

УДК 629.1

А.И. ТАРАТОРКИНинженер-конструктор¹

E-mail: al_tar@mail.ru

С.В. АБДУЛОВ, канд. техн. наук, доц.исполнительный директор – главный конструктор¹

E-mail: sincora2004@mail.ru

И.А. ТАРАТОРКИН, д-р техн. наук, проф.заведующий отделом механики транспортных машин – главный научный сотрудник²

E-mail: ig_tar@mail.ru

А.И. ТАРАТОРКИН, д-р техн. наукстарший научный сотрудник²

E-mail: alexandr_tar@mail.ru

¹АО «СКБМ», г. Курган, Российская Федерация²Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Поступила в редакцию 22.09.2025.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Статья посвящена преодолению ограничений контактных методов измерения динамики гусеничных машин. В качестве решения предлагается метод, основанный на бесконтактном измерении перемещений траков с помощью высокоскоростной видеосъемки и алгоритмов компьютерного зрения. Детально рассматривается реализация оптического потока Лукаса–Канаде — эффективного алгоритма для трекинга характерных точек на поверхности траков. Показано, что данный подход позволяет с высокой точностью и без влияния на объект измерять перемещения, скорости и деформации по всей длине гусеничного обвода, удовлетворяя строгим требованиям экспериментальных исследований. Метод позволяет с высокой точностью идентифицировать частоты, амплитуды, коэффициенты демпфирования и формы колебаний различных ветвей гусеничного обвода и получить полную картину кинематики ветвей гусеничного обвода без влияния на объект исследования.

Ключевые слова: гусеничный движитель, динамика, колебания, амплитуда, частота, компьютерное зрение, метод оптического потока Лукаса–Канаде

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-1-74-41-48>

Введение. Рост удельной мощности, массы и скорости движения современных быстроходных гусеничных машин (БГМ) способствуют существенному повышению нагруженности элементов конструкции ходовой части и гусеничного движителя (ГД). Одной из наиболее нагруженных и в наибольшей степени ограничивающей ресурс движителя и машины в целом является гусеница [1], динамика движения которой по своей природе является циклической и периодической. Основными источниками периодических возмущений являются:

- дискретная структура гусеницы, вследствие чего при последовательном зацеплении траков с ведущим колесом генерируются низкочастотные возмущения, основная частота которых равна частоте зацепления ($f_3 = n / 60$, где n — частота вращения ведущего колеса, об/мин);

- цикличность прохождения опорных катков по тракам, что создает высокочастотную составляющую вибрационного спектра;

- резонансные явления, возбуждаемые под воздействием периодических сил различной природы и приводящие к возникновению резонансных колебаний как самих ветвей гусеницы, так и элементов конструкции машины.

При этом существующие в настоящее время методики расчета и проектирования гусениц базируются на учете статических составляющих, которые с учетом корректирующих коэффициентов (коэффициентов запаса) определяют конструктивные и прочностные показатели как собственно гусеницы, так и других элементов движителя. Следовательно, для обеспечения требуемого уровня надежности БГМ необходимо дальнейшее всестороннее изучение напряженного состояния

элементов гусениц на различных режимах работы и в различных условиях эксплуатации.

Таким образом, для исследования явлений, протекающих в ветвях гусеничного обвода БГМ, и установления источников, а также механизмов возникновения интенсивного динамического и вибрационного возбуждения в элементах конструкции ГД необходимо пользоваться современными достоверными методами определения параметров, характеризующих нагруженность ГД и удовлетворяющих следующим требованиям:

- комплекс регистрируемых параметров должен быть достаточен для изучения явлений и процессов, являющихся предметом исследования в ГД при минимальном количестве регистрируемых величин;
- измеряемые параметры должны обеспечить изучение кинематики траков гусеницы на всех участках гусеничного обвода;
- измеряемые параметры должны дать надежную количественную и качественную оценку динамических и вибрационных процессов в ветвях гусеницы, подрессоренных и неподрессоренных элементах конструкции машины во временной и частотной областях;
- на этапе постобработки метод должен позволять с высокой точностью идентифицировать частоты, амплитуды и фазовые сдвиги периодических процессов, распространяющихся по ветвям гусеничного обвода.

Методы экспериментального исследования колебаний гусениц представляют собой комплекс различных подходов, каждый из которых имеет свои особенности применения и ограничения. Тензометрия, широко используемая в работах для измерения деформаций уширителей гусениц и углов поворота траков, основана на применении тензорезисторов, которые изменяют свое электрическое сопротивление при механической деформации. Несмотря на высокую точность измерения напряжений и перемещений, этот метод обладает серьезными недостатками (низкой долговечностью при динамических нагрузках вследствие отслаивания датчиков, чувствительностью к температурным колебаниям, явлением гистерезиса), а также предоставляет данные только в дискретных точках установки измерительных элементов [2–6].

Акселерометрия, примененная в исследовании [7] для регистрации вибраций при ходе гусеницы с ведущего колеса, использует инерционные свойства массы для измерения ускорений. Трехосевые беспроводные акселерометры позволяют получать данные о колебаниях в трех плоскостях с частотой дискретизации до 2000 Гц. Однако существенными ограничениями метода являются влияние массы датчиков на динамические характеристики исследуемого объекта, необходимость автономного питания, ограниченность точек измерений и чувствительность к ударным нагрузкам.

