

Днепропетровский институт инженеров
железнодорожного транспорта

Мацур Марьян Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
ДВИЖЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ
ЭКИПАЖЕЙ С ЗАВИСИМЫМ
И НЕЗАВИСИМЫМ ВРАЩЕНИЕМ
КОЛЁС

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Днепропетровск 1973

НТБ
ДНУЖТ

МПС—СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

Магур Марьян Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ
ОКЛАДОВ С ЗАВИСИМЫМ И НЕЗАВИСИМЫМ ВРАЩЕНИЕМ
КОЛЕС

(01.02.06. Динамика, прочность и надежность
машин, приборов и аппаратуры)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1973

НТБ
ДНУЖТ

Успешное решение задачи удовлетворения растущей потребности населения в быстром перемещении невозможно без повышения скоростей движения поездов. Для решения этой задачи необходимо совершенствовать существующие и создавать новые конструкции рельсовых экипажей. Для существующего подвижного состава высокоскоростное движение рельсовых экипажей часто бывает ограничено наличием автоколебаний извилистого движения. Эти колебания при малых скоростях движения (примерно до 100 км/час) не угрожают безопасности движения. С увеличением же скорости вследствие наличия неустойчивости движения поперечные силы, действующие на рельсы, быстро увеличиваются, и может возникнуть опасное состояние, связанное с возможностью разрушения пути или схода экипажа с рельсов. В связи с этим особо важное значение приобретает проблема создания таких конструкций рельсовых экипажей, движение которых в заданном диапазоне скоростей было бы асимптотически устойчивым в смысле Ляпунова.

Фундаментальные исследования боковых колебаний и путевой устойчивости железнодорожных экипажей выполнены Н.А. Ковалевым, С.М. Куценко, В.А. Лазаряном, В.Б. Меделем, Ю.И. Неймарком, Т.А. Тибяловым, Н.А. Туфневым и др. Среди работ зарубежных ученых следует отметить работы Картера, Мацудайры, Рокара, Уиккенса, Де Патера.

При теоретических исследованиях путевой устойчивости транспортных экипажей сложной проблемой является введение в расчет и определение характеристик взаимодействия упругого колеса и пути. Решению этой проблемы посвящены работы М.В. Келдыша, Э. Картера, В.И. Москавовского, И. Рокара и др. В работах Ю.И. Неймарка и Н.А. Туфнева показано, что при достаточно больших величинах кинематических параметров упругого колеса из теории М.В. Келдыша как частный случай

следует гипотеза увода, предложенная Картером и Рокаром.

В настоящее время в СССР и за рубежом проводятся теоретические и экспериментальные исследования динамических качеств экипажей на тележках со свободным вращением колес с целью применения их для высокоскоростного транспорта. Конструкции тележек со свободными колесами пока не получили широкого распространения в современных рельсовых экипажах, и вопросы динамики подвижного состава с такими тележками мало изучены.

По мнению ряда специалистов применение независимо вращающихся колес с криволинейной поверхностью катания позволит улучшить ходовые качества и снизить вес рельсовых экипажей, улучшить сцепление между колесами и рельсом, уменьшит контактное давление и сопротивление качению, уменьшит износ бандажей. Во многих работах отмечено, что профиль нового бандажа должен изготавливаться таким же, как и профиль бандажа, получившего износ. Этим будет достигнуто минимальное искажение нового профиля вследствие его износа в течение всего срока службы бандажа.

В этой работе излагается методика исследования по первому приближению Ляпунова устойчивости невозмущенного прямолинейного движения рельсовых экипажей с произвольной крутильной жесткостью K_{ϕ} колесной пары. Учет упругих деформаций колесной пары при скручивании позволяет провести исследования также и в предельных случаях: свободное ($K_{\phi}=0$) и жесткое ($K_{\phi}=\infty$) соединение колес с осью. Представляя рельсовый экипаж механическими голономной и неголономной системами, проводится обоснование выбора расчетной схемы для исследования устойчивости движения. При этом исследуется влияние

параметров колеса и рельса с криволинейными поверхностями катания, а также параметров рессорного подвешивания вагонов существующего подвижного состава на устойчивость движения; определяются рациональные параметры конструкций экипажей со свободной и жесткой насадкой колес на ось; проводится сравнительная оценка с точки зрения устойчивости движения динамических качеств вагонов с жесткой и свободной насадкой колес на ось.

