

СССР - МПС

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

КОРОТЕНКО М.Л.

кандидат технических наук, доцент

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ
РЕЛЬСОВЫХ ЭКИПАЖЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ИХ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

(Диссертация написана на русском языке)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

(05.22.07 - подвижной состав и тяга поездов)

Днепропетровск
1974

НТБ
ДНУЖТ

Диссертация выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта и Днепропетровском отделении Института механики АН УССР .

Научный консультант Заслуженный деятель науки УССР, академик АН УССР, доктор технических наук, профессор В.А. ЛАЗАРЕН .

Официальные оппоненты :

доктор технических наук, профессор А.В. ЛАБАТЕН ,

доктор физико-математических наук, профессор Б.И. КРИКОВ

доктор технических наук, профессор В.Б. МЕДВЕДЬ

Ведущее предприятие (учреждение) - Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта .

Автореферат разослан " 18 " мая 1974 г.

Дата состоится " 19 " декабря 1974 г.

Совета Днепропетровского института
транспорта (г. Днепропетровск,

библиотеке

На правах рукописи

КОРОТЯНКО М.Л.

кандидат технических наук, доцент

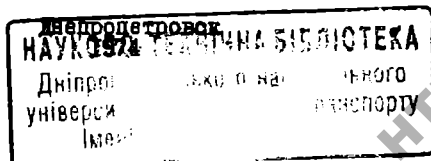
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ
РЕЛЬСОВЫХ ЭКИПАЖЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ИХ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

(Диссертация написана на русском языке)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

(05.22.07 - подвижной состав и тяга поездов)



Директивами XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971-1975 г.г. предусматривается дальнейшее увеличение пропускной и провозной способности железных дорог. Одним из основных способов решения этой задачи является повышение скорости движения поездов. Для этого, в частности, необходимо создание подвижного состава, обеспечивающего при достаточно высоких скоростях безопасность движения, требуемую плавность хода, минимальное воздействие на путь и т.д. При этом большое значение приобретает разработка эффективных методов исследования динамических процессов, протекающих в системе экипаж-путь.

Особенно важным является обеспечение устойчивости движения рельсовых экипажей. При сравнительно малых скоростях неустойчивость экипажей не угрожает безопасности движения, так как горизонтальные поперечные силы, действующие на путь, обычно не превышают допустимых величин. С повышением скорости движения эти силы быстро увеличиваются и могут достигнуть величин, при которых становится возможным сход экипажа с рельсов и даже разрушение пути. Поэтому при создании высокоскоростного транспорта необходима разработка таких конструкций подвижного состава, невозмущенное движение которых является устойчивым по Лапунову в заданном диапазоне скоростей.

Теоретические основы динамики подвижного состава железных дорог заложены в работах отечественных ученых Н.Е. Луковского, А.М. Годыцкого-Цвирко, В.А. Лазаряна, В.Б. Медела, М.С. Вериги, М.В. Винокурова, Н.А. Ковалева, С.М. Куценко, А.А. Львова, Т.А. Тишловой, И.И. Челнокова и других. Из зарубежных ученых следует отметить работы Картера, Калкера, Мацудайры, де Патера, Уикенса. Исследованием устойчивости невозмущенного движения рельсовых экипажей

много занималась ,под руководством В.А.Лазаряна, группа научных работников Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта и Днепропетровского Отделения Института механики АН УССР : Д.А.Длутач,Д.В.Демка,М.А.Мапур,Н.А.Радченко и др.

Реферируемая работа посвящена разработке методики исследования путевой устойчивости рельсовых экипажей и методов расчета,необходимых для построения рациональных конструктивных схем и определения рациональных значений параметров,при которых движение экипажей асимптотически устойчиво в заданном диапазоне скоростей.

Построение математических моделей рельсовых экипажей.

С точки зрения механики рельсовые экипажи представляют собой сложные многомассовые нелинейные механические системы. Для получения расчетных схем рельсовых экипажей приходится вводить ряд идеализаций , зависящих от свойств рассматриваемой системы и характера поставленной задачи .

В реферируемой работе особое внимание обращено на корректный выбор расчетных схем и построение их математических моделей . Для оценки адекватности математической модели реальной системе проводилось сравнение данных,полученных при теоретическом исследовании устойчивости движения,с результатами натурных испытаний рельсовых экипажей. Допустимость некоторых идеализаций устанавливались путем сравнения результатов,полученных при более точной и упрощенных схемах.

При получении исходной расчетной схемы экипажа с одинарным рессорным подвешиванием путь был принят прямым,горизонтальным, безинерционным и однородноупругим в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях . Кузов,надрессорные балки, боковые рамы тележки и колесные пары принимались твердыми телами . Было принято,

что боковые рамы тележек и колесные пары соединены между собой шарнирно и что при их взаимных поворотах в горизонтальной плоскости возникают восстанавливающие силы, пропорциональные перемещениям, а также, что поверхность катания колеса имеет нелинейное очертание и в клиновых гасителях колебаний действуют силы сухого трения. Число степеней свободы рассматриваемой системы равно 20. Так как принимаются во внимание горизонтальные поперечные перемещения рельсовых нитей, то добавляется еще 8 систем с $1/2$ степени свободы.

Уравнения движения были составлены как уравнения Лагранжа II рода. Их анализ показал, что исследование устойчивости движения сводится в данном случае к решению системы нелинейных дифференциальных уравнений 42-го порядка. Для определения сил взаимодействия колес и рельсов были использованы выражения, полученные Калкером, в которых принимались во внимание не только линейные проскальзывания колес относительно рельсов, но и их взаимные повороты (спины) относительно нормали к площади контакта, а коэффициенты псевдоскольжения определялись из решения пространственной задачи теории упругости. Также использовались выражения, полученные Картером, в которых принимались во внимание только линейные проскальзывания, а коэффициент псевдоскольжения определялся из решения плоской задачи теории упругости.

Сравнение собственных чисел матриц коэффициентов линеаризованных уравнений возмущенного движения, полученных при прочих равных условиях с учетом и без учета спина, показало, что они практически одинаковы. Поэтому при исследовании устойчивости движения по первому приближению Ляпунова нет необходимости принимать во внимание относительные проскальзывания при спине колес.

НТБ
ДНУЖТ

Опыты по определению коэффициента псевдоскольжения дают большой разброс результатов, так как его величина зависит от ряда условий: изменения давления колеса на рельс, вибраций, состояния поверхностей катания колеса и рельса и др. Поэтому в реферруемой работе коэффициент псевдоскольжения рассматривается, как ненадежный параметр, и, как это предложено Б.В.Булгаковым, все пространство параметров D разбивается на зоны надежной устойчивости, ненадежной устойчивости и заведомой неустойчивости. Рациональные параметры выбираются так, чтобы они соответствовали области надежной устойчивости.

