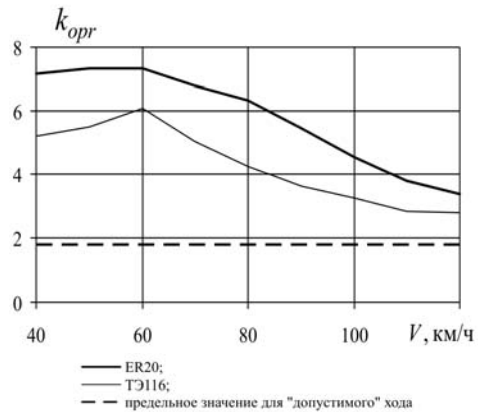


Рис. 10. Зависимости минимальных значений коэффициента устойчивости экипажа от опрокидывания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 650 м

Fig. 10. Dependences of the minimum values of stability factor against overturning of the crew on the speed of locomotive ER20 and TE116 on a circular curve, radius of 650 m



## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

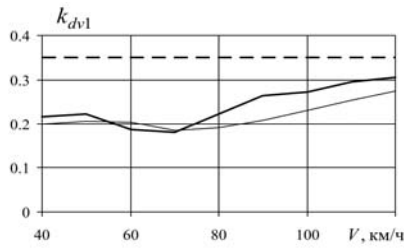


Рис. 11. Зависимости максимальных значений коэффициентов вертикальной динамики первой ступени подвешивания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 650 м

Fig. 11. Dependences of maximum values of the coefficients of the vertical dynamics of the first stage hanging on the speed of the locomotive ER20 and TE116 along a circular curve, radius of 650 m

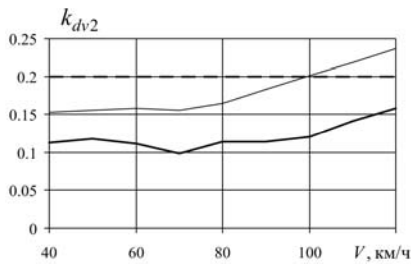


Рис. 12. Зависимости максимальных значений коэффициентов вертикальной динамики второй ступени подвешивания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 650 м

Fig. 12. Dependences of maximum values of the coefficients of the vertical dynamics of the second stage hanging on the speed of the locomotive ER20 and TE116 along a circular curve, radius of 650 m

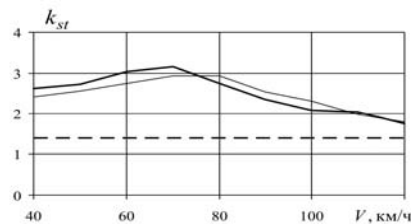


Рис. 13. Зависимости минимальных значений коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельсов от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 650 м

Fig. 13. Dependences of the minimum values of safety factor against derailment of the wheel from the rail on the speed of locomotive ER20 and TE116 on a circular curve, radius of 650 m

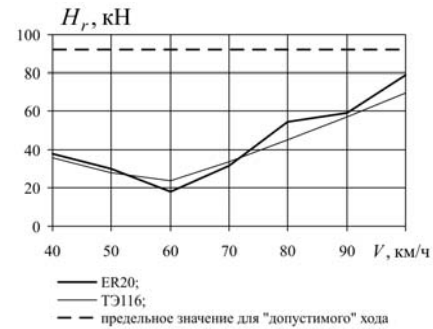


Рис. 14. Зависимости максимальных значений рамных сил от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 300 м

Fig. 15. Dependences of maximum values of frame forces on the speed of the locomotive ER20 and TE116 along a circular curve, radius 300 m

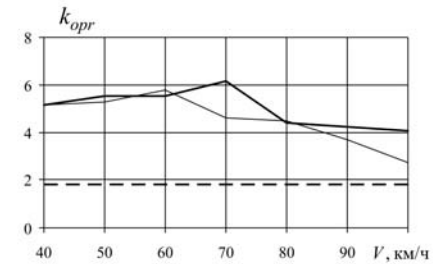


Рис. 15. Зависимости минимальных значений коэффициента устойчивости экипажа от опрокидывания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 300 м

Fig. 15. Dependences of the minimum values of stability factor against overturning the crew on the speed of locomotive ER20 and TE116 in a circular curve, radius of 300 m