Результаты проведенных исследований с точки зрения устойчивости движения позволяют установить возможность применения экипажей со свободным вращением колес для высокоскоростного транспорта, а также существенно облегчить задачу о выборе конструктивных схем и определении параметров высокоскоростных экипажей.

Сравнение результатов аналитических исследований устойчивости движения рельсовых экипажей с жесткой и со свободной насадкой колес на ось можно проводить только в том случае, если их расчетные схемы одинаковы. Выбор общей математической модели значительно усложняет задачу. В расчетной схеме рельсового экипажа с криволинейной поверхностью катания независимо вращающихся колес необходимо учесть взаимные углы вращения колес, посаженных на одну ось. В таком случае для определения горизонтальных продольных сил, действующих на колесные пары со стороны рельсов, нельзя использовать известные формулы, выведенные в предположении жесткого соединения колес с осью.

Криволинейные поверхности катания колеса и рельса в работе аппроксимированы поверхностями с постоянными радиусами кривизны. Используются следующие допущения, введенные Уиккерсом: 1) малость перемещений колес относительно рельсов, 2) одиточечный контакт колеса с рельсом, 3) равенство контактных углов β_1 и равенство

радиусов r_0 кругов катания обоих колес колесной пары в среднем положении, 4) путь принят идеально равным и однородно упругим.

В работе вывод формул для определения горизонтальных сил взаимодействия колеса и рельса проведен на основании теории псевдоскольжения, предложенной Картером и Рокаром. На основании этой теории задача о качении упругого колеса по упругому основанию сводится к задаче о качении с проскальзыванием недеформируемого колеса по жесткому основанию. Нелинейная зависимость касательной силы в точке контакта колеса и рельса от относительной скорости скольжения, полученная Ф.Картером и В.И.Моссаковским, аппроксимируется в работе методом прямой линеаризации. Линейные выражения составляющих касательной силы, действующих на K -ое колесо i -ой тележки со стороны рельса в продольном и поперечном горизонтальных направлениях, имеют вид:

$$X_{ik} = -f \dot{x}_i^{-1} u_{ik}, \quad Y_{ik} = -f \dot{x}_i^{-1} v_{ik}, \quad (1)$$

где f - коэффициент псевдоскольжения, \dot{x}_i - скорость движения i -ой тележки. Составляющие скорости колеса в точке контакта с рельсом (например, для двухосной тележки в случае жесткой связи колесной пары с рамой) определяются по формулам:

$$u_{ik} = (-1)^{k+1} [d_1 \dot{\psi}_i + \mu \dot{x}_i r_0^{-1} (y_i + a_{ik} \psi_i - \bar{y}_{ik}) + (-1)^k r_0 \dot{\phi}_{ik}], \quad (2)$$

$$v_{ik} = \dot{y}_i + a_{ik} \dot{\psi}_i - \dot{\bar{y}}_{ik} - \dot{x}_i \psi_i \quad (3)$$

В (2), (3) введены обозначения: y_i, ψ_i - поперечное перемещение и угол поворота i -ой тележки; \bar{y}_{ik} - перемещение рельсовой нити под K -ым колесом; $2d_1$ - расстояние между кругами катания колесной пары; a_{ik} - расстояние от центра масс тележ-

ки до осей колесных пар, принимаемое положительным, если колесные пары расположены справа от центра масс тележки. Эффективная коничность колеса

$$M = \left(1 + \frac{R_1}{\Delta R}\right) \delta_0. \quad (4)$$

В (4) R_1 - радиус головки рельса, ΔR - разность радиусов поверхностей катания колеса и рельса.

Угловая скорость вращения колеса представлена в виде

$$\dot{\alpha}_{ik} = \dot{x}_i \gamma_0^{-1} + \dot{\phi}_{ik}, \quad (5)$$

где $\dot{\phi}_{ik}$ - добавка к угловой скорости вращения колеса, обусловленная возникновением колебаний.