Потенциометрия, описанная в работе [8], основана на измерении изменения электрического сопротивления при механическом перемещении контакта по резистивному элементу. Хотя метод относительно прост в реализации, он характеризуется механическим износом движущихся частей, невысокой точностью измерений (1–5 %) и значительной чувствительностью к воздействию влаги, пыли и других внешних факторов.

Лазерная доплеровская виброметрия (LDV) представляет собой бесконтактный метод, основанный на измерении доплеровского сдвига частоты лазерного излучения, отраженного от вибрирующей поверхности. Несмотря на прецизионную точность измерений (до 0,01 мкм) и возможность дистанционных измерений на расстоянии до 100 м, метод требует специальной подготовки отражающей поверхности, обладает высокой стоимостью оборудования и чувствителен к атмосферным условиям.

Лазерные дальнометры, использованные в исследовании [9], применяют принцип измерения времени прохождения лазерного импульса до объекта и обратно. Хотя метод позволяет оценивать амплитуды колебаний на расстоянии, он обладает ограниченной точностью при высокочастотных колебаниях и существенно зависит от условий окружающей среды.

Цифровая корреляция изображений (DIC), проанализированная в работе [10], использует сложные алгоритмы компьютерного зрения для отслеживания перемещений объектов по последовательности изображений. Метод требует применения высокоскоростных камер и специализированного программного обеспечения, что обуславливает его высокую стоимость и сложность реализации. В основе работы подобных систем, как правило, применяются нейронные сети, такие как YOLO (You Only Look Once) [11, 12] и другие. Они позволяют распознавать множество различных объектов с высокой точностью. Однако одним из основных недостатков вышеперечисленных решений можно назвать их высокие требования к вычислительной мощности и объемам затрачиваемой памяти компьютера, а также медленную работу. Для решения этой проблемы существуют специальные фреймворки MoveNet [13, 14], MediaPipe [15], OpenPose [16] также использующие нейронные сети, оптимизированные для работы в режиме реального времени. В частности, в статье [17] с применением метода захвата движения и технологий машинного обучения (MoveNet, MediaPipe, OpenPose) предложен метод определения координат человеческого тела в трехмерном пространстве на основе компьютерного зрения и алгоритмов триангуляции [18, 19].

Проведенный выше анализ позволяет сделать заключение о том, что существующие методы, такие как тензометрия, акселерометрия, потенциоме-

трия и лазерные методы (виброметрия и дальнометрия), обладают рядом системных недостатков:

- тензометрия, обеспечивая высокую теоретическую точность, страдает от низкой долговечности, чувствительности к температуре и предоставляет данные лишь в дискретных точках;
- акселерометрия позволяет регистрировать вибрации с высокой частотой, но масса датчиков влияет на динамику объекта, а их установка ограничивает количество точек измерения;
- лазерные методы (LDV и дальнометры) являются бесконтактными и точными, но требуют специальной подготовки поверхности, дорогостоящего оборудования и чувствительны к условиям окружающей среды;
- цифровая корреляция изображений (DIC) лишена проблемы локальности измерений, но ее применение сопряжено с высокой стоимостью высокоскоростных камер и вычислительных систем, а также сложностью реализации.

Общими системными недостатками всех рассмотренных методов являются локальность измерений (за исключением DIC), влияние измерительной аппаратуры на объект исследования, ограничения по скоростным режимам и условиям эксплуатации, высокая сложность обработки данных и энергозависимость измерительных систем. Перспективными направлениями развития методов экспериментальных исследований представляются разработка гибридных подходов, комбинирующих преимущества различных методов, миниатюризация датчиков, развитие беспроводных технологий передачи данных и создание адаптивных алгоритмов обработки информации, устойчивых к внешним возмущениям.

Исходя из вышеизложенного, целью данной работы является разработка и апробация нового комплексного метода, основанного на применении технологии компьютерного зрения. В качестве эффективного алгоритма для трекинга характерных точек на поверхности траков гусеницы предлагается использовать метод оптического потока Лукаса–Канаде, позволяющий с высокой точностью и без влияния на объект измерять перемещения, скорости и деформации по всей длине гусеничного обвода, удовлетворяя строгим требованиям экспериментальных исследований.

Теоретические основы и практическая реализация метода Лукаса–Канаде. Алгоритм Лукаса–Канаде является одним из наиболее популярных методов вычисления оптического потока — картины видимого перемещения объектов, их частей или поверхности между двумя последовательными кадрами на основе локальной регуляризации поля, предполагая постоянство оптического потока в небольшой области Ω . Это выражается минимизацией взвешенной суммы квадратов невязок с использованием весовой функции [20].

Базовые положения разрабатываемого алгоритма. 1. Интенсивность пикселя, соответствующего определенной точке объекта, не меняется при его перемещении между кадрами, т. е. должна быть обеспечена постоянная яркость:

$$I(x, y, t) \approx I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t).$$

Это является фундаментальным условием для отслеживания контролируемой точки.

2. Точки в пределах малой окрестности (например, 3×3 или 5×5 пикселей) перемещаются одинаково. Это предположение позволяет использовать метод для анализа небольших, но быстрых перемещений, характерных для вибраций траков, при условии высокой частоты кадровой съемки.