Для определения области H рассматриваемых значений коэффициента псевдоскольжения в работе были использованы результаты опытов, выполненных в эксплуатационных условиях Н.Н.Меньшутинным. С учетом разброса данных измерений верхний F_{ϵ} и нижний F_H пределы значений коэффициента псевдоскольжения оказались близкими к величинам, определяемым по известным формулам :

$$F_{\epsilon} = 800 \sqrt{P \epsilon^2} \quad F_H = P(235 - 24P + P^2)$$

где P - давление колеса на рельс ; z - радиус колеса.

Эти формулы были использованы для определения границ области H . Также были рассмотрены расчетные схемы, в которых принимались во внимание масса пути при вертикальных и горизонтальных поперечных перемещениях, вязкое трение в пути и упругость кузова при крутильных колебаниях .

Сравнение результатов, соответствующих разным уровням идеализации, показало, что вертикальная упругость пути, масса пути, вязкое трение в пути не влияет на устойчивость движения. Оказалось, что при малых значениях жесткости K_{ϕ} упругих элементов, связывающих колесные пары и боковые рамы тележек в горизонтальной плоскости, система мало чувствительна к изменению величин коэффици -

НТБ
ДНУЖТ

циента псевдоскольжения и горизонтальной поперечной жесткости рельсовых нитей. При больших значениях жесткости K_r увеличение коэффициента псевдоскольжения и уменьшения горизонтальной жесткости пути повышает критическую скорость.

Установлено, что расчетная схема, в которой кузов, боковые рамы тележек и колесные пары принимаются твердыми телами (а эти тела связаны упруго-диссипативными элементами) является достаточно точной. Число степеней свободы такой системы равно 12. Упрощения расчетной схемы, при которых рассматривается какая-либо часть полной системы, приводят к неверным результатам.

В такой же постановке была рассмотрена расчетная схема экипажа с двойным рессорным подвешиванием. Число степеней свободы этой системы при принятых допущениях равно 36. В том случае, когда принимается во внимание упругость пути в горизонтальном направлении, добавляется еще 8 систем с $1/2$ степени свободы.

В данном случае принимались во внимание дополнительные вертикальные перемещения тел системы, связанные с изменением радиусов кругов катания колес при их горизонтальных поперечных перемещениях относительно рельсов, а также - момент сил сухого трения, действующий при поворотах тележек относительно кузова в горизонтальной плоскости. Устойчивость невозмущенного движения вагона определяется решением системы нелинейных дифференциальных уравнений 72-го порядка. В полученной системе уравнения, описывающие колебания в вертикальной продольной плоскости симметрии и боковые колебания, оказались связанными. Результаты расчетов показали, что эта связь слабая и ее можно пренебречь.

Установлено, что достаточно точной является расчетная схема, имеющая 28 степеней свободы. Устойчивость движения экипажа при этом определяется решением системы нелинейных дифференциальных

НТБ
ДНУЖТ

уравнений 40-го порядка .

Возмущенное движение рельсовых экипажей описывается системами нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. Для исследования устойчивости движения таких систем было использовано первое приближение Ляпунова. В большинстве случаев оказалось возможным разделить системы линеаризованных уравнений при помощи линейного преобразования координат на блоки более низкого порядка. Для линеаризованных систем были использованы приемы определения рациональных структур и параметров системы. В рассматриваемых системах помимо линеаризуемых нелинейностей , при которых правые части уравнений возмущенного движения могут быть разложены в степенные ряды , имеющие разрывные нелинейности типа сухого трения. Для того, чтобы установить влияние сил сухого трения на устойчивость движения , сравнивались решения нелинейных и линейных уравнений, полученных путем исключения сил сухого трения. Исследование таких линеаризованных уравнений также позволило установить характер движения систем , не имеющих демпферов сухого трения.

В процессе исследования устойчивости движения рельсовых экипажей был отработан математический аппарат и составлены программы решения задачи на ЭЦМ. Для решения полной проблемы собственных значений матрицы A коэффициентов уравнений возмущенного движения в нормальной форме Коши оказались эффективными итерационные методы степенной метод при $m \leq 22$ (здесь m - порядок матрицы) и QR - алгоритм, предложенный В.Н. Кублановский и Френсисом , при $m < 50$. Для построения границ области устойчивости в работе использовался метод рассечения плоскости параметров некоторой системой прямых с использованием линейной интерполяции вдоль рассекающей прямой , а также метод слежения вдоль границы искомой области . Решение систем нелинейных дифференциальных урав -

лений выполнялось преимущественно на АБМ. Контрольные расчеты на ЭЦВМ показали при этом хорошее совпадение результатов .

Определение рациональных конструктивных схем и параметров рельсовых экипажей

В реферируемой работе рассматриваются способы построения конструктивных схем и определения таких значений параметров, при которых невозмущенное движение рельсового экипажа асимптотически устойчиво в заданном диапазоне скоростей. Такие конструктивные схемы и значения параметров называем рациональными .

В 1945 году Я.З.Цыпкиным и П.В.Бромберггом был предложен способ определения параметров систем с заданным запасом устойчивости, который связан со сдвигом корней λ в пространстве коэффициентов характеристического полинома. Этот способ обладает тем недостатком , что определение по коэффициентам характеристического полинома расчетных значений параметров часто бывает затруднительно .

В.А.Лазаря предложил для построения устойчивых систем использовать сдвиг корней в пространстве параметров системы . На этой основе был разработан способ определения структуры и параметров устойчивых систем. При помощи этого способа в реферируемой работе для ряда исходных структурно-неустойчивых систем были построены структурно-устойчивые схемы и определены также значения параметров, при которых движение экипажей устойчиво в рабочем диапазоне скоростей .

Для исходной расчетной схемы четырехосного грузового вагона на тележках с жесткой рамой путем введения дополнительных упругих элементов был получен ряд вариантов рациональных конструктивных схем. Полученные расчетные схемы оказались структурно устойчивыми. Для этих схем наибольшая критическая скорость , соответст -

НТБ
ДНУЖТ

вудная верхней границе зоны ненадежной устойчивости ,составляет 44+47 м/сек ,а границе зоны надежной устойчивости - 25+28 м/сек.

Аналогичные исследования были выполнены для шестикосного и восьмикосного полувагонов и пассажирского вагона .

Рациональные значения параметров необходимо выбирать так, чтобы они выходились в области устойчивости и выполнялось условие $h_i = \text{Re } \lambda_i < 0$. Если при этом абсолютные величины $|h_i|$ вещественных частей собственных чисел будут весьма малы, то затухание колебаний в системе будет чрезвычайно медленным. Кроме того, такая система может оказаться негрубой в смысле Андронова. Поэтому необходимо определить такие значения рациональных параметров, при которых собственные числа λ_i в левой полуплоскости комплексных чисел $\text{Re } \lambda + i \text{Im } \lambda$ не будут расположены очень близко к мнимой оси.