В результате линейной аппроксимации сил псевдоскольжения получена следующая формула для определения коэффициента псевдоскольжения

$$f = \frac{5}{8} \sqrt{\kappa_0 \gamma_0 N \ell (1 - \delta)^{-1}} \quad (6)$$

при
$$\varepsilon = \dot{x}_i^{-1} \sqrt{u_{ik}^2 + v_{ik}^2} \leq \frac{5}{4} F^* f^{-1}$$

В (6) δ - модуль сдвига, γ_0 - коэффициент Пуассона, N - нагрузка на колесо, ℓ - площадь контактной площадки, F^* - сила кулонова трения.

Вследствие действия сил тяжести при поперечном смещении колесной пары с криволинейной поверхностью катания колеса возникает восстанавливающая сила, характеризуемая гравитационной жесткостью

$$\kappa_0 = 2N \left(\frac{1}{\Delta R} + \frac{\delta_0}{d_1} \right). \quad (7)$$

Исследование влияния параметров поверхностей катания колеса и рельса в работе сведено к рассмотрению влияния эффективной коничности M и гравитационной жесткости κ_0 на устойчивость дви-

жения рельсовых экипажей. В формулах (4), (7) следует принять для конических колес $\Delta R = \infty$, а для цилиндрических $\Delta R = \infty$, $\delta_0 = 0$.

Если предположить, что направление вектора скорости центра тяжести тележки совпадает с ее продольной осью (колеса и рельсы недеформируемые), то из выпадения (3) получим уравнение классической неголономной связи типа Чаплыгина - Каратеодори

$$\dot{y}_i - \dot{x}_i \Psi_i = 0. \quad (8)$$

Несмотря на то, что введение неголономных связей противоречит теории псевдоскольжения, авторы многих работ указывают на целесообразность построения таких расчетных схем для исследования устойчивости движения рельсовых экипажей. Поэтому в настоящей работе рассматривается вопрос о возможности наложения классических неголономных связей на рельсовый экипаж как с жесткой, так и со свободной насадкой колес на ось. Кроме того исследуется устойчивость движения рельсовых экипажей с независимым вращением колес при отсутствии проскальзываний в продольном направлении. В этом случае выражение (2) превращается в уравнение неголономной связи

$$U_{ik} = 0. \quad (9)$$

В работе исследуется устойчивость движений двухосных и четырехосных, грузовых и пассажирских рельсовых экипажей с одинарным и двойным рессорным подвешиванием. Кузов двухосного вагона через систему элементов рессорного подвешивания опирается на две одноосные тележки, которые упруго перемещаются относительно кузова в вертикальном и горизонтальном (продольном и поперечном) направлениях. Кузов четырехосного вагона через пятники опирается на

две тележки типа ЦНИИ-ХЗ-0, а колесные пары жестко связаны с рамой тележки. Рассматривается также четырехосный полувагон на тележках типа ЦНИИ-ХЗ-0, когда колесные пары могут иметь упругие повороты относительно боковин. Четырехосный пассажирский вагон на тележках типа КВЗ-5 рассматривается как без учета, так и с учетом перемещений колесных пар относительно обрессоренных частей тележек вдоль и поперек оси пути. Исследование устойчивости движения указанных рельсовых экипажей с коническими жестко посаженными на ось колесами ранее выполнено В.А.Лазаряном и его соотрудниками.

Исследуемые экипажи представляют собой механические системы, состоящие из твердых тел, соединенных упруго-вязкими и шарнирными элементами. Механические системы имеют от 16 до 34 степеней свободы. Для составления дифференциальных уравнений системы используются уравнения Лагранжа второго рода. Если рельсовый экипаж представлен механической неголономной системой, то для составления дифференциальных уравнений применяются уравнения движения неголономной системы с множителями Лагранжа. Соответствующим выбором обобщенных координат система дифференциальных уравнений расщепляется на блоки из независимых между собой дифференциальных уравнений более низких порядков.