Математический аппарат. Из первого предположения выводится основное уравнение оптического потока. Пусть смещение точки за время Δt равно $(\Delta x, \Delta y)$. Разложив уравнение в ряд Тейлора и пренебрегая членами высшего порядка, получим:

$$\begin{aligned} I(x, y, t) &\approx I(x + u, y + v, t + \Delta t) \approx \\ &\approx I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} u + \frac{\partial I}{\partial y} v + \frac{\partial I}{\partial t} \Delta t, \end{aligned} \quad (1)$$

где $u = \frac{dx}{dt}$; $v = \frac{dy}{dt}$.

Сокращая $I(x, y, t)$ и учитывая, что производные по пространству $I_x = \frac{\partial I}{\partial x}$, $I_y = \frac{\partial I}{\partial y}$ и по времени $I_t = \frac{\partial I}{\partial t}$ могут быть вычислены из последовательности изображений, получаем:

$$I_x u + I_y v + I_t = 0. \quad (2)$$

Это уравнение содержит две неизвестные: u и v (компоненты вектора смещения). Для его решения используется второе предположение: считается, что все n пикселей в небольшой окрестности (например, при 5×5 $n = 25$) имеют одинаковое смещение (u, v) . Это позволяет построить переопределенную систему из n уравнений:

$$\begin{cases} I_x(q_1) \cdot u + I_y(q_1) \cdot v = -I_t(q_1), \\ I_x(q_2) \cdot u + I_y(q_2) \cdot v = -I_t(q_2), \\ \dots \\ I_x(q_n) \cdot u + I_y(q_n) \cdot v = -I_t(q_n). \end{cases} \quad (3)$$

Такая система решается методом наименьших квадратов, что дает надежную и точную оценку вектора перемещения (u, v) для центрального пикселя окрестности.

Алгоритм практической реализации для гусеничного обвода:

- обнаружение точек: на первом кадре видеоряда выбираются и находятся характерные, хорошо локализуемые точки для отслеживания. Ими могут быть любые характерные точки, например, специ-

ально нанесенные контрастные маркеры или естественные текстуры на поверхности траков;

- отслеживание: для каждой обнаруженной точки на первом кадре алгоритм Лукаса–Канаде вычисляет ее предполагаемое положение на каждом последующем кадре;

- калибровка: процедура калибровки камеры для перевода пиксельных смещений (u, v) в абсолютные метрические единицы (метры, миллиметры).

Реализация разработанного метода и анализ результатов экспериментальных исследований. Метод предполагает комплексный подход, начинающийся с предварительной подготовки эксперимента, которая включает установку маркеров на объекте исследования (например, на гусенице, катках, корпусных деталях, различного технологического оборудовании) и монтаж высокоскоростных камер высокого разрешения вдоль маршрута движения, что иллюстрируется схемой расстановки камер (рисунок 1).

Процесс измерения перемещений заключается в высокоскоростной видеозаписи движения объекта с последующей обработкой полученных данных с использованием специализированного программного кода, разработанного авторами в среде MATLAB, в котором реализуется автоматическое отслеживание координат массива точек видеоряда с детальным протоколированием результатов оценки разреженного оптического потока для ключевых точек [20].

Функционал программы заключается в загрузке видеофайла и интерактивном выборе точек для отслеживания, пок кадровом выводе координат этих точек с временной привязкой, сохранении результатов в форматах, удобных для последующего анализа (таблицы Excel и MATLAB-файлы), а также генерации видео в формате MP4 с визуализацией траекторий движения отслеживаемых точек, пример которой в пиксельных координатах представлен на рисунке 2.

Для повышения точности и надежности трекинга в условиях сложной освещенности или при недостаточной контрастности изображения применяется предварительная обработка видеофайла, для чего используется специализированный программный продукт Movavi Video Editor, позволяющий корректировать яркость и контрастность исходного видео. Поскольку программа произво-

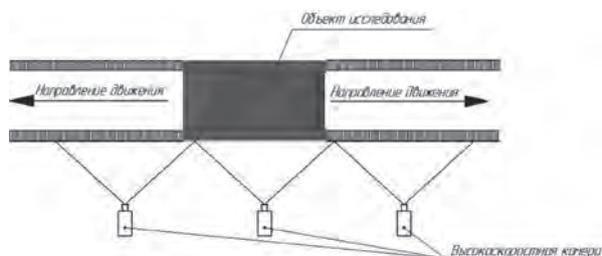


Рисунок 1 — Схема расстановки камер в зоне проведения эксперимента
Figure 1 — Layout of cameras in the experimental area



Рисунок 2 — Пример визуализации траектории движения отслеживаемых точек в пиксельных координатах
Figure 2 — Visualization example of the tracked points trajectory in pixel coordinates

дит расчет координат в пикселях, для перехода к реальным физическим величинам необходимо выполнить калибровку — определить масштабный коэффициент, так называемую пиксельную стоимость. Данный параметр, выражаемый в метрах на пиксель, рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot B}{R}, \quad (4)$$

где P — искомая стоимость одного пикселя; α — половина угла захвата камеры; B — расстояние от камеры до объекта исследования; R — разрешение камеры по вертикали (для приведенного в примере случая $R = 1920$ точек). Геометрическая сущность этой формулы проиллюстрирована на расчетной схеме для оценки пиксельной стоимости (рисунок 3).