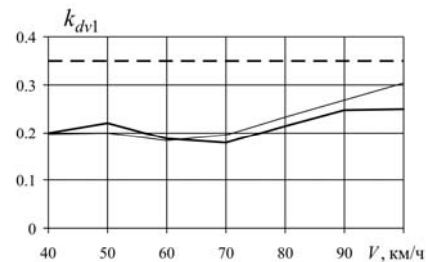


Рис. 16. Зависимости максимальных значений коэффициентов вертикальной динамики первой ступени подвешивания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 300 м

Fig. 16. Dependences of maximum values of the coefficients of the vertical dynamics of the first stage hanging on the speed of the locomotive ER20 and TE116 along a circular curve, radius of 300 m

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

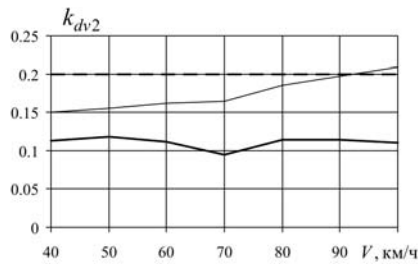


Рис. 17. Зависимости максимальных значений коэффициентов вертикальной динамики второй ступени подвешивания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 300 м

Fig. 17. Dependences of maximum values of the coefficients of the vertical dynamics of the second stage hanging on the speed of the locomotive ER20 and TE116 along a circular curve, radius of 300 m

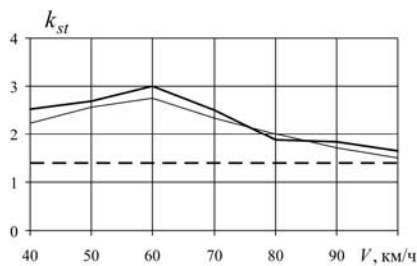


Рис. 18. Зависимости минимальных значений коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельсов от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 300 м

Fig. 18. Dependences of the minimum values of safety factor against derailment of the wheel from the rail on the speed of locomotive ER20 and TE116 in a circular curve, radius of 300 m

Проведенные исследования показали, что при всех рассмотренных скоростях движения, для которых допустимо движение по описанным выше круговым кривым, нормируемые динамические показатели не превышают допустимых значений.

### Научная новизна и практическая значимость

Разработана математическая модель пространственного движения шестиосного локомотива перспективной конструкции, учитывающая особенности его конструкции, которая может быть использована при проведении научных исследований по созданию перспективных конструкций локомотивов.

Дана оценка динамических характеристик локомотива перспективной конструкции при его движении по пути произвольного очертания.

### Выводы

Оценка динамических характеристик локомотива типа ER20 показала возможность использования его на железнодорожной колее шириной 1520 мм при движении со скоростями до 140 км/ч. Естественно, это требует последующей экспериментальной проверки.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грузовой тепловоз ER20 CF для Литвы // Ж.-д. мира. – 2009. – № 5. – С. 17–24.
2. Короп, Г. В. Разработка и исследование математической модели движения шестиосного локомотива с управляемой радиальной установкой колесных пар / Г. В. Короп, С. А. Клюев, Е. В. Зубарь // Вісн. СНУ ім. В. Даля. – 2013. – № 4 (193), ч. 2. – С. 65–68.
3. Лазарян, В. А. Динамика транспортных средств / В. А. Лазарян. – Киев : Наук. думка, 1985. – 528 с.
4. Маслиев, В. Г. К 50-летию создания первого отечественного тепловоза на пневматическом рессорном подвешивании / В. Г. Маслиев // Вісн. НТУ «ХП». Сер. : Трансп. машинобудування. – Харків, 2013. – № 32 (1005). – С. 60–66.
5. Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, В. С. Иккол [и др.]. – Киев : Наук. думка, 1989. – 240 с.
6. Мямлин, С. В. Совершенствование конструкции ходовых частей локомотивов / С. В. Мямлин, Л. А. Недужая // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. залізн. трансп. – 2013. – № 5 (47). – С. 124–136. doi: 10.15802/stp2013/17977.
7. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – Москва : МПС РФ : ВНИИВ, 1998. – 145 с.
8. Обновление локомотивного парка Литовских железных дорог / С. Дайлидка, С. В. Мямлин, Л. П. Лингайтис [и др.] : зб. наук. пр. / ДонІЗТ. – Донецк, 2011. – Вип. 28. – С. 174–179.
9. Пономарева, Е. Тепловоз ER20 CF : особенности конструкции / Е. Пономарева // Локомотивинформ. – 2012. – № 2. – С. 12–17.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

