УДК 629.4.028.086

В.И. Сакало, Е.С. Евтух, Д.Г. Агапов

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ**

**В СИСТЕМЕ «КОЛЕСО-ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ»**

Описана разработанная лабораторная установка для исследования колебаний в системе «колесо-железнодорожный путь». С её использованием определены жесткость балластного слоя и коэффициент гашения колебаний. Идентификация коэффициента гашения колебаний проведена путем сопоставления осциллограмм колебаний, полученных экспериментальным способом и с помощью компьютерной модели установки.

Ключевые слова: балластный слой, упругодиссипативные характеристики, жесткость, коэффициент гашения колебаний, компьютерная модель, идентификация параметров.

При наезде колеса на рельсовый стык наблюдается удар, сопровождаемый колебательными процессами, в которые вовлечены как элементы вагона, так и элементы пути. Процесс колебаний описывается дифференциальными уравнениями, в которые входят величины, представляющие вагон и путь.

В твердотельной модели вагон представляется массами, моментами инерции масс колесных пар, рам тележек, кузова и характеристиками связей между ними. Ряд этих величин количественно определен, а идентификация значений остальных представляет собой не столь сложную задачу, как задача идентификации параметров пути.

Сложность идентификации параметров пути обусловлена тем, что рельс представляет собой балку с распределенной по её длине массой, которая через металлические и резиновые прокладки опирается на шпалы, лежащие на упругом основании. В связи с трудностью представления рельса в виде балки с распределенной по длине массой в расчетах динамики он моделируется твердотельными стержнями, соединенными между собой упругодиссипативными связями.

Значительные трудности возникают с моделированием подрельсового основания. Одна из наиболее сложных задач – определение упругодиссипативных свойств балластного слоя. Эта сложность связана с тем, что он представляет собой сыпучую среду, для которой может быть применена модель с сухим трением. Однако использование такой модели в расчетах неудобно, поэтому ее заменяют моделью среды с вязким трением, и тогда возникает необходимость определения коэффициента вязкого трения таким образом, чтобы эта модель обеспечивала эквивалентное рассеяние энергии в балластном слое.

В статье приведены результаты идентификации характеристик жесткости и коэффициента вязкого трения балластного слоя, полученные с использованием разработанной лабораторной установки.

**Лабораторная установка для исследования процесса колебаний в системе «колесо-железнодорожный путь».** Для идентификации характеристик подрельсового основания разработана и использована лабораторная установка, позволяющая проводить экспериментальные исследования процессов колебаний на частотах порядка 15 Гц. Ссылаясь на результаты исследований [1;2], можно полагать, что полученные с ее применением результаты будут справедливы в диапазоне до 100 Гц. Схема установки приведена на рис.1.

Для моделирования подрельсового основания использована цилиндрическая оболочка 1. Она установлена на древесностружечную плиту 2, расположенную на металлической плите 3 с Т-образными пазами. Внутрь оболочки засыпан слой песка 4 и щебня 5. Нагрузка на балластный слой передается через пакет стальных и резиновых прокладок 6, пуансон 7 и валик 8. Усилие на валик прикладывается с помощью рычага 9. Рычаг шарнирно крепится к тяге 10. Тяга на одном конце имеет проушину 11, посредством которой она крепится к рычагу, а на другом ­ - пластину 12, которая заходит в Т-образный паз плиты 3. Плечи рычага подобраны таким образом, что усилие, передаваемое на комплект прокладок, в 10 раз больше веса грузов, подвешенных к другому концу рычага. К этому концу рычага подвешивается рамка 13, на нижнюю пластину которой установлена пружина 14. Нагрузка на пружину создается за счет веса грузов 15, которые укладываются на верхнюю подвеску 16. Пружина имеет жесткость *Сп*=2,5∙104Н/м, так что ее осадка под весом грузов 500 Н составляет 20 мм. В отверстие нижней цилиндрической части верхней подвески заходит стержень нижней подвески с кольцевой выточкой, который стопорится с помощью болта. На нижнюю подвеску укладываются грузы 17 общим весом 250 Н.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.1.Схема установки |

При разработке схемы установки преследовалась цель обеспечить определение жесткости балластного слоя и балластного слоя вместе с комплектом прокладок, а также коэффициента демпфирования балластного слоя. Последняя цель достигается путем записи свободных колебаний массы грузов 15 на пружине 14. За счет применения рычага создается усилие, равное 5 кН, действующее непосредственно на балластный слой или через комплект прокладок. Для определения упругих и диссипативных свойств одного балластного слоя испытания проводятся без комплекта прокладок. При этом пуансон 7 опирается прямо на слой балласта. Площадь опорной поверхности пуансона подобрана так, чтобы удельное давление было таким же, как от шпалы на балластный слой.