После применения данного масштабирования становятся доступными реальные значения перемещений, что позволяет строить осциллограммы изучаемых процессов, как это показано на рисунке 4 а для фрагмента осциллограммы, характеризующей изменение кинематических параметров контролируемой точки на гусенице.

Учитывая, что процессы деформации и колебания гусеницы носят высокоскоростной характер, критически важным параметром метода является частота съемки. Согласно фундаментальной теореме Котельникова–Шеннона [21, 22] аналоговый сигнал с ограниченным спектром может быть точно восстановлен по своим дискретным отсчетам, взятым с частотой, как минимум в два раза превышающей частоту в спектре сигнала. С учетом общепринятых рекомендаций практи-

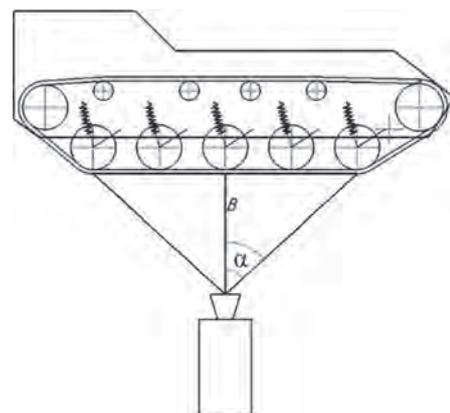
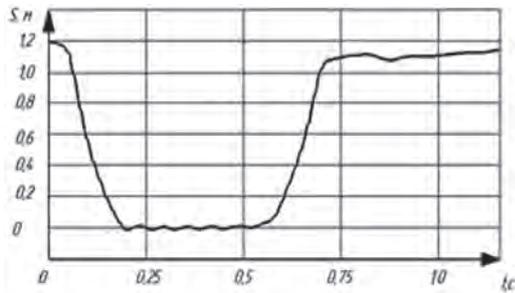
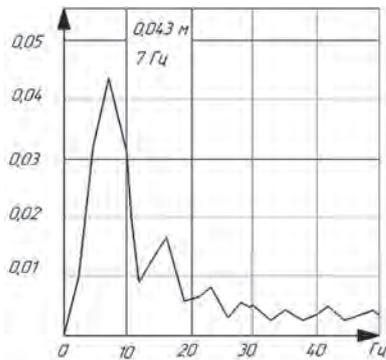


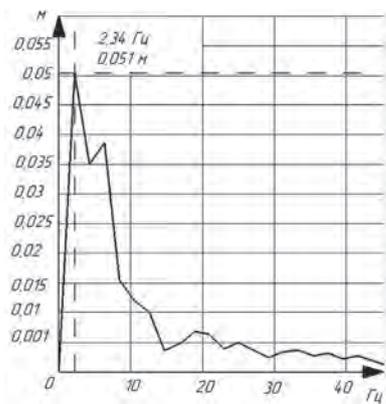
Рисунок 3 — Расчетная схема для оценки пиксельной стоимости
Figure 3 — Calculation scheme for assessing the pixel cost



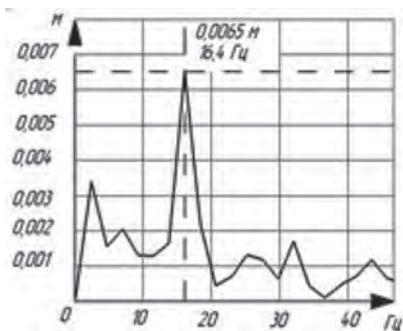
a



b



c



d

Рисунок 4 — Результаты регистрации измерений и обработки кинематических параметров контролируемой точки (маркера на гусенице): a — временная зависимость колебаний гусеницы; b — АЧХ колебательного процесса в свободной ветви; c — АЧХ колебательного процесса в рабочей ветви; d — АЧХ колебательного процесса в опорной ветви

Figure 4 — Results of recording measurements and processing the kinematic parameters of a controlled point (marker on a track): a — time dependence of track oscillations; b — frequency response of the oscillation process in the free branch; c — frequency response of the oscillation process in the working branch; d — frequency response of the oscillation process in the support branch

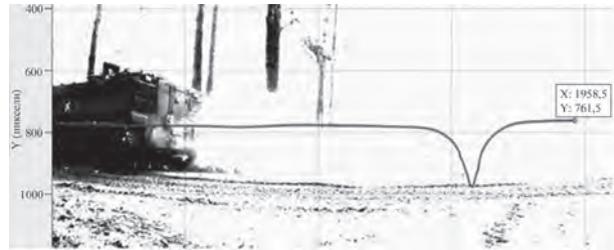


Рисунок 5 — Визуализация траекторий движения контролируемых точек гусеницы в пиксельных координатах
Figure 5 — Visualization of the trajectories of the controlled points of the track in pixel coordinates

ческая частота дискретизации выбирается с некоторым запасом, например, $f_d > 3f_k$ [23, с. 514] или $f_d \geq (2,5 \dots 5)f_k$ [24, с. 29]. На основе этого положения был выполнен анализ, который позволил установить рекомендуемые границы скорости съемки: для общего трекинга движения гусеницы необходима скорость 200–2000 кадров в секунду и выше, в то время как для детального изучения ударных взаимодействий (например, перекатывания опорного катка по стыку плит) требуется скорость от 2000 до 10 000 кадров в секунду и выше.