10. Програма оновлення локомотивного парку залізниць України на 2012-2016 роки : постанова Кабінету Міністрів України від 1 серпня 2011 р. №840 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/840-2011-%D0%BF>. – Загл. с екрана. – Проверено : 31.03.2015.
11. Радченко, Н. А. Криволинейное движение рельсовых транспортных средств / Н. А. Радченко. – Киев : Наук. думка, 1988. – 212 с.
12. Стан локомотивного парку Укрзалізниця // Магістраль. – 2012. – № 20. – С. 2.
13. Ушкалов, В. Ф. Расчетные возмущения для оценки динамических качеств грузовых вагонов / В. Ф. Ушкалов, Л. Г. Лапина, И. А. Машенко // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. залізн. трансп. – 2013. – № 4 (46). – С. 135–144. doi: 10.15802/stp2013-16600.
14. Myamlin, S. Construction Analysis of Mechanical Parts of Locomotives / S. Myamlin, M. Luchanin, L. Neduzha // TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. – 2013. – Vol. 13, № 3. – P. 162–169.
15. Myamlin, S. Mathematical Modeling of a Cargo Locomotive / S. Myamlin, S. Dailidka, L. Neduzha // Transport Means : Proc. of 16th Intern. Conf. / Kaunas : Kaunas University of Technology, 2012. – P. 310–312.
16. Ushkalov, V. F. The influence of locomotives state on their wheelset wear under operation conditions / V. F. Ushkalov, O. M. Markova, E. N. Kovtun // Supplement to Vehicle System Dynamics. – 1998. – Vol. 29. – P. 18–29. doi: 10.1080/00423119808969549.

С. В. МЯМЛІН<sup>1</sup>, Н. Ю. НАУМЕНКО<sup>2</sup>, О. М. МАРКОВА<sup>3</sup>, О. М. КОВТУН<sup>4</sup>,  
В. В. МАЛІЙ<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Вагони і вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 84 98, ел. пошта [sergeymyamlin@gmail.com](mailto:sergeymyamlin@gmail.com), ORCID 0000-0002-7383-9304

<sup>2</sup>Відділ «Динаміка багатомірних механічних систем», Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, вул. Лешко-Попеля, 15, Дніпропетровськ, Україна, 49005, тел. +38 (056) 375 68 01, ел. пошта [der7@ukr.net](mailto:der7@ukr.net), ORCID 0000-0002-6913-2568

<sup>3</sup>Відділ «Динаміка багатомірних механічних систем», Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, вул. Лешко-Попеля, 15, Дніпропетровськ, Україна, 49005, тел. +38 (056) 375 68 03, ел. пошта [der7@ukr.net](mailto:der7@ukr.net), ORCID 0000-0002-9390-4046

<sup>4</sup>Відділ «Динаміка багатомірних механічних систем», Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, вул. Лешко-Попеля, 15, Дніпропетровськ, Україна, 49005, тел. +38 (0562) 46 79 35, ел. пошта [der7@ukr.net](mailto:der7@ukr.net), ORCID 0000-0002-2961-3682

<sup>5\*</sup>Відділ «Динаміка багатомірних механічних систем», Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, вул. Лешко-Попеля, 15, Дніпропетровськ, Україна, 49005, тел. +38 (0562) 46 79 35, ел. пошта [der7@ukr.net](mailto:der7@ukr.net), ORCID 0000-0002-6501-1398

## ОЦІНКА ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ШЕСТИВІСНОГО ЛОКОМОТИВА

**Мета.** Робота присвячена оцінці динамічних властивостей локомотива перспективної конструкції та визначенню можливості його використання на залізничних коліях України. **Методика.** Для досягнення поставленої мети використані методи математичного та комп'ютерного моделювання динаміки залізничних транспортних засобів, а також методи числового інтегрування систем звичайних нелінійних рівнянь. **Результати.** Для розв'язання поставленої задачі побудована розрахункова схема локомотива на тривісних візках, яка представляє собою систему твердих тіл, з'єднаних елементами різної реології. З використанням цієї розрахункової схеми розроблено математичну модель просторового руху локомотива, яка дозволяє проводити дослідження його просторових коливань при русі по прямолінійним та криволінійним ділянкам колії із випадковими нерівностями в плані та профілі. При складанні математичної моделі приймалися до уваги як геометричні (нелінійність профілю кочення колеса), так і фізичні нелінійності системи (робота сил сухого тертя, нелінійність характеристик взаємодії коліс та рейок). За допомогою комп'ютерного моделювання проведено багатоваріантні розрахунки з метою оцінки динамічних властивостей локомотива при його русі по прямолінійним та криволінійним ділянкам колії. При цьому визначались показники плавності ходу локомотива в горизонтальній та вертикальній площинах, рамні сили, коефіцієнти вертикальної динаміки в першій та другій ступенях підвищення, коефіцієнти запасу стійкості проти сходу коліс із рейок. Крім того, проведено порівняння отриманих результатів із аналогічними характеристиками широко використовуваного