Для оценки расположения собственных чисел на комплексной плоскости в реферлируемой работе использована величина $h_{\max} = \max \text{Re } \lambda_i$, которая при $h_{\max} < 0$ названа запасом устойчивости ξ . В связи с необходимостью иметь достаточный запас устойчивости определения рациональных значений параметров представлено как задача оптимизации. Для ее решения производится оптимизация математической модели рельсового экипажа, причем в качестве критерия оптимальности $Q(\vec{\lambda})$ рассматривается величина $h_{\max}$ наибольшей вещественной части собственных чисел :

$$Q(\vec{\lambda}) = h_{\max} = \max \text{Re } \lambda_i$$

где $\vec{\lambda}$ - n - мерный вектор варьируемых параметров.

Задача оптимизации сводится к минимизации функции качества и определению

$$Q(\vec{\lambda}^*) = \min(h_{\max}) = \min Q(\vec{\lambda}),$$

где $\vec{\lambda}^*$ - n - мерный вектор оптимальных значений параметров, которому соответствует наибольший запас устойчивости .

Так как величины параметров не могут выбираться произвольные, а их значения определяются конструктивными, технологическими и другими соображениями, то на компоненты вектора $\vec{\alpha}$ должны быть наложены ограничения:

$$\vec{\alpha}_1 \leq \vec{\alpha} \leq \vec{\alpha}_2,$$

которые выделяют в пространстве параметров D область G допустимых их значений. Здесь $\vec{\alpha}_1$ и $\vec{\alpha}_2$ - n -мерные векторы, определяющие соответственно верхние и нижние границы значений параметров.

Собственные числа матрицы A в общем случае не могут быть явно выражены через параметры системы. Величина целевой функции $Q(\vec{\alpha})$ может быть получена в численном виде при помощи какого-либо из методов решения полной проблемы собственных значений матрицы A . При этом оптимизация полученной функции цели связана с применением численных методов поиска экстремума функций многих переменных.

Реализация указанных алгоритмов требует выполнения большого объема вычислений. Поэтому решение поставленной задачи выполнялось при помощи быстродействующих ЭЦВМ. Программы оптимизации, составленные для ЭЦВМ "Минск-22", "Минск-32", "Урал", включали подпрограмму вычисления целевой функции, в которой при малых порядках матриц $m \leq 10$ использовался метод Данилевского для получения коэффициентов характеристического полинома и метод Уичкока для определения его корней, а при больших порядках матриц - QR-алгоритм. В подпрограмме поиска экстремума целевой функции был использован градиентный метод или метод случайного поиска локального экстремума (алгоритм поиска по наилучшей пробе со спуском).

Приведем результаты оптимизации параметров, полученные для моторного вагона-электропоезда ЭР-200. Была рассмотрена линейная

зованная система дифференциальных уравнений 32-го порядка, решение которой определяют устойчивость движения вагона. При помощи линейного преобразования координат эта система уравнений была разделена на две подсистемы. При этом матрица A коэффициентов уравнений приняла квазидиагональный вид :

$$A = \{A_1, A_2\}$$

где квадратные диагональные блоки A_1 и A_2 имели соответственно 14-ый и 18-ый порядки. При программировании использовались выражения элементов матриц, как функций параметров системы. Число варьируемых параметров n в разных случаях выбиралось в пределах $4 \leq n \leq 8$.

В одном из вариантов расчета варьировались параметры : жесткость κ_2 и коэффициент вязкого трения β_2 центрального рассосного подвешивания в горизонтальном поперечном направлении и жесткости κ_3 и κ_4 надбуксового подвешивания в горизонтальном поперечном и продольном направлениях. Начальные значения параметров были взяты по данным РВЗ: $\bar{\alpha}_0: [\kappa_2, \kappa_3, \kappa_4, \beta_2]' = [60; 560; 15300; 30]'$. При скорости 60 м/сек, при которой производилась оптимизация, начальное значение целевой функции равно $h_{max} = 1,4$. В результате оптимизации был получен вектор $\mathcal{L}^* = [81; 320; 2030; 3,67]'$, при котором $\lambda_{max} = -0,256$; критическая скорость увеличилась с 41 м/сек до 62,5 м/сек. Таким образом, определены такие значения параметров, при которых невозмущенное движение асимптотически устойчиво в заданном диапазоне скоростей.

Сравнение решений нелинейных уравнений, в которых принималась во внимание сила трения в опорных скользящих кузовов, показало, что при оптимальных значениях параметров движение вагона асимптотически устойчиво, а при исходных значениях - устойчивость достигается за счет ограничения поперечных перемещений колесных пар трес-

лям колес.

Также был рассмотрен случай, когда был выбран другой критерий оптимальности - величина критической скорости $V_{кр}$, т.е. той скорости, до которой невозмущенное движение экипажа асимптотически устойчиво. В процессе оптимизации отыскивалась величина:

$$Q_1(\mathcal{L}^*) = \max V_{кр}$$

В рассмотренном примере для моторного вагона электропоезда ЭР-200 варьировались жесткости κ_3 и κ_4 . Оптимизация производилась по методу Зайделя-Гаусса. Для определения величины $\max V_{кр}$ на каждом этапе оптимизации использовались зоны устойчивости движения в плоскостях $V_{кр}$, κ_3 и $V_{кр}$, κ_4 . Построение этих зон производилось обходом по контуру. В результате оптимизации получена критическая скорость порядка 60 м/сек при менее удачных с точки зрения реализации в конструкции значениях параметров, чем в предыдущем случае. Сравнение результатов показало, что оптимизация по запасу устойчивости более эффективна.

Аналогичные исследования, выполненные для линеаризованных уравнений возмущенного движения электровоза ВЛ-80, показали, что если исходным значениям параметров соответствует критическая скорость, несколько меньшая 30 м/сек, то при оптимальных параметрах критическая скорость близка к 60 м/сек. Наиболее существенные изменения параметров при этом связаны с увеличением коэффициента вязкого трения β_2 и уменьшением жесткости κ_2 центрального подвешивания в горизонтальном направлении.

Расчеты, выполненные для одного из вариантов рациональной схемы грузового вагона на тележках ЦНИИ-ХЗ-0 с дополнительными упругими элементами, показали, что в результате оптимизации получена критическая скорость порядка 40 м/сек, соответствующая верхней границе зоны надежной устойчивости.

Применение численных методов оптимизации связано с многократным вычислением целевой функции. Так, например, при определении составляющих градиента $\frac{\partial Q}{\partial x}$ по алгоритму с парными пробами за один рабочий шаг функция качества должна быть вычислена $2n$ раз (n - число оптимизируемых параметров), а при алгоритме с центральной пробой - $n+1$ раз). В реферируемой работе предложен способ, в котором для определения направления поиска в процессе оптимизации используются формулы теории возмущений, определяющие чувствительность собственных чисел λ_i к изменению параметров. При этом за один рабочий шаг процесса оптимизации приходится только один раз решать полную проблему собственных значений матрицы A , что существенно уменьшает потери на поиск.

Локальные способы поиска экстремума позволяют находить минимум функции качества, если известно, что она унимодальна. Так как это заранее не известно, то в работе применен способ поиска глобального экстремума, который представляет собой определенную последовательность локальных поисков со случайным выбором начальной точки в гиперпараллелепипеде допустимых значений параметров.