Установка позволяет получить колебания массы грузов 15 на пружине с достаточно большой амплитудой, что облегчает запись осциллограммы с применением простейшей аппаратуры. Свободные колебания инициируются в системе следующим образом. На подвески укладываются грузы 15 и 17, нижняя подвеска при этом фиксируется от выпадения болтом. Прогиб пружины составляет 30 мм. Затем болт отворачивается, грузы 17 с нижней подвеской падают вниз, а грузы 15 совершают свободные затухающие колебания относительно положения равновесия, соответствующего статическому прогибу пружины под их весом.

Для записи колебаний используется устройство, состоящее из электродвигателя с редуктором 18, барабана 19, закрепленных на стойке 20, и пера 21. Барабан ступицей насажен на ось редуктора. На барабане закрепляется бумажная лента. Перо, прикрепленное к нижней чашке подвески 16, прижимается к бумажной ленте с помощью пружины. При проведении испытаний включается электродвигатель 18, который вращает барабан со скоростью 8,76 об/мин.

**Компьютерная модель лабораторной установки.** Динамическая модель лабораторной установки показана на рис.2. Балластный слой представлен упругой связью с жесткостью *Сб* и демпфером вязкого трения с коэффициентом гашения *β*. Грузы 15 представлены массой *m*, подвешенной к рычагу 9 на упругой связи жесткостью *Сп*. Рычаг рассматривается как упругий элемент (упругая балка) с жесткостью *EJ1* на участке длиной *d* и жесткостью *EJ2* на участках длинами *a* и *b.* Тяга 10 также рассматривается как упругий элемент. В качестве обобщенных координат приняты перемещения *y1* массы *m* и *y2* точки *В* опирания пуансона на балластный слой. В этой схеме не рассматривался комплект прокладок. Положение рычага при подвешивании к нему грузов 15 массой *m* представлено на рисунке кривой А1В1D1. Точки B и D при этом получают статические перемещения *y1ст* и *y2ст*. Линией А2В2D2 показано положение рычага для момента, когда система находится в состоянии свободных колебаний.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 2. Динамическая модель лабораторной установки |

На массу *m* действует сила, возникающая в упругой связи, *Спр(y1-ky2)*, где *k* – передаточное отношение рычага; *Спр* - приведенная жесткость, учитывающая жесткость пружины *Сп*, рычага и тяги *Ср*, и сила инерции

В точке В приложена реакция балластного слоя, равная сумме сил *Сбy2*, возникающей в упругой связи, и - в демпфере.

Свободные колебания массы *m* представляются дифференциальными уравнениями:

Второе уравнение выражает условие равенства реакции балластного слоя силе, передающейся на него от рычага.

Величины, входящие в дифференциальные уравнения (1), имеют следующие значения: передаточное отношение рычага *k*=10; жесткость пружины *Сп*=2,5∙104 Н/м; жесткость, обусловленная упругими свойствами рычага 9 и тяги 10, *Ср*=4,68∙104 Н/м; приведенная жесткость рычага и пружины

Решив уравнения (1) относительно *у1*, получим

Характеристическое уравнение для уравнения (2) имеет вид

где

Для определения жесткости балласта замерены перемещения точки подвеса D в зависимости от веса грузов. Их значения приведены в таблице.

Таблица

Зависимость осадки балласта от приложенной силы, кН

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Показатель | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7,5 |
| Перемещение точки подвеса, мм | 8 | 16 | 24 | 32 | 40,2 | 47,8 | 57,2 | 61,5 |
| Осадка щебня, мм | 0,118 | 0,373 | 0,56 | 0,75 | 0,952 | 1,1 | 1,42 | 1,55 |

Получена практически линейная зависимость осадки балласта от приложенной силы.

Статическое перемещение точки подвеса

Подставив в эту зависимость значения величин *mg*=500 Н и Δ*ст*=40,2 мм, получим жесткость балластного слоя *Сб*=5,25∙106 Н/м.

**Идентификация параметров гашения колебаний в системе «колесо-железнодорожный путь».** С помощью разработанной лабораторной установки исследованы свободные колебания массы m, подвешенной к рычагу 9 через пружину 14 (рис.1). Испытания проведены без использования резиновых и металлических прокладок. В качестве колеблющейся массы использовались грузы 15. Начальные условия создавались путем отклонения их от положения равновесия. Снизу к ним подвешивалась нижняя подвеска с грузами 17. Получено отклонение от положения равновесия *у01*=18 мм.

Подвеска 16 освобождалась от грузов 17, и грузы 15 совершали свободные затухающие колебания. Осциллограмма колебаний записывалась на бумажной ленте, закрепленной на барабане 19. Она приведена на рис.3а. На ней представлены ярко выраженные затухающие колебания. До того как система пришла в состояние покоя, она совершила 14 колебаний.

В качестве расчетных взяты 10 полных колебаний. Времени десяти колебаний на осциллограмме соответствует отрезок длиной *L*=192 мм по оси абсцисс. Время десяти колебаний

где *n*=8,76 об/мин – скорость вращения барабана; *R*=50 мм – радиус барабана.