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

на залізницях України шестивісного тепловоза ТЭ116. Визначено вплив швидкості руху та технічного стану залізничної колії на безпеку руху локомотива. **Наукова новизна.** Розроблена математична модель просторового руху шестивісного локомотива перспективної конструкції, що враховує особливості його конструкції, та наведена оцінка динамічних характеристик при русі екіпажа по колії довільного обрису. **Практична значимість.** Розроблена математична модель руху шестивісного локомотива може бути використана при проведенні наукових досліджень по створенню перспективних конструкцій локомотивів.

*Ключові слова:* рухомий склад; локомотив; математична модель; динамічні показники

S. V. MYAMLIN<sup>1</sup>, N. YU. NAUMENKO<sup>2</sup>, O. M. MARKOVA<sup>3</sup>, H. M. KOVTUN<sup>4</sup>,  
V. V. MALIY<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Car and Car Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 776 84 98, e-mail sergeymyamin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304

<sup>2</sup>Dep. «Dynamics of Multidimensional Mechanical Systems», Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Leshko-Popelia St., 15, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 375 68 01, e-mail dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-6913-2568

<sup>3</sup>Dep. «Dynamics of Multidimensional Mechanical Systems», Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Leshko-Popelia St., 15, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 375 68 03, e-mail dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-9390-4046

<sup>4</sup>Dep. «Dynamics of Multidimensional Mechanical Systems», Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Leshko-Popelia St., 15, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, tel. +38 (0562) 46 79 35, e-mail dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-2961-3682

<sup>5\*</sup>Dep. «Dynamics of Multidimensional Mechanical Systems», Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Leshko-Popelia St., 15, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, tel. +38 (0562) 46 79 35, e-mail dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-6501-1398

## EVALUATION OF DYNAMIC INDICATORS OF SIX-AXLE LOCOMOTIVE

**Purpose.** The paper is devoted to dynamic characteristics evaluation of the locomotive with prospective design and determination the feasibility of its use on the Ukrainian railways. **Methodology.** The methods of mathematical and computer modeling of the dynamics of railway vehicles, as well as methods for the numerical integration of systems of ordinary nonlinear differential equations were used to solve the problem. **Findings.** The calculated diagram of a locomotive on three-axle bogies was built to solve the problem, and it is a system of rigid bodies connected by various elements of rheology. The mathematical model of the locomotive movement, allowing studying its spatial vibrations at driving on straight and curved sections of the track with random irregularities in plan and profile was developed with use of this calculated diagram. At compiling the mathematical model took into account both geometric (nonlinearity profile of the wheel roll surface) and physical nonlinearity of the system (the work forces of dry friction, nonlinearity characteristics of interaction forces between wheels and rails). The multivariate calculations, which allowed assessing the dynamic qualities of the locomotive at its movement along straight and curved sections of the track, were realized with the use of computer modeling. The smoothness movement indicators of the locomotive in horizontal and vertical planes, frame strength, coefficients of vertical dynamics in the first and second stages of the suspension, the load factor of resistance against the derailment of the wheel from the rail were determined at the period of research. In addition, a comparison of the obtained results with similar characteristics is widely used on the Ukrainian railways in six-axle locomotive TE 116. The influence of speed and technical state of the track on the locomotive traffic safety was determined. **Originality.** A mathematical model of the spatial movement of a six-axle locomotive with prospective design, taking into account the peculiarities of its design was developed. Evaluation of dynamic characteristics at the carriage movement along a track of arbitrary shape was made. **Practical value.** The developed mathematical model of the six-axle locomotive movement can be used at conducting research on development of advanced locomotives designs.