Так как устойчивость движения существенно зависит от скорости экипажа, которая изменяется в достаточно широком диапазоне, то оптимальные параметры, найденные при какой-либо определенной скорости, могут оказаться неудачными для другой скорости. Для того, чтобы избежать этой трудности в работе рассмотрен способ оптимизации одновременно при нескольких значениях скорости.

Влияние изменения параметров на устойчивость движения
рельсовых экипажей

Оценка влияния изменения параметров на характер движения экипажа является существенным этапом исследования, так как процессы, протекающие в системе должны быть устойчивы как по отношению к малым изменениям координат и скоростей, так и по отношению

к малым изменениям математической модели .

В реферируемой работе показано, что для исследования влияния изменения параметров на локальные свойства устойчивости удобно использовать функции чувствительности $u(\alpha) = \frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha_k}$ собственных чисел λ_i к вариациям параметров α_k , которые определяются по известным формулам теории чувствительности. Для исследования влияния больших изменений параметров на устойчивость движения в работе используется построение зон устойчивости движения и непосредственное вычисление собственных чисел для ряда значений варьируемого параметра .

Для рельсовых экипажей, на примере четырехосного полувагона на тележках ЦНИИ-УЗ-0, установлено влияние изменения скорости, величины коэффициента псевдоскольжения и параметров упруго-вязких элементов рессорного подвешивания на устойчивость движения.

Наибольшая критическая скорость, соответствующая зоне надежной устойчивости, при $\kappa_p = 10^3$ т.м.рад⁻¹ и номинальных значениях остальных параметров не превышает 30 м/сек. При уменьшении горизонтальной жесткости κ_2 центрального рессорного подвешивания ($\kappa_2 < 200$ в.м⁻¹) имеет место эффект резкого увеличения критической скорости при введении горизонтальных демпферов вязкого трения. Так, при $\kappa_2 = 100$ т.м⁻¹ критическая скорость возрастает с 20 м/сек до 45 м/сек, если введены соответствующие демпферы при $\psi_2 = 0,4$. Здесь ψ_2 отношение рассеиваемой энергии за период колебаний к энергии, накапливаемой в пружинах при наибольшем прогибе .

Анализ графиков нормированных модулей коэффициентов разделения амплитуд показал, что отношение амплитуд колебаний кузова к амплитудам поперечных колебаний колесных пар увеличивается с повышением скорости .

Для экипажей с двойным рессорным подвешиванием при скоростях, меньших критической, устойчивость движения экипажа определяется величиной $Re \lambda_{1,2}$, для которого и $Re \lambda_{1,2}$ и $Im \lambda_{1,2}$ от скорости не зависят; $Im \lambda_{1,2}$ близка к парциальной частоте колебаний поперечного откоса кузова. При скоростях, близких к критической и больших критической, устойчивость движения определяется величиной $Re \lambda_{3,4}$ - другого собственного числа, для которого величина $Im \lambda_{3,4}$ (при малых значениях жесткостей κ_3 и κ_4) близка к частоте вращения одиночной колесной пары. Этим объясняется изменение спектра частот при потере устойчивости движения. При скоростях, меньших критических, устойчивость движения существенно зависит от величин, определяющих поперечные колебания кузова - жесткости центрального подвешивания κ_2 и коэффициента вязкости β_2 .

Устойчивость движения экипажей с двойным рессорным подвешиванием существенно зависит от жесткостей κ_3 и κ_4 горизонтальных упругих элементов между колесными парами и рамами тележек. При малых значениях этих жесткостей система оказывается мало чувствительной к изменению коэффициента псевдоскольжения. При больших значениях κ_3 и κ_4 критическая скорость понижается с уменьшением коэффициента псевдоскольжения. При уменьшении одной из этих жесткостей значение другой, соответствующей $max V_{\kappa}$ - увеличивается.

Анализ приращений вещественных частей собственных чисел при изменении параметров упруго-вязких элементов подвешивания на 10 %, выполненный при помощи функций чувствительности для пассажирского вагона, показал, что даже при малом запасе устойчивости $\xi = 0,062$ характер движения системы не меняется, и ее можно считать грубой.

Была исследована устойчивость движения экипажей с двойным рессорным подвешиванием с измененной конструкцией. Для моторного вагона электропоезда ЭР-200 был рассмотрен случай, когда горизонтальные поперечные перемещения кузова относительно тележек отсутствуют ($K_2 = \infty$). При этом критическая скорость понижается. В эту конструкцию вводились дополнительные упругие элементы в горизонтальной плоскости между кузовом и тележками (при этом рассматривались повороты тележек относительно кузова) либо между колесными парами и кузовом в продольном и поперечном направлениях. Оказалось, что введение таких элементов повышает величину критической скорости.

Исследование влияния нелинейностей на устойчивость движения рельсовых экипажей

6839a В реферируемой работе, помимо исследования устойчивости движения по первому приближению Ляпунова, производилось решение нелинейных уравнений возмущенного движения. Сопоставление результатов решения нелинейных и линеаризованных уравнений использовалось для установления того, являются ли начальные возмущения, имеющие место в реальной системе, „достаточно малыми“ в смысле Четаева. Решение нелинейных уравнений необходимо и для того, чтобы установить влияние нелинеаризуемых нелинейностей на устойчивость движения, а также для того, чтобы исследовать поведение системы после потери устойчивости: определить амплитуды колебаний и величины усилий при установившемся режиме.

Исследование влияния нелинейности при поездокользянии на устойчивость движения было выполнено для зависимостей, полученных теоретическим путем и по данным экспериментов, для экипажей с одинарным и двойным рессорным подвешиванием. Наибольшие величины начальных возмущений были выбраны так, что они соответствовали

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
Імені академіка В. Лазаряна

конструктивным ограничениям. Хорошее совпадение решений систем нелинейных и линеаризованных уравнений показало, что в этом случае рассматриваемые возмущения „достаточно малы" в смысле Чадаева и можно пользоваться первым приближением Дяпунова.

Также было исследовано влияние на устойчивость движения нелинейности поверхности катания колеса. Для этого была предложена схема взаимодействия колеса и рельса, в которой принимается во внимание действие нелинейных сил псевдоскольжения, действие горизонтальных поперечных составляющих вертикального давления колеса на рельс и упругие отжатия рельсовых нитей, по которым определялись горизонтальные поперечные силы, действующие на рельсы. Расчеты были выполнены для четырехосного полувагона на тележках ПНИИ-УЗ-0 при близкой и криволинейной зависимости изменения радиуса круга катания колеса от поперечного перемещения колеса относительно рельса. Результаты расчетов показали, что нелинейность поверхности катания колеса существенно стабилизирует колебания экипажа. В рассмотренных случаях оказалось, что неустойчивость движения более опасна для прочности пути, нежели для схода экипажа с рельсов. Аналогичные расчеты были выполнены и для рельсовых экипажей с двойным рассорным повешиванием.