Устойчивость стационарных движений системы исследуется в постановке М.И. Неймарка и П.А. Фудаяева. Ими показано, что стационарные движения голономных и неголономных систем образуют в фазовом пространстве и пространстве конфигураций многообразие некоторых размерностей. Такой подход позволяет вскрыть природу нулевых корней характеристического уравнения. Нулевые корни характеристического уравнения, обусловленные наличием многообразия

стационарных движений, не связаны с наличием критического случая теории малых колебаний, и поэтому при исследовании устойчивости этого многообразия нулевые корни можно отбросить.

Для определения собственных значений квадратной матрицы P высоких порядков используется QR -алгоритм Френсиса-Кублановской. Теоретическая основа метода состоит в построении последовательности унитарных матриц Q_k и правых треугольных матриц R_k по рекуррентным формулам:

$$\begin{aligned} P &= Q_1 R_1 \\ R_{k-1} Q_{k-1} &= Q_k R_k \end{aligned} \quad (10)$$

Исходная матрица P приводится к правой почти треугольной, а затем к квазидиагональной матрице с клетками первого и второго порядка в зависимости от того собственные значения будут вещественными или комплексными. Квазидиагональная матрица получается при помощи метода вращений со сдвигом. В случае комплексными собственными значениями используется двойной сдвиг, чтобы не проводить действий с комплексными числами. Вычисления выполнены на ЭЦВМ "Минск-22" по программам, составленным на вычислительном центре Днепропетровского отделения Института механики АН УССР.

По вычисленным значениям собственных чисел строились графики зависимости наибольшей вещественной части корня h_{\max} от параметров системы, а также зоны устойчивости системы.

При исследовании устойчивости движения рельсовых экипажей по упрощенным расчетным схемам использовались критерии Рауса-Гурвица, Сильвестра и теоремы Лагранжа, Томсона, Гета.

Как показали исследования, математическая модель тележки без учета бокового отбоя, т.е. при наличии классических неголономных связей (8), не позволяет исследовать влияние параметров кузова и рессорного подвешивания экипажа на устойчивость движения, завышает значение критической скорости (скорости, при которой происходит переход от асимптотически устойчивого движения к неустойчивому). Поэтому подобные расчетные схемы рельсовых экипажей следует считать непригодными для исследования устойчивости движения экипажей как с жесткой, так и со свободной насадкой колес на ось.

С введением неголономных связей вида (9) уменьшается число степеней свободы системы, и незначительно упрощается расчет. При высоких скоростях движения неголономная система более устойчива чем голономная. Упрощенная расчетная схема со связями (9) может быть использована для исследования устойчивости движения рельсовых экипажей только со свободными колесами. Однако рельсовый экипаж целесообразно представлять голономной механической системой, так как одни и те же дифференциальные уравнения используются для исследования устойчивости движения экипажей с произвольной крутильной жесткостью K_{ϕ} колесной пары.

Механическая система для экипажей на тележках с цилиндрическими колесами как с жестким, так и со свободным соединением с осью обладает двумерным многообразием стационарных движений, описываемым уравнениями:

$$y = \frac{1}{2}(y_1 + y_2), \quad \psi = \frac{1}{2l}(y_2 - y_1), \quad (II)$$

где y, ψ - поперечное перемещение и угол поворота кузова вагона, $2l$ - база вагона. Из анализа уравнений (II) следует, что

экипаж на тележках с цилиндрическими колесами можно произвольным образом расположить в боковом направлении и придать ему произвольный начальный угол.

Для экипажа со свободным в отличие от экипажа с жестким креплением колес на оси наблюдается явление одностороннего смещения и при $M \neq 0$, если K_0 мало. Это установлено на основании уравнений четырехмерного многообразия стационарных движений, состоящих из

$$(II) \quad \begin{aligned} M \nu y + \frac{1}{8} \tau_0^2 (\dot{\phi}_{12} - \dot{\phi}_{11} + \dot{\phi}_{14} - \dot{\phi}_{13} + \dot{\phi}_{22} - \dot{\phi}_{21} + \dot{\phi}_{24} - \dot{\phi}_{23}) &= 0, \\ M \nu r \psi + \frac{1}{8} \tau_0^2 (\dot{\phi}_{11} - \dot{\phi}_{12} + \dot{\phi}_{13} - \dot{\phi}_{14} + \dot{\phi}_{22} - \dot{\phi}_{21} + \dot{\phi}_{24} - \dot{\phi}_{23}) &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

(ν — скорость движения вагона).

