

ПРОВЕРИМ ФЕЙНМАНА. ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЕЗДА НА РЕЛЬСАХ ИЛИ КАК ПОЕЗД ПОВОРАЧИВАЕТ?

¹Самойленко А.Д., ²Самойленко И.Д.

¹г. Москва, ГАОУ ЦО № 548 «ЦАРИЦИНО», 8 класс;

²г. Москва, ГАОУ ЦО № 548 «ЦАРИЦИНО», 5 класс

Научный руководитель: Самойленко Н.Г., г. Черноголовка, к.т.н., ИПХФ РАН

Изучен один из принципов работы железнодорожного транспорта, построена модель железной дороги и колесной пары, создан измерительный стенд, применена оригинальная методика измерений, предложено практическое применение результатов проведенного исследования.

В работе рассмотрен известный и вместе с тем простой и оригинальный физический механизм (принцип), удерживающий поезд на рельсах. Создан стенд, на котором проведена экспериментальная проверка принципа.

В конструкции стенда использована лазерная подсветка, а также видеофиксация явления для последующей кадровой расшивки. Полученные данные представлены в виде графиков и проанализированы.

Показано, что:

1) колесная пара, выведенная из равновесного движения по рельсам (путем смещения поперек рельсов), стремится вернуться к равновесному движению уже без смещения, осуществляя затухающие поперечные колебания;

2) непараллельность рельсового полотна и некачественные рельсовые стыки отчетливо просматриваются на графиках, как дополнительные возмущения;

3) конструкция стенда может быть использована, как модель измерительного прибора для контроля параллельности железнодорожного полотна.

Постановка проблемы.

Поворот и равновесие поезда

Авторов заинтересовала одна из лекций известного физика Ричарда Фейнмана «Поезда» [1], где он увлекательно и просто рассказывает о необычной форме железнодорожных колес, задаваясь простым с виду вопросом: что удерживает поезд на рельсах?

Почти все отвечают: «Конечно же – выступы на колёсах» (рис. 1) [3]. Но это не ответ! Эти выступы – всего лишь средство безопасности – на случай, если настоящий механизм не работает. Какой же?

Ответ в том, **как** поезд поворачивает. При повороте железнодорожного полотна

внешние колёса должны проехать за одно и то же время большее расстояние $L1$ (и значит быстрее), чем расстояние $L2$ – внутреннее (рис. 2) [2]:

$$L1 > L2, \quad (1)$$

где $L1$ и $L2$ – расстояния, пройденные внешним и внутренним колесом соответственно, и

$$V1 > V2, \quad (2)$$

где $V1$ и $V2$ – скорости, прохождения внешним и внутренним колесом соответственно пути $L1$ и $L2$.

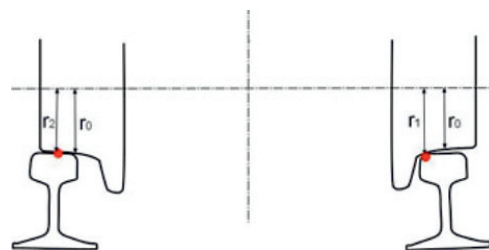


Рис. 1. Железнодорожная колесная пара на рельсах в разрезе

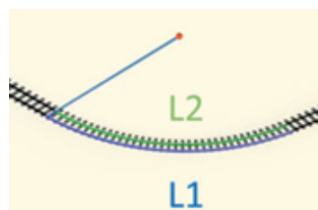


Рис. 2. Путь $L1$ внешнего и $L2$ внутреннего колеса при повороте полотна

Но колёса соединены **цельной осью** и не получится одно колесо проворачивать быстрее другого. В автомобиле эта ось разорвана посередине механизмом – дифференциалом (рис. 3) [4], позволяющим колёсам крутиться с разной скоростью. «Вы видели дифференциал у поезда?! – спрашивает в лекции Фейнман. – Нет! Вы видите только цельную трубу от одного колеса до другого! И они крутятся с одной скоростью». Так как же поезд поворачивает за угол?