Также рассмотрен случай, для грузового полувагона на тележках ПНИИ-УЗ-0, в котором принималась во внимание качка кузова на плоской нате и удар, который происходит после того, как почерпывается зазор в скользунках. Результаты расчетов показали, что качка на нате дестабилизирует движение вагона. Было получено хорошее совпадение расчетных величин углов поворота кузова относительно надрессорных балок и горизонтальных поперечных сил, действующих на рельсовые нити, с данными опытов.

При исследовании влияния на устойчивость движения вагона

сил сухого трения в клиновых демпферах тележки ЦММ-ХЗ-0 установлено, что при малых амплитудах колебаний перемещения пар трения отсутствуют и энергия не рассеивается, а при больших амплитудах рассеивание энергии недостаточно, чтобы существенно повлиять на характер движения. На устойчивость движения существенно влияет то, что структура системы, в связи с действием сил сухого трения, оказывается переменной.

Исследование влияния сил сухого трения в системе опирания кузова на тележки на устойчивость движения экипажа с двойным рессорным подвешиванием было выполнено на примере моторного вагона электропоезда ЭР-200 (решение уравнений получено на АМ МН-17М Г.Ф.Осадчим). Были определены наибольшие величины перемещений и боковых сил, действующих на рельсы. Анализ зон устойчивости движения показал, что введение сил сухого трения дестабилизирует движение системы. В рассматриваемом случае оказалось, что граница устойчивости при исчезающе малом трении не совпадает с границей, полученной при отсутствии трения. Аналогичный результат был получен В.В.Болотным для системы, на которую вряду с неконсервативными силами, обеспечивающими приток энергии в систему, действует силы вязкого трения.

Расчеты, выполненные для моторного вагона при малых величинах жесткостей горизонтальных элементов надбуксового подвешивания ($\kappa_3 = \kappa_4 = 350 \text{ т.м}^{-1}$) показали, что область асимптотической устойчивости в этом случае существенно увеличивается по сравнению с полученной при исходных значениях параметров. Аналогичные расчеты, выполненные для скоростного вагона-лаборатории с реактивной тягой, показывают, что при малых значениях жесткостей κ_3 и κ_4 ($\kappa_3 = \kappa_4 = 180 \text{ т.м}^{-1}$) введение сил сухого трения существенно увеличивает критическую скорость.

Сопоставление результатов расчета и данных
натурных испытаний

Для оценки результатов исследования устойчивости невозмущенного движения рельсовых экипажей было выполнено сопоставление величин критических скоростей, найденных по данным экспериментов и расчетным путем.

Результаты многочисленных испытаний четырехосного полувагона на тележках ЦНИИ-УЗ-0 показывают, что интенсивное увеличение горизонтальных поперечных сил, действующих на рамы тележек со стороны колесных пар (рамных сил), начинается после того, как скорость вагона превысит 50-60 км/ч, т.е. критическая скорость находится в этом диапазоне. Однако, сравнивать эти данные с результатами расчетов по рассмотренной выше расчетной схеме неправомерно, так как данные опытов показывают, что при указанных скоростях вертикальные прогибы рессор отсутствуют в связи с действием сил сухого трения в клиновых демпферах. Поэтому в данном случае было принято во внимание изменение структуры системы, вызванное действием сил сухого трения, и рассмотрена расчетная схема, в которой отсутствуют вертикальные и горизонтальные поперечные прогибы рессорных комплектов. Такая механическая система имеет семь степеней свободы. Расчеты, выполненные для грузового вагона при значениях жесткости K_{ϕ} в диапазоне 50-100 т.мрад⁻¹ и коэффициента псевдоскольжения $F = 900 + 1800$ т, показали, что расчетная величина критической скорости находится в диапазоне 50-60 км/ч, что хорошо соответствует данным опытов.

Также было выполнено исследование устойчивости невозмущенного движения электровоза ЭС-40. Сравнение расчетной величины критической скорости ($V_c^p \approx 150$ км/ч) и найденной по результатам опытов ($V_c^o \approx 140$ км/ч) показало хорошее их совпадение.

НТБ
ДНУЖТ

Особый интерес представляют результаты аналитических и опытных исследований устойчивости движения скоростного вагона-лаборатории с реактивной тягой, выполненных ВНИИ вагоностроения и Днепропетровским отделением института механики АН УССР при участии автора.

Исследование устойчивости движения вагона при исходных значениях параметров (для исследования устойчивости движения решалась система нелинейных дифференциальных уравнений 40-го порядка) показало, что расчетная критическая скорость близка к $100 \text{ м/сек} = 360 \text{ км/ч}$. Наибольшая скорость во время опытов составила $250 \text{ км/ч} = 70 \text{ м/сек}$.

Данные опытов по измерению рамных сил, углов влияния тележек и спектральному составу частот колебаний показали, что невозмущенное движение вагона в рассмотренном диапазоне скоростей устойчиво в малом. Эти данные соответствуют результатам расчетов и показывают возможность создания конструкции рельсовых экипажей, движение которых асимптотически устойчиво при низких скоростях.

Так как достигнуть расчетной критической скорости (100 м/сек) в опытах не представлялось возможным, то конструкция вагона была изменена так, чтобы понизить критическую скорость. Для этого опирание кузова на скользяны было заменено опиранием на подпятник, сняты демпферы сухого трения в надбуксовом подвешивании и колеса были обточены так, что поверхность катания имела коничность, равную $1/10$.

Расчетная величина критической скорости, полученная М.В. Деминым и Г.Ф. Осадчим при решении уравнений возмущенного движения на АВМ МН-17М, оказалась в диапазоне $158-172 \text{ км/ч}$, верхняя и нижняя границы которого соответствуют значениям коэффициента псевдоскольжения $F = 816 \text{ т}$ и $F = 1470 \text{ т}$. Обработка

результатов опытов, выполненных с вагоном измененной конструкции, показала, что величина критической скорости находится в диапазоне 160-165 км/ч. Отсюда следует, что диапазоны, в которых находится критическая скорость, полученные расчетным и опытным путем, совпадают с большой степенью точности.

Совпадение расчетных и опытных данных показывает, что рассмотренный выше метод исследования устойчивости движения рельсовых экипажей, основанный на теории Ляпунова, правильно отражает сущность поставленной задачи. Следовательно, в рассматриваемом случае задача о "практической" устойчивости сводится к задаче об устойчивости по Ляпунову. Совпадение результатов свидетельствует о правомочности вводимых идеализаций, о точности принятой математической модели и используемых математических методов решения задачи.

В ы в о д ы

1. Для оценки допустимости идеализаций, вводимых при выборе расчетных схем рельсовых экипажей, выполнено сопоставление результатов расчета с данными экспериментов, а также сравнение результатов расчетов, полученных при разных расчетных схемах. При этом рассмотрен ряд расчетных схем, число степеней свободы которых колеблется от 4-х до 36-ти. Установлено, что схема, в которой бузова, рамы тележек и колесные пары принимаются твердыми телами, а эти тела связаны упруго-диссипативными или жесткими элементами, является достаточно точной. Показано, что такие упрощения, при которых рассматривается какая-либо часть системы, недопустимы.