Такой результат согласуется с экспериментальными исследованиями, проведенными в Японии.

Создание конструкций вагонов, не позволяющих реализовать восстанавливающую силу достаточной величины при поперечном смещении колесной пары со свободным вращением колес, не представляет практического интереса вследствие одностороннего смещения таких экипажей. Восстанавливающую силу можно реализовать двумя способами: 1) изменением поверхностей катания колеса и рельса, 2) введением в конструкцию экипажа и пути дополнительных направляющих устройств. В работе рассмотрен первый способ реализации восстанавливающей силы и определены оптимальные значения гравитационной жесткости. Для четырехосных грузовых вагонов с жестким и с упругим соединением колесных пар с рамой тележки ($N = 10,5$ т) $K_0 = 60$ т/м, для четырехосных пассажирских вагонов с жестким и с упругим соединением колесных пар с рамой тележки ($N = 7,5$ т) $K_0 = 20$ т/м, для двухосного пассажирского вагона ($N = 6$ т) $K_0 = 40$ т/м. Тогда по

формуле (7) при $\delta_0 = 0,05$, $2d_1 = 1,58$ м получим разности радиусов поверхностей катания колеса и рельса соответственно 35, 75, 30 см. Если значение ΔR принять меньше чем оптимальное, то запас устойчивости уменьшается совсем незначительно. Поэтому для различных конструкций может быть принято $\Delta R \approx 30 - 35$ см. Чрезмерное уменьшение ΔR ограничено возможностью реализации движения при наличии стрелочных переводов и горизонтальных неровностей. Ниже при исследовании устойчивости движения экипажей с независимым вращением колес принимаются оптимальные значения гравитационной жесткости.

Для экипажей с независимым вращением колес благодаря учету продольных сил псевдоскольжения X_{ik} оказалось возможным исследовать влияние эффективной коничности M и момента инерции J_0 колеса на устойчивость движения. С увеличением M и J_0 запас устойчивости системы при малых скоростях уменьшается незначительно, а при высоких скоростях влияние этих параметров оказывается существенным. В интервале реальных значений $M \leq 0,1$, $J_0 \leq 0,01$ тм.сек² для экипажей с жесткой связью колесных пар с рамой тележки можно пренебречь силами инерции вращения независимых колес и не принимать во внимание продольные силы псевдоскольжения. На основании теорем Лагранжа, Томсона и Тета доказано, что движение таких экипажей будет устойчиво при всех скоростях. С уменьшением жесткости упругих связей между колесными парами и рамой тележки уменьшается запас устойчивости системы экипажей с независимым вращением колес и могут возникнуть неустойчивые режимы движения. В этом случае нельзя пренебречь влиянием параметров M и J_0 на устойчивость движения системы.

Характер влияния изгибной жесткости надбуксовых пружин в продольном K_x и поперечном K_y направлениях на устойчивость движения четырехосного пассажирского вагона с независимым вращением колес существенно не отличается между собой. Поэтому можно принять $K_x = K_y = K_u$. Рациональными значениями изгибной жесткости надбуксовых пружин будут $K_u \geq 500$ т/м. Для четырехосного грузового полувагона с независимым вращением колес рациональными значениями угловой жесткости рамы тележки будут $K_\psi \geq 200$ тм/рад.

Характерной особенностью всех рассмотренных рельсовых экипажей с независимым вращением колес при рациональном выборе параметров системы является то, что с увеличением скорости движения до 360 км/час увеличивается запас устойчивости системы. Эта особенность имеет место, если $\mu < 0,1$.