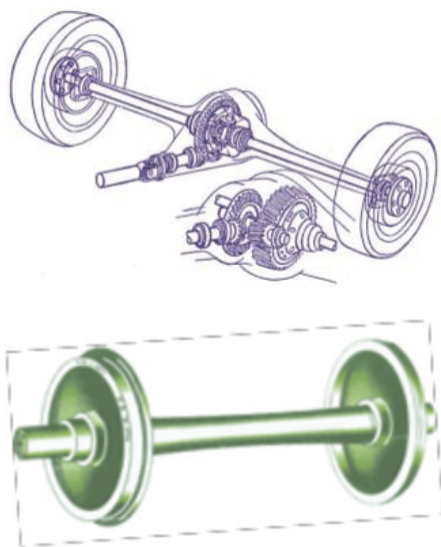


Рис. 3. Дифференциал в автомобиле и ось колесной пары

Разгадка, в том, что колёса скошены (рис. 4) [2], то есть они конусообразны. Получается, что внутренняя часть колёс больше диаметром, чем внешняя.

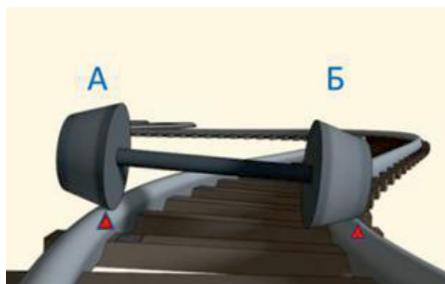


Рис. 4. Поворот колес на разных диаметрах А и Б

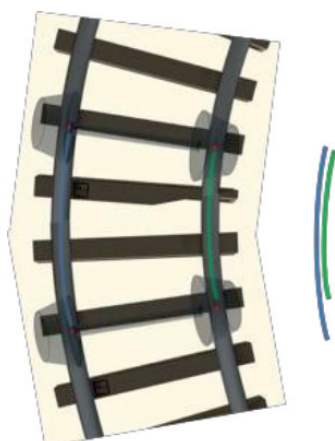


Рис. 5. Внешнее колесо проходит больший путь, чем внутренне

И всё это очень просто! Когда состав делает поворот, вагон немного соскальзывает

с пути, так что внешнее колесо А поворачивается на большем диаметре, а внутреннее Б – на меньшем.

Когда оба колеса совершили оборот, то **большее** проехало больший путь **L1** с большей скоростью **V1**, чем **меньшее** – меньший путь **L2** с меньшей скоростью **V2** (рис. 5), согласно формулам (1) и (2).

Поезд в равновесии. Устойчивость колесной пары

Представим, что поезд едет по прямолинейным рельсам и оба колеса находятся в балансе, то есть движутся на равных диаметрах. Допустим, как говорит Фейнман, что в какой-то момент пара натывается на неровность и смещается поперек рельсов.

Тогда колесо А стоит на большом диаметре, а колесо Б – на меньшем, подобно ситуации на рис. 4. Но они соединены цельной осью так, что когда они проезжают полный оборот, то колесо А **проезжает дальше и выталкивает поезд обратно на рельсы**.

«Конечно, если смещение было слишком большим, то поезд будет ещё покачиваться туда-сюда и всё равно будет стремиться встать ровно на рельсы, – говорит Фейнман. – А выступ для безопасности!»

Авторы решили на практике проверить: как этот физический механизм работает.

Метод изучения. Схема эксперимента

Была построена модель железной дороги (рис. 6), размеры которой позволяли визуально наблюдать колебания колесной пары (1) на рельсах (2). Колесная пара устанавливалась с одной стороны путей со смещением (то есть на разных диаметрах колес, как на рис. 1 и рис. 4) и плавно запускалась.

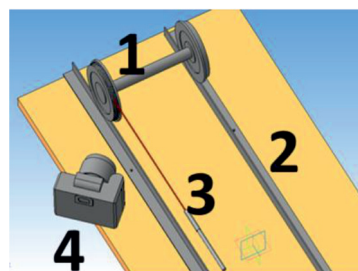


Рис. 6. Схема эксперимента. 1 – колесная пара; 2 – рельсы; 3 – лазер; 4 – видеокамера

На одно из колес были нанесены через равные промежутки кольцевые метки. На это колесо параллельно рельсу (вдоль пути) направлялся луч лазера (3), который создавал в процессе движения пары неподвижную относительно пути точку на колесе.

При поперечных колебаниях колеса кольцевые метки перемещались относительно лазерной точки, что фиксировалось на видеокамеру (4). Камера перемещалась на подставке рядом с катившейся колесной парой.

Покадровая обработка видеозаписи позволила построить кривые поперечных колебаний колесной пары относительно метки лазера на колесе.