Отладка и верификация предложенного метода были выполнены в ходе полигонных испытаний образца легкого гусеничного шасси. Движение осуществлялось по разбитой асфальтовой поверхности низкого качества, что соответствует профилю категории «В» международного стандарта ISO 8608:2016 [25].

Фрагмент осциллограммы, демонстрирующей траекторию движения одной из отслеживаемых точек гусеничного обвода в пиксельных координатах, приведен на рисунке 5, то же в метрических координатах в зависимости от времени — на рисунке 4 a. Сформированные временные ряды подвергаются углубленному анализу, например, с использованием программного обеспечения PowerGraph 3.x Professional, которое предоставляет широкий набор инструментов для фильтрации и спектрального анализа данных. В частности, применялось преобразование Гильберта для анализа огибающей и мгновенной частот сигнала, а также встроенные функции преобразования Фурье для перехода в частотную область, построения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и получения спектральных оценок процессов. Частотный анализ выполнялся в следующей последовательности.

1. Для каждого временного ряда, соответствующего одной из ветвей гусеничного обвода (свободной, рабочей и опорной), вычисляется быстрое преобразование Фурье (FFT), что позволяет перейти из временной области в частотную и идентифицировать частотный состав колебаний в каждой точке наблюдения.

2. Выявляются гармонические составляющие, свидетельствующие о полигармоническом характере колебательных процессов, происходящих в ветвях гусеничного обвода. Выполняется срав-

нение спектров отслеживаемых точек, находящихся на разных участках гусеничного обвода, находящихся на разных участках обвода, что позволяет оценить, как изменяется частотный состав колебаний при распространении возмущения.

3. Анализируются АЧХ, что позволяет идентифицировать собственные частоты, амплитуды, коэффициенты демпфирования и формы колебаний участков гусеничного обвода, устанавливаются причины и источники возбуждения тех или иных форм колебаний, выявляются участки, где происходит усиление колебаний, что может указывать на резонансные явления или неравномерность натяжения ветви.

4. Вычисляется фазовый сдвиг колебаний одной и той же частоты (например, основной частоты зацепления) между разными точками гусеницы. Это позволяет определить скорость распространения периодического возмущения вдоль обвода и визуализировать бегущую волну деформации.

На рисунке 4 представлены результаты обработки исходного сигнала во временной и частотной областях. Как следует из анализа рисунка 4 а, колебательный процесс наблюдается во всех участках гусеничного обвода. Из рисунка 4 б–д установлено, что при данных условиях функционирования объекта исследования в свободной ветви гусеницы доминирующим является колебательный процесс с амплитудой 0,043 м на частоте 7 Гц, в рабочей ветви происходят колебания с амплитудой 0,051 м и частотой 2,34 Гц, в опорной ветви — с амплитудой 0,0065 м на частоте 16,4 Гц, что соответствует «траковой» частоте.

Полученные результаты экспериментального исследования использовались для верификации математической модели, разработанной ранее и представленной в работе [26].

По результатам выполненного исследования можно сформулировать ключевые преимущества разработанного метода экспериментального определения кинематических и силовых факторов, оказывающих влияние на динамическую и вибрационную нагруженность как собственно ветвей гусеничного обвода, так и других элементов конструкции объекта исследований, в том числе и неупругих масс машины:

- пространственная синхронность: все точки измеряются одновременно одной камерой, что обеспечивает безупречную синхронизацию данных для последующего фазового анализа и построения пространственных картин колебаний в фиксированный момент времени;
- выявление пространственных режимов: метод позволяет не просто обнаружить факт периодичности, а определить пространственную форму колебаний гусеничной ветви (например, увидеть стоячие волны или бегущие волны деформации);
- корреляция с частотой вращения: изменяя режим движения машины (частоту вращения ведущего колеса), можно управлять частотой возмуще-

ния и экспериментально исследовать переходные и резонансные режимы, фиксируя отклик всей системы в пространстве и времени;

- разделение источников вибрации: комплексный анализ спектров от множества точек позволяет статистически достоверно отделить вибрации, вызванные зацеплением, от вибраций, вызванных неровностью пути или работой других агрегатов.

Заключение и перспективы. Представлен метод на основе компьютерного зрения, который открывает новые возможности для фундаментального изучения периодических процессов в гусеничных движителях. Используемый в методе в качестве базового алгоритм оптического потока Лукаса–Канаде представляет собой не просто альтернативу, а качественно иной уровень подхода к измерению перемещений в гусеничных машинах. Его способность бесконтактно и с высокой точностью отслеживать одновременно сотни точек превращает его из вспомогательного инструмента в центральный метод современного экспериментального исследования динамики гусеничного движителя. Она трансформирует исследование из точечного в полевое, позволяя впервые увидеть и количественно оценить полную картину распространения циклических возмущений.