2. Так как величина коэффициента псевдоскольжения, в зависимости от ряда условий, может изменяться в достаточно широких

пределах, то по терминологии, введенной Б.В.Булгаковым, пространство рассматриваемых параметров делится на области надежной и ненадежной устойчивости и заведомой неустойчивости. Выбор рациональных значений параметров производится так, чтобы они соответствовали области надежной устойчивости.

3. Для построения структурно-устойчивых конструктивных схем рельсовых экипажей рассмотрен способ, основанный на приеме сдвига собственных чисел λ матрицы коэффициентов уравнений возмущенного движения на плоскости комплексных чисел $Re \lambda + i Im \lambda$. При помощи этого способа для ряда рельсовых экипажей построены структурно-устойчивые схемы и определены такие значения параметров, при которых движение асимптотически устойчиво в заданном диапазоне скоростей.

4. Для определения рациональных значений параметров рессорного подвешивания железнодорожных экипажей использованы методы численной оптимизации. В качестве целевой функции принята величина h_{max} наибольшей вещественной части собственных чисел матрицы коэффициентов уравнений возмущенного движения экипажа, абсолютная величина которой при $h_{max} < 0$ названа запасом устойчивости. При составлении программ решения задачи на ЭЦМ использованы градиентные методы и методы случайного поиска экстремума функций нескольких переменных.

5. В работе предложен способ оптимизации, в котором используются формулы теории возмущений, определяющие чувствительность собственных чисел к изменению параметров. Применение этого способа позволяет существенно уменьшить затраты машинного времени при оптимизации.

6. Так как нельзя заранее утверждать, что целевая функция является унимодальной, то рассмотрено статистическое расширение

метода поиска локального экстремума, которое позволяет обследовать глобальные свойства целевой функции. Для этого локальный поиск комбинируется с методом Монте-Карло, по которому осуществлен случайный выбор начальной точки поиска .

7. В результате анализа зон устойчивости движения, построенных для ряда экипажей, установлено, что при малых значениях жесткостей упругих элементов, связывающих колесные пары и рамы тележек в горизонтальной плоскости, система мало чувствительна к изменению коэффициента pseudоскольжения. Этот диапазон жесткостей желательно выбирать в качестве области допустимых значений параметров при оптимизации .

8. Сопоставление решений нелинейных уравнений возмущенного движения, в которых принималась во внимание нелинейность сил pseudоскольжения, и линеаризованных уравнений показало, что начальные возмущения, соответствующие ограничениям, имеющим место в реальной конструкции, "достаточно малы" в смысле Четаева и исследование устойчивости движения в этом случае можно производить по первому приближению Лапунова .

9. Результаты решения уравнений возмущенного движения, в которых принималась во внимание нелинейность поверхности катания колеса, показали, что в рассмотренных случаях (облинейная и криволинейная зависимость) эта нелинейность стабилизирует движение экипажа. Определение горизонтальных поперечных сил, действующих на рельсы, показало, что в рассмотренных случаях неустойчивость движения экипажа более опасна для прочности пути, чем в отношении схода с рельсов.

10. При движении четырехосного вагона на тележках ЦНИИ-ХЗ-0 в достаточно широком диапазоне скоростей отсутствуют колебания кузова на ресорах в связи с действием сил сухого трения в

гидравлических демпферах. Выполненные в работе расчеты показали, что такое изменение структуры существенно влияет на величину критической скорости и запаса устойчивости.

11. Для экипажей с двойным рессорным подвешиванием и опорением кузова на скользуны установлено, что силы сухого трения никающие при поворотах тележек относительно кузова, стабилизируют движение при малых жесткостях элементов (порядка $200 + 300 \text{ т.м}^{-1}$), связывающих колесные пары и рамы тележек в горизонтальной плоскости. В том случае, когда жесткости этих элементов велики, силы сухого трения дестабилизируют движение. Зона асимптотической устойчивости сокращается и появляется область, в которой движение устойчиво не асимптотически. При этом нарушается одно из необходимых условий устойчивости при постоянно действующих возмущениях. Указанные особенности, проявляющиеся при введении сил сухого трения, связаны с тем, что они действуют в присутствии неконсервативных сил, обуславливающих приток энергии в систему.

12. Для железнодорожных экипажей с одинарным рессорным подвешиванием (четыrehосный вагон на тележках ПНИИ-ХЗ-0) при введении упругих элементов, создающих восстанавливающие силы при поворотах рам тележек относительно колесных пар в горизонтальной плоскости, наибольшая критическая скорость, соответствующая верхней границе области надежной устойчивости, составляет $27-28 \text{ м/сек}$ при жесткости упругих элементов порядка $10^8 \text{ т.м рад}^{-1}$. Величину критической скорости можно повысить до $40-45 \text{ м/сек}$ уменьшением горизонтальной жесткости центрального подвешивания до $50-100 \text{ тм}^{-1}$ и введением горизонтальных демпферов вязкого трения с достаточным коэффициентом вязкости, при котором отношение рассеиваемой энергии за период колебаний к энергии, накапливаемой в пружинах

при наибольшем сжатии составляет 0,4 .

13. Для экипажей с двойным рессорным подвешиванием в том случае, если в системе опирания кузова на тележки (в горизонтальной плоскости) имеются пары сухого трения, величины жесткостей горизонтальных элементов между колесными парами и рамами тележек (K_z и K_{α}) желательно выбирать малыми (например, в пределах $200+300 \text{ т.м}^{-1}$). В этом случае система мало чувствительна к изменению величины коэффициента псевдоскольжения и силы сухого трения расширяют зону асимптотической устойчивости, как это имеет место, например, для скоростного вагона-лаборатории с реактивной тягой.

14. Сопоставление величин критических скоростей, найденных по данным опытов для ряда экипажей (четырёхосный полувагон на тележках ЦНИИ-ХБ-0, электровоз ЭС-40), и расчетных их значений показывает близкое их совпадение.

Результаты исследования устойчивости движения скоростного вагона-лаборатории с реактивной тягой показали весьма хорошее совпадение расчетных и найденных из опытов значений критических скоростей и частот колебаний.

Такое совпадение результатов расчета и натурных испытаний свидетельствует о том, что рассмотренный выше метод исследования устойчивости движения рельсовых экипажей, основанный на теории Ляпунова, правильно отражает сущность поставленной задачи, что принятая математическая модель и использованные математические методы дают достаточную точность. Следовательно, в рассматриваемом случае задача о "практической" устойчивости сводится к задаче об устойчивости по Ляпунову.

Таким образом, рассмотренные в работе методы расчета дают

возможность достаточно полно исследовать устойчивость невозмущенного движения рельсовых экипажей и определять такие значения их параметров, при которых невозмущенное движение экипажей асимптотически устойчиво в заданном диапазоне скоростей .