Стенд и методика

1. Состав измерительного стенда:

1) **модель прямолинейного участка железнодорожного полотна** (рис. 7) собрана из основания (три полотна фанеры размером 1500 x 300 x 18 мм, скрепленные уголками) и рельсового пути с колеей 184 мм (четыре алюминиевых уголка размером 2000 x 15 x 15 мм толщиной 2 мм). Модель установлена на горизонтальном полу. Габариты модели 4,5 x 0,3 x 0,03 м;



Рис. 7. Модель дороги

2) металлическая **колесная пара** (рис. 8) массой 1,3 кг с габаритными размерами $\varnothing 115 \times 195$ мм. На одном колесе черным перманентным (несмываемым) маркером нанесены через 1,8 мм пять параллельных полос-меток (см. п. 4.5. «Методика построения графиков поперечных колебаний пары»);

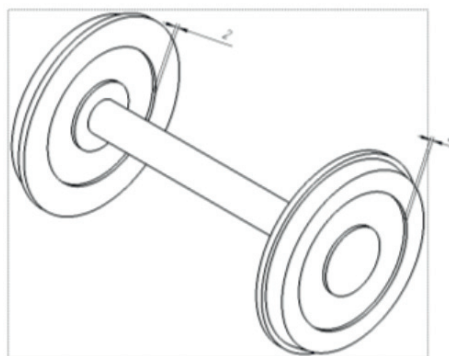
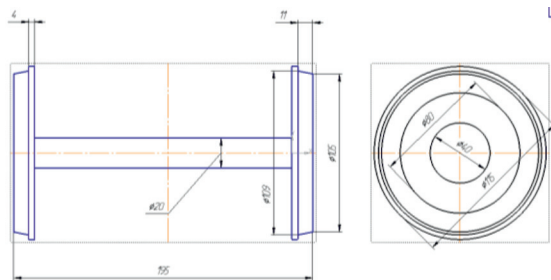


Рис. 8. Колесная пара



Рис. 9. Лазер и его метка на колесе

3) красный **лазер подсветки** (рис. 9) с диаметром луча $\varnothing 1,5$ мм. Лазер был установлен вдоль рельса на расстоянии 5 м от места старта пары и 1 м от места завершения пробега. Высота установки 50 мм над уровнем рельса;

| дата | | 30.08.2014 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--|------------|--|-------|--|-------|--|-------|--|---|--|---|--|-------|--|-------|--|-------|--|---|--|-------|--|-------|--|-------|--|----------------|--|
| запись | | MVI_8450 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | секунд | | 1 2 3 | | 4 5 6 | | 7 8 9 | | 1 | | 4 | | 1 2 3 | | 4 5 6 | | 7 8 9 | | 5 | | 1 2 3 | | 4 5 6 | | 7 8 9 | | Отметка лазера | |
| 2,4 секунды | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3,3 | |
| | | 0,04 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3,5 | |
| | | 0,08 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3,8 | |
| | | 0,12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3,95 | |
| | | 0,16 | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | 4,1 | |
| | | 0,2 | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | 4,3 | |
| | | 0,24 | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | 4,5 | |
| | | 0,28 | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | 4,8 | |
| | | 0,32 | | | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | 5,2 | |
| | | 0,36 | | | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | 5,4 | |
| | | 0,4 | | | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | 5,1 | |
| | | 0,44 | | | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | 5 | |
| | | 0,48 | | | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | 4,9 | |
| | | 0,52 | | | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | 4,7 | |
| | | 0,56 | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | 4,4 | |
| 3 секунды | | 0,6 | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | 4,2 | |
| | | 0,64 | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | 4,05 | |
| | | 0,68 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3,8 | |
| | | 0,72 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3,5 | |
| | | 0,76 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3,35 | |
| | | 0,8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3,65 | |
| | | 0,84 | | | | | | | | x | | x | | | | | | | | | | | | | | | | 3,9 | |
| | | 0,88 | | | | | | | | x | | x | | x | | x | | x | | x | | | | | | | | 4,1 | |
| | | 0,92 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3,9 | |
| | | 0,96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3,6 | |
| | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3,2 | |
| | | 1,04 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2,9 | |
| | | 1,08 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2,7 | |
| | | 1,12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 1,16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Рис. 10. Пример данных видеосъемки, перенесенных в таблицу

4) **фотокамера** CANON EOS 550D с частотой видеосъемки 25 кадров/с, перемещавшаяся на подставке из экструдированного пенополистирола размером 200 x 150 x 50 мм.