Из исследования влияния крутильной жесткости K_ϕ колесной пары на устойчивость движения сделан вывод о нецелесообразности специального применения конструктивного соединения колес упругой осью, работающей на кручение. Из всевозможных значений крутильной жесткости оптимальным будет $K_\phi = 0$. Изменение значений крутильной жесткости в интервале $K_\phi \geq 1000$ тм/рад не оказывает существенного влияния на устойчивость движения системы. Поэтому реальная крутильная жесткость применяемых колесных пар с жестко посаженными на ось колесами может не приниматься во внимание при исследовании устойчивости движения.

Увеличение гравитационной жесткости K_0 для экипажей с жестким соединением колес с осью повышает значение критической скорости. Однако с увеличением K_0 увеличивается эффективная конечность колеса, оказывающая дестабилизирующее влияние. Поэтому из-

нением параметров поверхностей катания колеса и рельса нельзя существенно повысить критическую скорость движения. Реальная гравитационная жесткость для обычных колес, применяемых на транспорте, мала и ее влиянием на устойчивость движения можно пренебречь.

Жесткости K_u, K_ψ упругих элементов, обеспечивающих повороты в горизонтальной плоскости колесных пар с жесткой насадкой колес, оказывают влияние на устойчивость движения следующим образом: с увеличением K_u, K_ψ критические скорости сначала растут и при $K_u = 900 - 1200$ т/м, $K_\psi = 900 - 1200$ тм/рад достигают наибольших величин. При дальнейшем увеличении K_u, K_ψ значения критических скоростей уменьшаются. В предельных случаях $K_u = \infty, K_\psi = \infty$, т.е. при жесткой связи рам тележек с колесными парами, движение всех рассмотренных экипажей с жесткой насадкой колес на ось неустойчиво, и движение экипажей со свободным вращением колес устойчиво при всех скоростях.

Исследования показали, что способ насадки колес на ось не влияет на колебания подергивания и голопирования.

На поперечные колебания экипажей с жесткой насадкой колес не оказывает влияние неравномерность вращения колесных пар. В формулах для определения продольной силы X_{ik} для экипажей с жесткой насадкой колес можно не принимать во внимание псевдоскольжение, обусловленное добавкой к угловой скорости вращения колесной пары.

Если параметры рассмотренных систем выбраны рационально, то влиянием поперечной жесткости рельсовой нити на запас устойчивости можно пренебречь и в случае криволинейной поверхности катания колеса и рельса.

Из проведенного анализа с точки зрения устойчивости движения следуют заключения:

1. Для высокоскоростного транспорта можно применять экипажи с криволинейными поверхностями катания независимо вращающихся колес. Соответствующим выбором конструктивных параметров будет обеспечена устойчивость движения таких рельсовых экипажей при сколь угодно высоких скоростях.

2. При исследовании устойчивости движения рельсовый экипаж как с жесткой, так и со свободной насадкой колес на ось целесообразно представлять механической голономной системой.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Мацур М.А. К вопросу о возможности наложения неголономных связей на рельсовый экипаж. - В кн.: Труды ДИИТа, 139, Днепропетровск, 1972.

2. Мацур М.А. Дифференциальные уравнения движения по криволинейным участкам пути скоростного рельсового экипажа на колесных парах перспективной конструкции. - В кн.: Труды ДИИТа, 139, Днепропетровск, 1972.

3. Мацур М.А. Устойчивость движения рельсового экипажа с криволинейной поверхностью катания независимо вращающихся колес. - В кн.: Некоторые задачи механики скоростного рельсового транспорта. "Наукова думка", Киев, 1973.

Материалы диссертации доложены:

1. На семинаре по механике ДИИТа, Днепропетровск, 1971.
2. На 33-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, Брянск, 1972.
3. На совещании "Некоторые задачи механики скоростного рельсового транспорта", Днепропетровск, 1972.
4. На научно-технической конференции ДИИТа, посвященной 50-летию образования СССР, Днепропетровск, 1972.
5. На семинарах по механике ДИИТа, Днепропетровск, 1972.

НТБ
ДНУЖТ

Сканировала Юнаковская В. В.

БТ 21903. Подписано к печати 27.1У.1973. Ротапринт ДИИТа.
Днепропетровск, 10, Университетская, 2.
Заказ № 370. Тираж 150 экз. Объем 1 п.л.