Этот подход является ключевым для решения важных практических задач, таких как выявление резонансных режимов работы для их последующего подавления; пространственно-частотный анализ колебаний может служить точным диагностическим признаком износа шарниров траков, неравномерного натяжения гусеницы или деформации катков; полученные экспериментальные данные служат бесценным материалом для проверки адекватности математических и компьютерных моделей динамики гусеничных систем.

Дальнейшее развитие метода связано с применением методов машинного обучения для автоматической классификации режимов движения и адаптивных алгоритмов фильтрации, повышающих точность измерений в условиях сильных помех.

Список литературы

1. Гусеничные транспортеры-тягачи / В.Ф. Платонов, А.Ф. Белоусов, Н.Г. Олейников, Г.И. Карцев; под ред. В.Ф. Платонова. — М.: Машиностроение, 1978. — 351 с.
2. Березин, И.Я. Динамика системы «грунт гусеница — опорный каток» / И.Я. Березин, А.И. Плагов, Е.Е. Рихтер // Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузках: темат. сб. науч. тр. / под ред. И.Я. Березина. — Челябинск: ЧГТУ, 1991. — С. 123–128.
3. Динамика гусеничной ленты с эластомерными уширителями / А.А. Абызов, И.Я. Березин, Е.Е. Рихтер, В.И. Бывальцев // Тракторы и сельхозмашины. — 2012. — Т. 79, № 5. — С. 36–38. — DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-69400>.
4. Абызов, А.А. Моделирование динамики гусеничной ленты с эластомерными уширителями / А.А. Абызов // Тракторы и сельхозмашины. — 2012. — Т. 79, № 7. — С. 48–51. — DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-69480>.
5. Разработка единой математической модели связанной нелинейной динамической системы мобильной машины, включающей элементы движителя. Разработка программных средств, идентификация модели и исследования динамики: отчет о НИР (заключ.) / ЮУрГУ; рук. А.А. Абызов, исполн.: А.А. Абызов. — Челябинск, 2003. — 37 с. — № ГР 01.2002207631. — Инв. № 02.2004 03844.

6. Разработка математической модели динамики гибкого стержня с присоединенными эластомерными элементами и его взаимодействия с нелинейной вязкоупругой средой: отчет о НИР (промежуточ.) / ЮУрГУ; рук. А.А. Абызов, исполн.: А.А. Абызов. — Челябинск, 2002. — 35 с. — № ГР 01.200207631. — Инв. № 02.2003 04184.
7. Three-dimensional nonlinear tooth meshing modeling and analysis for preloaded tracked vehicles / K. Huang, G. Wang, P. Wang [et al.]. — DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5317820/v1>. — (Preprint / Research Square; ver. 1).
8. Жданович, Ч.И. Экспериментальные исследования колебаний верхней ветви резиноармированной гусеницы сельскохозяйственного трактора / Ч.И. Жданович, В.Н. Плищ // Агропанорама. — 2023. — № 4(158). — С. 4–9. — DOI: <https://doi.org/10.56619/2078-7138-2023-158-4-4-9>.
9. Chodowski, J. On the energy losses due to tracks vibrations in rubber track crawler vehicles / J. Chodowski, P.A. Dudziński, M. Ketting // Archives of Civil and Mechanical Engineering. — 2021. — Vol. 21, iss. 2. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00212-8>.
10. Guo, W. Vision-based displacement measurement method of large-scale bridges using tilt shift camera and fast spatio-temporal context learning / W. Guo, J. Li, Y. Hu // Mechanical Systems and Signal Processing. — Vol. 224. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.112165>.
11. Diwan, T. Object detection using YOLO: challenges, architectural successors, datasets and applications / T. Diwan, G. Anirudh, J.V. Tembhurne // Multimedia Tools and Applications. — 2023. — Vol. 82, iss. 6. — P. 9243–9275. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13644-y>.
12. SSD: single shot multibox detector / W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan [et al.] // Computer Vision – ECCV 2016: proc. of the 14th European Conf., Amsterdam, 11–14 Oct. 2016: 8 vol. / eds.: B. Leibe, J. Matas, N. Sebe, M. Welling. — London, 2016. — Vol. 1. — P. 21–37. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2.
13. Bharati, P. Deep learning techniques—R-CNN to Mask R-CNN: a survey / P. Bharati, A. Pramanik // Computational Intelligence in Pattern Recognition: proc. of the 1st Intern. Conf. CIPR 2019, Shibpur, 19–20 Jan. 2019 // eds.: A.K. Das, J. Nayak, B. Naik [et al.]. — Singapore, 2020. — P. 657–668. — DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-9042-5_56.
14. Bajpai, R. MoveNet: a deep neural network for joint profile prediction across variable walking speeds and slopes / R. Bajpai, D. Joshi // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2021. — Vol. 70 — P. 1–11. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2021.3073720>.
15. Ghanbari, S. User identification based on hand geometrical biometrics using Media-Pipe / S. Ghanbari, Z.P. Ashtyani, M.T. Masouleh // Proc. of the 30th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, 17–19 May 2022. — Tehran, 2022. — P. 373–378. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICEE55646.2022.9827056>.
16. A fall detection alert system based on lightweight Openpose and spatial-temporal graph convolution network / W. Mai, F. Wu, Z. Guo [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2035. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2035/1/012036>.
17. 3D human motion capture method based on computer vision / A.D. Obukhov, D.L. Dedov, E.O. Surkova, I.L. Korobova // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). — 2023. — Vol. 23, no. 3. — P. 317–328. — DOI: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-317-328>.
18. Chung, J.-L. Comparative analysis of skeleton-based human pose estimation / J.-L. Chung, L.-Y. Ong, M.-C. Leow // Future Internet. — 2022. — Vol. 14, iss. 12. — DOI: <https://doi.org/10.3390/fi14120380>.
19. Multi-view triangulation: systematic comparison and an improved method / J. Chen, D. Wu, P. Song [et al.] // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 21 017–21 027. — DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969082>.
20. Lucas, B.D. An iterative image registration technique with an application to stereo vision / B.D. Lucas, T. Kanade // Proc. of the 7th Intern. Joint Conf. on Artificial Intelligence, San Francisco, 24–28 Aug. 1981: 2 vol. — San Francisco, 1981. — Vol. 2. — P. 674–679.
21. Котельников, В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи // Успехи физических наук. — 2006. — Т. 176, № 7. — С. 762–770. — DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0176.200607h.0762>.
22. Shannon, C.E. Communication in the presence of noise / C.E. Shannon // Proc. of the IRE. — 1949. — Vol. 37, iss. 1. — P. 10–21.
23. Радиотехника: энциклопедия / под ред. Ю.Л. Мазора, Е.А. Мачусского, В.И. Правды. — М.: Додэка-XXI, 2002. — 944 с.
24. Радиосистемы передачи информации: учеб. пособие для вузов / В.А. Васин, В.В. Калмыков, Ю.Н. Себекин [и др.]. — М.: Горячая линия–Телеком, 2005. — С. 29.
25. Mechanical vibration — Road surface profiles — Reporting of measured data: ISO 8608:2016. — Replacing ISO 8608:1995. — Publ. 01.11.2016. — 36 p. — URL: <https://www.iso.org/standard/71202.html> (date of access: 22.08.2025).
26. Расчетно-экспериментальное исследование динамики обвода гусеничного движителя транспортной машины высокой проходимости / А.И. Тараторкин, С.В. Абдулов, В.Б. Держанский [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2024. — № 4(69). — С. 50–60. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-4-69-50-60>.