2. В состав участников измерений входили три человека: первый запускал пару, второй контролировал работу подсветки, третий проводил съемку.

3. Скорость движения колесной пары в эксперименте составляла от 0,2 до 0,5 м/с. Продолжительность съемки одного прохода пары составила от 8 до 12 с.

4. Измерения проводились в июле – августе 2014 года. Всего проведено 26 съемок. Обработка результатов проведена в конце 2014 – начале 2015 годов.

5. Методика построения графиков поперечных колебаний пары. При покадровой обработке увеличенных изображений движущегося колеса фиксировалось положение метки лазера относительно полос-меток (рис. 9) и переносилось в электронные таблицы.

В таблице EXCEL (рис. 10) в столбцах были условно отложены и пронумерованы полосы-метки на колесе (красные столбцы с 1 по 5, метка 5,9 – край защитного

обода колеса) и промежутки между ними. Каждый промежуток в свою очередь разделен на десять участков (положениями с 1 по 9, обозначенными между красными столбцами).

В строках таблицы с периодичностью 0,04 с откладывалось время от начала съемки. Пересечение столбца и строки, помеченное знаком «x», соответствовало положению метки лазера на колесе в данный момент. В последний столбец «Отметка лазера» занесены численные значения (в относительных единицах меток на колесе) положения метки лазера с точностью до десятых. Эти значения могут меняться в пределах от 0,0 до 6,0.

Строки, помеченные желтым цветом, соответствовали кадрам с расфокусированным изображением, где четкое положение метки лазера отсутствует (Расфокусировка происходит при не соблюдении постоянного расстояния между камерой и парой, то есть если пара и камера движутся с разными скоростями). Такие данные не учитывались при построении графиков.

За один проход обрабатывалось от 250 до 270 изображений для построения точек на графике.

Результаты исследования и их обсуждение

В Приложениях 1, 2, 3 приводятся результаты измерений №№ 8441, 8448 и 8450 в виде графиков. Измерения проведены 30.08.2014.

Синяя кривая – результаты измерений, красная – те же данные, сглаженные простым линейным фильтром путем усреднения значений по 10 точкам. Сглаживание применялось для уменьшения влияния выпавших точек при расфокусировке видеоизображений. Данные графиков позволяют судить о величинах амплитуд колебаний, исходя из расстояния между двумя метками на колесе равному 1,8 мм. Например, амплитуда колебания в 3 метки соответствует величине 5,4 мм.

На всех графиках наблюдаются плавные поперечные колебания колесной пары с большой амплитудой. Величина амплитуды составляет 5,5–6,5 мм. Наклон кривых, отмеченный на графиках в Приложениях 2 и 3 синими прямоугольниками, обсуждается ниже в разделе 6.

Имеют место также малые колебания амплитудой до 0,5 мм, которые не носят системный характер, то есть не повторяются от опыта к опыту на одних и тех же участках пути.

Вместе с тем обращают на себя внимание две области характерные для всех графиков. Они обозначены зеленым прямоугольником и оранжевым треугольником.

Зеленой прямоугольной областью обозначены данные, которые соответствуют участку пути 140–160-й см, где рельсы были не параллельны. Причем важно отметить, что непараллельность рельсов была обнаружена уже после обработки результатов. В этой области на графиках наблюдается почти двукратное уменьшение амплитуды больших колебаний.

Оранжевый треугольник соответствует рельсовому стыку на участке 200-й см. Перемещение пары через стык приводит к броску амплитуды порядка 0,8 мм.

Колебания большой амплитуды в 5,5–6,5 мм подтверждают качественную модель неравновесного движения колесной пары на прямолинейном пути, которую в своей лекции описал Р. Фейнман (см. раздел 2). Также обнаружено постепенное **затухание** поперечных колебаний, которое наблюдается на графике в Приложении 3 и обозначено двумя сходящимися фиолетовыми прямыми.

Непараллельность рельсов (область движения в этой части пути обозначена зеленым прямоугольником) была обнаружена уже после обработки результатов – левый

рельс был вогнут в сторону полотна и тем самым ограничивал движение пары влево, что и наблюдалось на графиках в виде ограничения амплитуды на 1,5 мм. Данное обстоятельство показывает, что регистрацию возмущений поперечных колебаний колесной пары можно использовать для контроля качества пути, в частности, его параллельности.