Основные положения диссертации были доложены :

На Всесоюзных конференциях по проблеме колебаний механических систем (г.Киев, 1968, 1971 г.г.) ;

на Всесоюзной конференции по проблеме конструктивного демпфирования колебаний (г.Рига, 1971 г.) ;

на III Всесоюзной конференции по аналоговой вычислительной технике (г.Москва, 1969 г.) ;

на III Всесоюзной научно-технической конференции по применению ЭВМ при проектировании, испытании и эксплуатации электропоездов (г.Рига, 1969 г.) ;

на семинаре "Новые задачи устойчивости движения" Научного Совета по общей механике АН УССР (г.Киев, 1970 г.) ;

на научно-технических совещаниях по скоростному транспорту (г.Днепропетровск, 1970, 1972 г.г.);

на научно-техническом совещании конструкторского бюро Уралвагонзавода (г.Нижний Тагил, 1966 г.) ;

на научно-технической конференции по вагоностроению (г.Ленинград, 1967 г.) ;

на научно-технических конференциях Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (1967-1974 г.г.);

на XXXIII научно-технической конференции Брянского института транспортного машиностроения (1972 г.) ;

на Симпозиуме по проблемам моделирования динамики подвижного состава (г. Брянск, 1973 г.);

НБ
ДНУЖТ

на сетевой научно-технической конференции „Динамика и меры повышения эксплуатационной надежности локомотивов в условиях железных дорог Урала и Сибири ” (г.Омск, 1972 г.)

на совещании по проблемам динамики сооружений и машин (г.Днепропетровск, 1964 г.)

на научно-техническом совещании по современным методам расчетов в машиностроении с применением ЭВМ (г.Харьков, 1966 г.);

на семинарах по механике Днепропетровского отделения Института Механики АН УССР и Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (1964-1973 г.г.)

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора

1. Устойчивость движения рельсовых экипажей. „Наукова думка”, Киев, 1972 (соавторы В.А.Лазарян, Л.А.Длугач)
2. Влияние качки на пяте на устойчивость невозмущенного движения четырехосного полувагона. Труды ДИИТа, в. I43, Симферополь. Днепропетровск. 1973
3. К определению сил взаимодействия колес и рельсов. Труды ДИИТа, в. I28, Днепропетровск, 1972 .
4. Некоторые результаты опытов по исследованию колебаний электровоза ВЛ-23. Труды ДИИТа, в. 50, Днепропетровск, 1964
5. Оптимизация параметров рессорного подвешивания грузового вагона с дополнительными упругими элементами. Труды СНТО ДИИТа, в. 3, Днепропетровск. 1973 (соавтор О.М.Ратникова).
6. Влияние гироскопических и диссипативных сил на устойчивость движения вагонов. Труды ДИИТа, в. I43. Симферополь, Днепропетровск, 1973 (соавторы :Л.А.Длугач, В.А.Волкова, Е.А.Шенкарева)

НТБ
ДНУЖТ

7. Исследование устойчивости движения грузовых вагонов при различных конструктивных схемах тележек. Труды ДИИТа, в. 143. Спирополь-Днепропетровск, 1973 (соавторы В. А. Лазарян, Н. А. Радченко).
8. Об устойчивости движения скоростного вагона-лаборатории с реактивной тягой. Вестник ЦНИИ, 1973, № 3 (соавторы : В. А. Лазарян, Ю. В. Демин, Г. Ф. Осадчий) .
9. Сравнительная оценка электровозов различных конструкций с точки зрения устойчивости невозмущенного их движения. Сборник "Некоторые задачи механики скоростного рельсового транспорта". Изд-во "Наукова думка", Киев, 1973. (соавторы Н. А. Радченко).
10. Исследование устойчивости движения высокоскоростных рельсовых экипажей. Сборник "Повышение эксплуатационной надежности локомотивов в условиях дорог Урала и Сибири". Омск, 1973 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Длугач, Ю. В. Демин, Н. А. Радченко, Г. Ф. Осадчий).
11. Определение собственных значений матриц высоких порядков при помощи QR -алгоритма. Сборник "Некоторые задачи механики скоростного рельсового транспорта". Изд-во "Наукова думка", Киев, 1973 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Длугач, И. А. Зильберман).
12. Влияние характера связи кузова с тележками на устойчивость движения высокоскоростного железнодорожного экипажа. Сборник "Некоторые задачи механики скоростного рельсового транспорта". Изд-во "Наукова думка", Киев, 1973 (соавторы В. А. Лазарян , Ю. В. Демин, Г. Ф. Осадчий).
13. Дифференциальные уравнения пространственных колебаний четырехосного грузового вагона при движении по инерциальному пути, рассматриваемому как дискретная система. Труды ДИИТа, в. 138. Днепропетровск, 1972 (соавторы В. А. Лазарян, Р. С. Липовский, В. И. Давнович).

НТБ
ДНУЖТ

14. Построение зон устойчивости движения для шестиосного и восьмиосного грузовых вагонов. Труды ДИИТа, в. 128, Днепропетровск, 1972 (соавтор Н.А.Радченко).
15. Исследование устойчивости движения железнодорожных экипажей с маятниковым подвешиванием. Труды ДИИТа, в. 128, Днепропетровск, 1972 (соавторы В.А.Лазарян, Н.А.Радченко).
16. Устойчивость движения скоростного железнодорожного экипажа с дополнительными упругими элементами в системе подвешивания. Материалы XXXIII НТК, БИТМ, 1972 (соавторы Ю.В.Демин, Г.Ф.Осадчий).
17. Влияние параметров рессорного подвешивания и сил сухого трения на устойчивость движения скоростного вагона. Труды ДИИТа, в. 128, Днепропетровск, 1972 (соавторы: В.А.Лазарян, Ю.В.Демин, Г.Ф.Осадчий).
18. Об устойчивости движения двухосного вагона. Труды ДИИТа, в. 128, Днепропетровск, 1972 (соавтор Е.Ю.Трубицкая).
19. О колебаниях железнодорожных экипажей при высоких скоростях движения. Тезисы докладов конференции по колебаниям механических систем. Изд-во "Наукова думка", Киев, 1971 (соавтор Н.А.Радченко).
20. К оптимизации параметров систем со многими степенями свободы с точки зрения устойчивости их движения. Тезисы докладов конференции по колебаниям механических систем. Изд-во "Наукова думка". Киев, 1971 (соавтор Л.А.Длугач).
21. О возможности применения первого метода А.М.Ляпунова при нелинейных силах псевдоскольжения. Труды ДИИТа, в. 103, Изд-во "Транспорт", М., 1971 (соавторы В.А.Лазарян, Л.А.Длугач).
22. Влияние упругости пути и тележек на устойчивость невозмущенного движения вагонов. Труды ДИИТа, в. 103, Изд-во "Транспорт".

М., 1971 (Соваторы : В.А.Лазарян, Н.А.Радченко).