Тогда частота колебаний

а круговая частота

Параметр гашения колебаний в балластном слое определен путем подбора. Уравнение (2) решалось методом Рунге-Кутта с использованием стандартных программ Mathcad. В качестве начальных задавались условия:

Параметр *β* варьировался таким образом, чтобы получить осциллограмму колебаний, близкую к экспериментальной. Наилучшее приближение достигнуто при *β*=14∙104 Н∙с/м. Осциллограмма приведена на рис. 3б. Из решения характеристического уравнения (3) получена частота свободных колебаний *k*=15,99 рад/с. Как и в эксперименте, до перехода в положение равновесия система совершила 14 полных колебаний.

|  |
| --- |
| а) |
| б) |
| Рис. 3. Осциллограммы колебаний грузов:  а - эксперимент; б - теоретическое решение |

С использованием разработанной установки получено значение коэффициента жесткости балластного слоя 5,25∙106 Н/м. Давление на балласт передавалось через прямоугольную пластину эффективной площадью 0,024 м2. Так как здесь рассматривается вертикальная жесткость, связывающая приложенную к половине шпалы силу и осадку балласта, она должна быть пропорциональна площади опирания на балластный слой. Эффективная площадь опирания шпалы составляет 0,3 м2. Тогда жесткость балластного слоя, обусловленная опиранием на него половины шпалы, составляет 65,6∙106 Н/м. В работе [3] для этой величины приводится значение 50∙106 Н/м.

Получено значение коэффициента гашения колебаний 14∙104 Н∙с/м. В работе [4] приводится значение коэффициента затухания 6∙104Н∙с/м. Полученное с использованием лабораторной установки значение коэффициента гашения колебаний превышает значение, приведенное в работе Когана [4], но не противоречит результатам, приведенным в работе [3]. Завышенные значения коэффициентов жесткости балластного слоя и гашения колебаний, полученные в результате экспериментальных исследований на лабораторной установке, могут быть связаны с тем, что балластный слой располагался в замкнутом объеме в жесткой цилиндрической оболочке.

**Определение жесткости комплекта подрельсовых прокладок.** Определена жесткость комплекта прокладок натурного узла соединения рельса со шпалой. Испытания его на сжатие проведены с использованием машины Р-20. Схема комплекта показана на рис.4. Комплект укладывался на стальную плиту 1 толщиной 30 мм, расположенную на траверсе испытательной машины. В комплект входили детали натурного узла соединения рельса со шпалой. На плиту укладывалась резиновая прокладка 2, металлическая накладка 3, резиновая прокладка 4, стальная пластина 5 толщиной 12 мм. Нагрузка на пластину 5 передавалась через нажимную плиту машины диаметром 150 мм.

|  |
| --- |
| поддон 1 |
| Рис.4. Схема комплекта прокладок натурного узла соединения рельса со шпалой |

Испытания проведены с настройкой машины на максимальное сжимающее усилие 200 кН. Полученная диаграмма сжатия комплекта представлена на рис.5. Она аппроксимирована степенной зависимостью

где *Р* – усилие, Н; *w* – осадка комплекта, м.

Для определения жесткости комплекта прокладок связь между силой и осадкой представлена в виде

Тогда жесткость равна производной от силы по осадке:

При нагрузке на комплект *Р*=100 кН осадка равна 5,2∙10-3 м, а жесткость *Спк*=5,81∙107Н/м.

|  |
| --- |
| Рисунок1 |
| Рис. 5. Диаграмма сжатия комплекта прокладок промежуточного рельсового скрепления |

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Определена жесткость балластного слоя, которая в пересчете для условий опирания половины шпалы на балласт составила 65,6∙106 Н/м. Это значение попадает в диапазон 40…80∙106 Н/м, приведенный в литературных источниках для различных состояний балластного слоя.

1. Получено значение коэффициента гашения колебаний 14∙104Н∙с/м. Оно превышает значения, приведенные в работе [4], но не противоречит результатам, приведенным в работе [3]. Завышенное значение коэффициента гашения может быть обусловлено тем, что балластный слой находился в ограниченном объеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Knothe, K. Modelling of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies / K. Knothe, S.L. Grassie // Vehicle System Dynamics. – 1993. – V. 22. – Р. 209-262.

2. Ripke, B. Die unendlichlange Schiene auf diskreten Schwellenbei harmonischer Einzellasterregung / B.Ripke, K.Knothe. - Dusseldorf : VDI-Verl., 1991. ­- 54 р.

3. Вериго, М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М.Ф. Вериго, А.Я.Коган. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.

4. Коган, А.Я. Расчет напряженно-деформированного состояния элементов конструкции пути в зоне стыка рельсов / А.Я. Коган, Ю.Л. Пейч // Вестник ВНИИЖТ. – 2000. – № 2. – С. 31-39.

Материал поступил в редколлегию 25.10.13.