То же самое можно отметить в отношении **рельсовых стыков** (положение обозначено на графиках оранжевым треугольником), где наблюдается бросок амплитуды величиной около 0,8 мм. Характерно, что поведение колес на стыке является иллюстрацией фразы Фейнмана, что «в какой-то момент пара натывается на неровность и смещается поперек рельсов»

Наклон кривых, отмеченный на графиках в Приложениях 2 и 3 синими прямоугольниками, связан с непараллельной установкой лазера правому рельсу перед экспериментом. Так, при съемке №8448 (Приложение 2) луч смещен на 3,5 мм на 4 м пути, а при съемке №8450 (Приложение 3) – на 1 мм на 4 м пути

Малые колебания на графиках амплитудой до 0,5 мм связаны:

- во-первых, с неточностью обработки видеоизображений, поскольку при анализе видеокadra фиксировался центр пятна от луча лазера. При этом диаметр пятна составлял 1,5 мм, а расстояние между метками около 1,8 мм. В таких условиях в случае расфокусировки центр терялся, и возникали ошибки;

- во-вторых, с неточностью нанесения разметки на колесо, что в свою очередь могло вызвать ошибку в несколько десятых мм при рассмотрении стоп-кадра.

В заключение можно отметить, что **принцип работы стенда**, основанного на измерении возмущений свободных поперечных колебаний движущейся колесной пары, может рассматриваться в качестве модели прибора, контролирующего качество железнодорожного полотна. В Приложении 4 приводится принципиальная схема подобного прибора – «**Системы анализа колебаний колесной пары**», которая может быть установлена на контрольном вагоне. В состав системы входят следующие блоки:

- свободно качающаяся малая колесная пара (синий блок);

- нежесткая подвеска, позволяющая горизонтальные колебания пары (оранжевый блок), она же может периодически перезапускать затухающие колебания;

- лазер подсветки (зеленый блок);

- видеокамера и система обработки информации-анализа колебаний (красный блок).