*Keywords:* rolling stock; locomotive; mathematical model; dynamic indicators

### REFERENCES

1. Gruzovoy teplovoz ER20 CF dlya Litvy [Freight locomotive ER20 CF for Lithuania]. *Zheleznyye dorogi mira – Railways of the World*, 2009, no. 5, pp. 17-24.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

2. Korop G.V., Klyuyev S.A., Zubar Ye.V. Razrabotka i issledovaniye matematicheskoy modeli dvizheniya sheshtionogo lokomotiva s upravlyayemoy radialnoy ustanovkoy kolesnykh par [Development and research of mathematical model of six-axle locomotive with a controlled radial installation of wheel pairs]. *Visnyk Shkhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V. Dalia* [Bulletin of the East Ukrainian National University named after V. Dahl], 2013, no. 4 (193), part 2, pp. 65-68.
3. Lazaryan V.A. *Dinamika transportnykh sredstv* [The dynamics of vehicles]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1985. 528 p.
4. Masliyev V.G. K 50-letiyu sozdaniya pervogo otechestvennogo teplovoza na pnevmaticheskoy ressonnom podveshivannii [On the 50th anniversary of the first Russian locomotive on the pneumatic spring suspension]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu Kharkivskoho Politekhnichnoho Instytutu* [Bulletin of National Technical University of Kharkiv Polytechnic Institute], 2013, no. 32 (1005), pp. 60-66.
5. Ushkalov V.F., Reznikov L.M., Ikkol V.S. *Matematicheskoye modelirovaniye kolebaniy relsovykh transportnykh sredstv* [Mathematical modeling of vibrations of railway vehicles]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1989. 240 p.
6. Myamlin S.V., Neduzhaya L.A. Sovershenstvovaniye konstruksii khodovykh chastey lokomotivov [Design improvement of the locomotive running gears]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 5 (47), pp. 124-136. doi: 10.15802/stp2013/17977.
7. *Normy dlya rascheta i otsenki prochnosti nesushchikh elementov, dinamicheskikh kachestv i vozdeystviya na put ekipazhnoy chasti lokomotivov zheleznykh dorog MPS RF kolei 1520 mm* [Standards for the calculation and assessment of the strength of load-bearing elements, dynamic qualities and impact on the track of undercarriage locomotives Ministry of Railways of the Russian 1,520 mm]. Moscow, Ministerstvo putey soobshcheniya Rossiyskoy Federatsii, Vsesoyuznyy nauchno-issledovatel'skiy institut vagonostroeniya Publ., 1998. 145 p.
8. Daylidka S., Myamlin S.V., Lingaytis L.P., Neduzhaya L.A., Yastremskas V. Obnovleniye lokomotivnogo parka Litovskikh zheleznykh dorog [Upgrading the locomotive fleet of Lithuanian Railways]. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu* [Proc. of Donetsk Institute of Railway Transport], 2011, vol. 28, pp. 174-179.
9. Ponomareva Ye. Teplovoz ER20 CF: osobennosti konstruksii [The locomotive ER20 CF: design features]. *Lokomotiv-Inform – Lokomotiv-Inform*, 2012, no. 2, pp. 12-17.
10. *Prohrama onovlennia lokomotyvnoho parku zaliznyts Ukrainy na 2012-2016 roky* [The upgrade program for railways locomotive park of Ukraine for 2012-2016]. Available at: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/840-2011-%D0%BF> (Accessed 31. 03.2015).
11. Radchenko N.A. *Krivolineynoye dvizheniye relsovykh transportnykh sredstv* [Curvilinear motion of railway vehicles]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1988. 212 p.
12. *Stan lokomotyvnoho parku Ukrzaliznytsi* [The state of railways locomotive fleet]. *Magistral – Magistral*, 2012, no. 20, p. 2.
13. Ushkalov V.F., Lapina L.G., Mashchenko I.A. Raschetnyye vozmushcheniya dlya otsenki dinamicheskikh kachestv gruzovykh vagonov [Calculated disturbances for evaluation of dynamical properties of freight cars]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 4 (46), pp. 135-144. doi: 10.15802/stp2013/16600.
14. Myamlin S., Luchanin M., Neduzha L. Construction Analysis of Mechanical Parts of Locomotives. *TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture*, 2013, vol. 13, no. 3, pp. 162-169.
15. Myamlin S., Dailidka S., Neduzha L. Mathematical Modeling of a Cargo Locomotive. Proc. of 16th Intern. Conf. Transport Means 2012, Kaunas, 2012, pp. 310-312.
16. Ushkalov V.F., Markova O.M., Kovtun E.N. The influence of locomotives state on their wheelset wear under operation conditions. *Supplement to Vehicle System Dynamics*, 1998, vol. 29, pp. 18-29. doi: 10.1080/00423119808969549.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н. В. Л. Горобцом (Украина)*

Поступила в редколлегию 03.02.2015

Принята к печати 20.04.2015