TARATORKIN Alexey I.

Design Engineer¹

E-mail: al_tar@mail.ru

ABDULOV Sergey V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Executive Director – Chief Designer¹

E-mail: sincopa2004@mail.ru

TARATORKIN Igor A., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department of Mechanics of Transportation Vehicles – Chief Researcher²

E-mail: ig_tar@mail.ru

TARATORKIN Alexander I., D. Sc. in Eng.

Senior Research Fellow²

E-mail: alexandr_tar@mail.ru

¹JSC “Special Design Bureau of Mechanical Engineering”, Kurgan, Russian Federation

²Institute of Engineering Science, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

Received September 22, 2025.

METHODS OF CARTEPILLAR DRIVE VIBRATION MEASUREMENT: MODERN APPROACHES AND TECHNOLOGIES

The article focuses on overcoming the limitations of contact methods for measuring the dynamics of tracked vehicles. As a solution, a method is proposed which is based on non-contact measurement of track link displacements using high-speed videography and computer vision algorithms. The implementation of the Lu-

cas–Kanade optical flow, an efficient algorithm for tracking feature points on the surface of the track links, is discussed in detail. It is shown that this approach allows for highly accurate measurement of displacements, velocities, and deformations along the entire track loop without affecting the object of study, meeting the stringent requirements of experimental research. The method enables high-precision identification of frequencies, amplitudes, damping coefficients, and vibration modes of various track branches and provides a complete picture of the kinematics of the track loop branches without influencing the object under study.

Keywords: caterpillar drive, dynamics, oscillations, amplitude, frequency, computer vision, Lucas–Kanade optical flow method