23. Применение численных методов оптимизации в исследовании устойчивости невозмущенного движения .Труды ДИИТа, в. II4. Днепропетровск, 1970 (соавтор В.А.Лазарян) .
24. К выбору расчетной схемы при исследовании устойчивости невозмущенного движения пассажирского вагона. Труды ДИИТа, в. II4. Днепропетровск, 1970 (соавторы : В.А.Лазарян, Н.А.Радченко).
25. К вопросу о возможности применения первого приближения А.М.Дяпунова при нелинейных силах псевдоскольжения. Труды ДИИТа, в. II4. Днепропетровск, 1970 (соавторы : В.А.Лазарян, Л.А.Длугач).
26. Исследование устойчивости невозмущенного движения полувагона на тележках конструкции Днепродзержинского вагоностроительного завода. Труды ДИИТа, в. II4. Днепропетровск, 1970 (соавторы Н.А.Радченко, В.П.Трубицкая).
27. Исследование устойчивости невозмущенного движения специальных вагонов. Труды ДИИТа, в. II4. Днепропетровск, 1970 (соавторы Н.А.Радченко, А.И.Стукалов).
28. Исследование устойчивости невозмущенного движения скоростного вагона-лаборатории с реактивной тягой. Сборник "Некоторые задачи механики скоростного транспорта". Изд-во "Наукова думка", Киев, 1970 (соавтор Д.В.Демин) .
29. Влияние нелинейности поверхности катания колеса на устойчивость движения железнодорожного экипажа. Сборник "Некоторые задачи механики скоростного транспорта". Изд-во "Наукова думка", Киев. 1970 (соавторы: В.А.Лазарян, Л.А.Длугач) .
30. Исследование устойчивости движения при высоких скоростях экипажа с упругими связями между рамами тележек и колесными парами. Сборник "Некоторые задачи механики скоростного транспорта". Изд-во "Наукова думка", Киев, 1970 (Соваторы: В.А.Лазарян,

Ю. В. Демин, Н. А. Радченко)

31. Сравнение конструктивных схем грузовых вагонов с точки зрения устойчивости их невозмущенного движения. Материалы юбилейной научно-технической конференции ДИИТа. Днепропетровск, 1970. Реферировано в РЖ „Железнодорожный транспорт“, 1970, 10, Б. 21 (соавторы В. А. Лазарян, Е. А. Радченко).
32. Определение параметров шестиосного полувагона, при которых его движение устойчиво. Материалы юбилейной научно-технической конференции ДИИТа. Днепропетровск, 1970. Реферировано в РЖ „Железнодорожный транспорт“, 1970, 10, Б. 20 (соавтор Н. А. Радченко).
33. К уточнению расчетной схемы при исследовании устойчивости движения четырехосного полувагона. Материалы юбилейной научно-технической конференции ДИИТа. Днепропетровск, 1970. Реферировано в РЖ „Железнодорожный транспорт“, 1970, 10, Б. 17 (соавторы В. А. Лазарян, Л. А. Длугач, Ю. В. Демин).
34. Устойчивость невозмущенного движения железнодорожных экипажей при сухом и вязком трении. Проблемы прочности, 1970, 9 (соавторы В. А. Лазарян, Л. А. Длугач, Н. А. Радченко).
35. Аналитические исследования устойчивости движения снегоуборочного поезда конструкции ПКБ ЦП. Труды ДИИТа, в. 84. Издательство „Транспорт“, М., 1970 (соавторы Ю. В. Демин, Н. А. Радченко, А. И. Стукалов).
36. Устойчивость движения пассажирского вагона при упругой связи колесных пар с рамой тележки. Труды ДИИТа, в. 84. Изд-во „Транспорт“, М., 1970 (соавторы В. А. Лазарян, Ю. В. Демин, Е. А. Радченко).
37. Об устойчивости движения механических систем со связями переменной жесткости. Труды ДИИТа, в. 84, Изд-во „Транспорт“, М.,

1970 (соавторы : В.А.Лазарян, Р.Б.Грановский).

38. О влиянии демпфирования на колебания и устойчивость движения железнодорожного экипажа. Материалы совещания по конструктивному демпфированию колебаний. Рига. 1970 (соавторы В.А.Лазарян, Л.А.Длугач, Н.А.Радченко).

39. Исследование устойчивости движения высокоскоростного экипажа с дополнительными упругими элементами в системе подвешивания. Материалы юбилейной научно-технической конференции ДИИТа. Диспропетровск, 1970. Реферировано в РИ „Железнодорожный транспорт“. 1970, 10.Б.19 (соавторы В.А.Лазарян, В.Д.Трубицкая).

40. Исследование устойчивости движения подвижного состава при нелинейных силах псевдоскольжения. Материалы III Всесоюзной конференции. „Применение ЭВМ при проектировании испытаний и эксплуатации электропоездов“. Изд-во „Зинатив“, Рига, 1969 (соавторы В.А.Лазарян, Л.А.Длугач).

41. Применение электронных моделей к исследованию устойчивости движения механических систем со многими степенями свободы. Тезисы докладов III-ей Всесоюзной конференции по аналоговой и числительной технике. Москва, 1969 (соавторы: В.А.Лазарян, Р.Б.Грановский, И.А.Зилберман).

42. Определение оптимальных параметров механических систем с точки зрения устойчивости их движения. Тезисы докладов по проблеме колебаний механических систем. Изд-во „Наукова думка“, Киев, 1968 (соавтор В.А. Лазарян).

43. Исследование устойчивости движения вагона на тележках с надбуксовым подвешиванием. Труды ДИИТа, в.76. Изд-во „Транспорт“, М., 1968 (соавтор В.А.Лазарян)

44. Влияние упрощенной расчетной схемы на результаты исследования устойчивости движения четырехосного полувагона. Труды ДИИТа,

- в.68.Изд-во "Транспорт", М.,1967 (соавторы В.А.Лазарян, В.Д.Данович).
- 45.Определение параметров четырехосного полувагона ,при которых его движение устойчиво.Труды ДИИТа,в.62.Изд-во "Транспорт", М.,1966 (соавторы В.А.Лазарян,А.А.Львов).
- 46.Устойчивость движения железнодорожных экипажей с двойным рессорным подвешиванием.Труды ДИИТа, в.59.Изд-во "Транспорт", М.,1966 (соавторы В.А.Лазарян, В.Д.Данович).
- 47.Исследование влияния сил сопротивления,пропорциональных первой степени скорости,на устойчивость движения системы со многими степенями свободы.Труды ДИИТа,в.55.Изд-во "Транспорт", М.,1965 (соавторы :В.А.Лазарян, В.Д.Данович).
- 48.Исследование устойчивости движения путеукладочного крана УК-25 .Труды ДИИТа ,в.50. Днепропетровск, 1964 (соавтор В.А.Лазарян)
- 49.Исследование устойчивости движения некоторых типов грузовых четырехосных вагонов.Труды ДИИТа, в.44 .Трансжелдориздат,М., 1963 (соавторы В.А.Лазарян, А.А.Львов,Д.А.Манашкин).
- 50.Аналитическое исследование собственных колебаний современных локомотивов.Труды ДИИТа ,в.35, Днепропетровск,1961 (соавтор В.А.Лазарян).

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ
ДНУЖТ