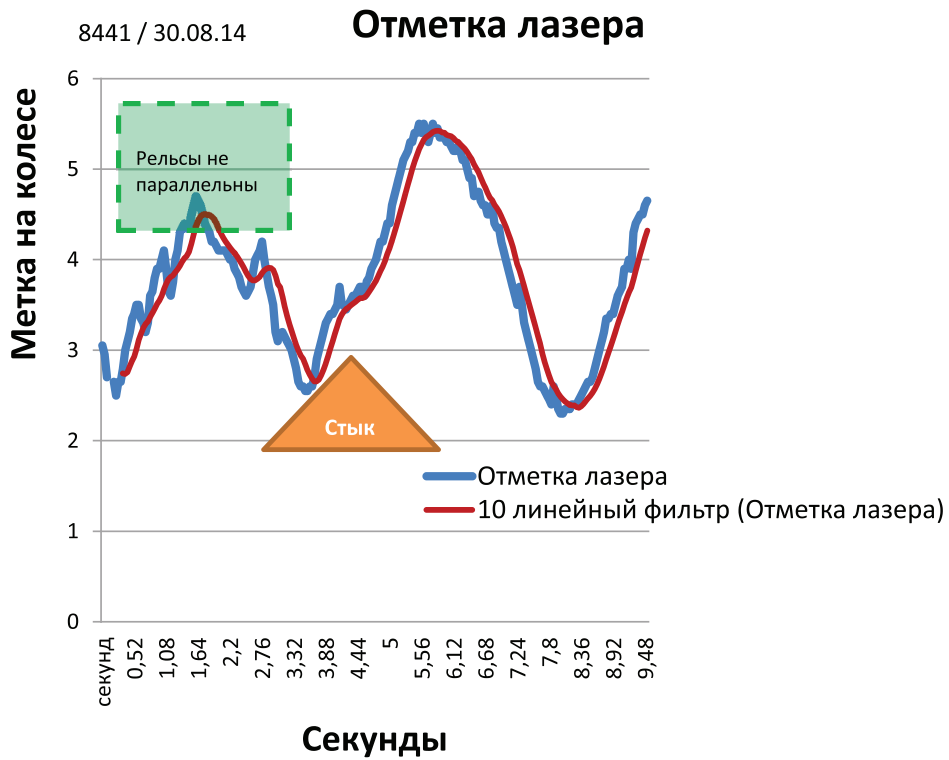


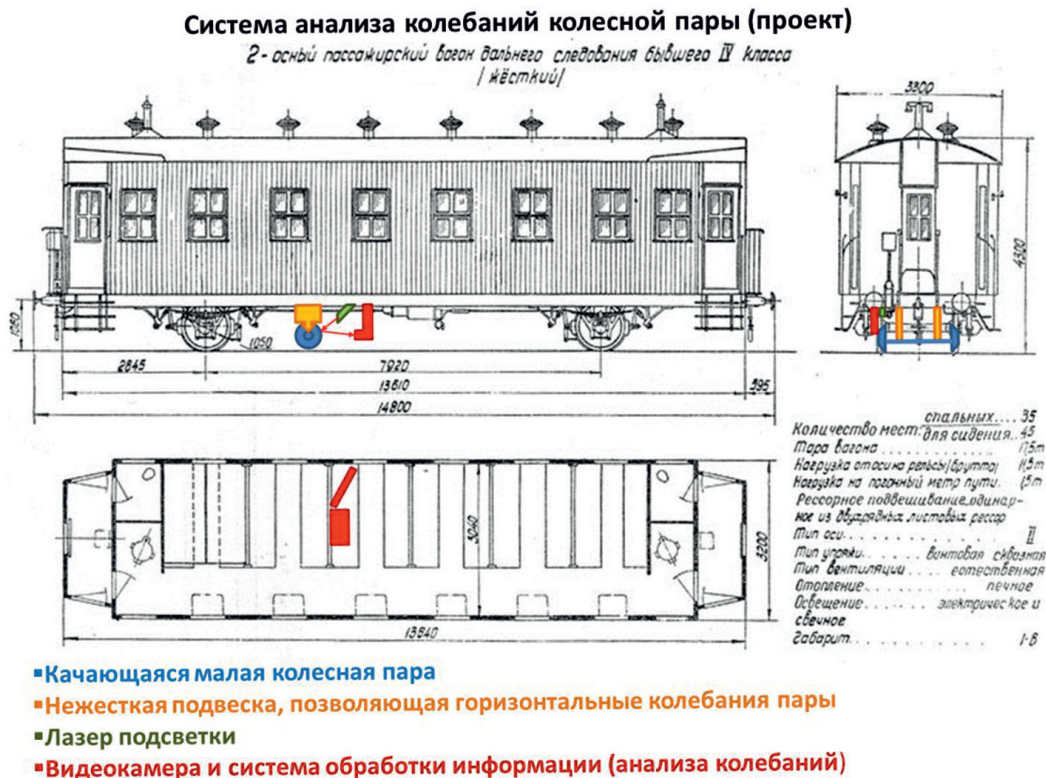
График поперечных колебаний колесной пары. Съемка 8441 30.08.2016



График поперечных колебаний колесной пары. Съемка 8448 30.08.2016



График поперечных колебаний колесной пары. Съемка 8450 30.08.2016



Принципиальная схема «Системы анализа колебаний колесной пары» на контрольном вагоне

Выводы

1) колесная пара, выведенная из равновесного движения по рельсам (путем смещения поперек рельсов), стремится вернуться к равновесному движению уже без смещения, осуществляя затухающие поперечные колебания;

2) непараллельность рельсового полотна и некачественные рельсовые стыки отчетливо просматриваются на графиках, как дополнительные возмущения;

3) конструкция стенда может быть использована, как модель измерительного прибора для контроля параллельности железнодорожного полотна.

Работа 25.02.2016 отмечена благодарственным письмом начальника Департамента управления персоналом ОАО РЖД.

Список литературы

1. Ричард Фейнман. «Поезда» <https://www.youtube.com/watch?v=aCleXNqFC2g>.
2. Федор Онуфриев «Как поворачивает поезд» <https://www.youtube.com/watch?v=OL17Qyz64ss>.
3. Иллюстрация http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/1558310/Äquivalente_Konizität.
4. Иллюстрация <https://image.jimcdn.com/app/cms/image/transf/dimension=490x1000:format=jpg/path/s8dee6b112bbeb6d0/image/i9fb108512a3b6c38/version/1385494801/%D0%B3%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%B0%D1%8F-%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D1%87%D0%B0.jpg>.
5. Иллюстрация http://img-fotki.yandex.ru/get/9668/109183592.1b/0_ba4c5_901370f4_XL.jpg.
6. Камера CANON EOS 550D. Руководство по эксплуатации.