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-1-74-41-48>

References

- Platonov V.F., Belousov A.F., Oleynikov N.G., Kartsev G.I. *Gusenichnye transportery-tyagachi* [Tracked tractor haulers]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1978. 351 p. (in Russ.).
- Berezin I.Ya., Plagov A.I., Rikhter E.E. Dinamika sistemy “grunt — gusenitsa — opornyy katok” [Dynamics of the “soil — track — roadwheel” system]. *Prochnost mashin i apparatov pri peremennykh nagruzheniyakh*, 1991. Pp. 123–128 (in Russ.).
- Abyzov A.A., Berezin I.Ya., Richter E.E., Byvaltsev V.I. Dinamika gusenichnoy lenty s elastomernymi ushiritelnyami [Movement of crawler band with elastomer wideners]. *Tractors and agricultural machinery*, 2012, vol. 79, no. 5, pp. 36–38. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-69400> (in Russ.).
- Abyzov A.A. Modelirovaniye dinamiki gusenichnoy lenty s elastomernymi ushiritelnyami [Modeling of dynamics of a crawler band with elastomer wideners]. *Tractors and agricultural machinery*, 2012, vol. 79, no. 7, pp. 48–51. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-69480> (in Russ.).
- Abyzov A.A. *Razrabotka edinoy matematicheskoy modeli svyazannoy nelineynoy dinamicheskoy sistemy mobilnoy mashiny, vkluchayushchey elementy dvizhitelya. Razrabotka programnykh sredstv, identifikatsiya modeli i issledovaniya dinamiki. Otchet o NIR (zaklyuch.)* [Development of a unified mathematical model of a coupled nonlinear dynamic system of a mobile machine. Research report (final)]. Chelyabinsk, 2003. 37 p. (in Russ.).
- Abyzov A.A. *Razrabotka matematicheskoy modeli dinamiki gibkogo sterzhnya s prisoedinennymi elastomernymi elementami i ego vzaimodeystviya s nelineynoy vyazkouprugoy sredoy. Otchet o NIR (promezhutoch.)* [Development of a mathematical model of the dynamics of a flexible rod with attached elastic elements and its interaction with a nonlinear viscoelastic medium. Research report (intermediate)]. Chelyabinsk, 2002. 35 p. (in Russ.).
- Huang K., Wang G., Wang P., Zhang J., Miao Y. *Three-dimensional nonlinear tooth meshing modeling and analysis for preloaded tracked vehicles*. Preprint. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5317820/v1>.
- Zhdanovich Ch.I., Plishch V.N. Eksperimentalnye issledovaniya kolebaniy verkhney vetvi rezinoarmirovannoy gusenitsy sel'skokhozyaystvennogo traktora [Experimental studies of oscillations of the upper branch of a rubber-reinforced track of an agricultural tractor]. *Agropanorama*, 2023, no. 4(158), pp. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.56619/2078-7138-2023-158-4-4-9> (in Russ.).
- Cholodowski J., Dudziński P.A., Ketting M. Energy loss due to track vibration in rubber track crawler vehicles. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2021, vol. 21, iss. 2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00212-8>.
- Guo W., Li J., Hu Y. Vision-based displacement measurement method of large-scale bridges using tilt shift camera and fast spatio-temporal context learning. *Mechanical systems and signal processing*, vol. 224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.112165>.
- Diwan T., Anirudh G., Tembhurne J.V. Object detection using YOLO: challenges, architectural successors, datasets and applications. *Multimedia tools and applications*, 2023, vol. 82, iss. 6, pp. 9243–9275. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13644-y>.
- Liu W., et al. SSD: single shot multibox detector. *Proc. 14th European conference “Computer Vision – ECCV 2016”*. Amsterdam, 2016, vol. 1, pp. 21–37. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2.
- Bharati P., Pramanik A. Deep learning techniques—R-CNN to Mask R-CNN: a survey. *Proc. 1st international conference “Computational intelligence in pattern recognition”*. Shibpur, 2020, pp. 657–668. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-9042-5_56.
- Bajpai R., Joshi D. MoveNet: a deep neural network for joint profile prediction across variable walking speeds and slopes. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 2021, vol. 70, pp. 1–11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2021.3073720>.
- Ghanbari S., Ashtyani Z.P., Masouleh M.T. User identification based on hand geometrical biometrics using Media-Pipe. *Proc. 30th international conference on electrical engineering (ICEE)*. Tehran, 2022, pp. 373–378. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICEE55646.2022.9827056>.
- Mai W., et al. A fall detection alert system based on lightweight openpose and spatial-temporal graph convolution network. *Journal of physics: conference series*, 2021, vol. 2035. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2035/1/012036>.
- Obukhov A.D., Dedov D.L., Surkova E.O., Korobova I.L. 3D human motion capture method based on computer vision. *Advanced engineering research (Rostov-on-Don)*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 317–328. DOI: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-317-328>.
- Chung J.-L., Ong L.-Y., Leow M.-C. Comparative analysis of skeleton-based human pose estimation. *Future internet*, 2022, vol. 14, iss. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi14120380>.
- Chen J., et al. Multi-view triangulation: systematic comparison and an improved method. *IEEE access*, 2020, vol. 8, pp. 21017–21027. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969082>.
- Lucas B.D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proc. 7th international joint conference on artificial intelligence*. San Francisco, 1981, vol. 2, pp. 674–679.
- Kotelnikov V.A. O propusknoy sposobnosti “efira” i provoloki v elektrosvyazi [On the transmission capacity of ‘ether’ and wire in electric communications]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2006, vol. 176, no. 7, pp. 762–770. DOI: <https://doi.org/10.3367/UF.Nr.0176.200607h.0762> (in Russ.).
- Shannon C.E. Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*, 1949, vol. 37, iss. 1, pp. 10–21.
- Radiotekhnika. Entsiklopediya* [Radio engineering. Encyclopedia]. Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2002. 944 p. (in Russ.).
- Vasin V.A., et al. *Radiosistemy peredachi informatsii* [Radio systems for information transmission]. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom Publ., 2005. P. 29. (in Russ.).
- ISO 8608:2016. *Mechanical vibration — Road surface profiles — Reporting of measured data*. 2016. 36 p. Available at: <https://www.iso.org/standard/71202.html>.
- Taratorkin A.I., et al. Raschetno-eksperimentalnoye issledovaniye dinamiki obvoda gusenichnogo dvizhitelya transportnoy mashiny vysokoy prokhodimosti [Calculation and experimental study of the dynamics of the track mover bypass of a cross-country transport vehicle]. *Mechanics machines, mechanisms and materials*, 2024, no. 4(69), pp. 50–60. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-4-69-50-60> (in Russ.).