

МОЛОКОВА Н.В., старший преподаватель (Сибирский государственный университет путей сообщения)

ПРОВОРНАЯ Д.А., преподаватель (Сибирский государственный университет путей сообщения)

Сопряжение моста с насыпью

PROVORNAYA D. A., Senior Lecturer (STU)

MOLOKOVA N. V., Senior Lecturer (STU)

Bridge to embankment

Введение

Сопряжение моста с насыпью должно обеспечивать плавность съезда и въезда автомобиля на мост на весь период эксплуатации дороги. Для плавного въезда автомобиля на мост при устройстве сопряжения его с насыпью необходимо:

а) обеспечить надлежащую плотность грунтов земляного полотна по всей его высоте;

б) создать надежный отвод поверхностных вод с покрытия и из тела насыпи с применением дренающей засыпки за опорами и в конусах, дренажных слоев под покрытием с устройством бортовых лотков и противофильтрационной защиты покрытия и обочин в пределах сопряжения;

в) выдержать земляное полотно до устройства постоянного покрытия не менее года, в течение которого происходят основные осадки тела и основания насыпи;

г) уложить переходные плиты длиной, достаточной для перекрытия зоны образования местных просадок и для обеспечения плавного сопряжения проезжей части моста с дорожным покрытием.

д) обеспечить устойчивость с применением динамических гасителей колебаний.

Нелинейные пассивные изоляторы с характеристиками высокой статической и низкой динамической жесткости, обычно достигаемые за счет комбинации пружины положительной жесткости и пружины отрицательной жесткости, привлекли большое внимание в последние двадцать лет из-за их превосходных характеристик по сравнению с линейными виброизоляторами [1–4]. Отрицательная жесткость играет важную роль в системе жесткости с высокой статической и низкой динамической жесткостью и может быть достигнута несколькими способами. Однако большинство из них являются пассивными механизмами, отрицательная жесткость которых не регулируется. Например, в исследовательских работах [5, 6] распространенным способом получения отрицательной жесткости является использование двух наклонных механических винтовых пружин. С помощью этих двух предварительно сжатых цилиндрических пружин можно получить отрицательную жесткость в вертикальном направлении, но ее нельзя

отрегулировать, поскольку нет механизма регулировки. Аналогичное устройство отрицательной жесткости, реализованное с использованием механической винтовой пружины, было представлено Meng et al. [7]. Кроме того, другим способом достижения отрицательной жесткости является использование явления потери устойчивости конструкции. В статье Платуса [8] жесткость балки, подверженной осевой нагрузке, имела отрицательную характеристику. Аналогичным образом исследования в [9, 10] показали, что механизм отрицательной жесткости может быть спроектирован с использованием сжатых балок Эйлера. Впечатляющий метод реализации отрицательной жесткости с помощью механизма кулачок-ролик-пружина можно найти в [11, 12]. Кроме того, постоянные магниты также могут использоваться для получения отрицательной жесткости. Механизм отрицательной жесткости, представленный в [13], был реализован с помощью трех постоянных магнитов, расположенных в притягивающей конфигурации. Кроме того, еще два типа механизма отрицательной жесткости, создаваемого постоянными магнитами, можно найти в [14, 15]. В статье, представленной Meng et al. [16] была предложена пружина с отрицательной жесткостью с использованием тарельчатых пружин, силовая характеристика которых в вертикальном направлении была аналогична механизму с двумя наклонными пружинами. Многие другие типы пассивных нелинейных изоляторов подробно обсуждались и сравнивались Ибрагимом в его обзорной статье [17].

Анализ последних исследований и публикаций

В литературе принято считать, что проблема неровностей вызвана дифференциальной осадкой между переходной плитой и пролетным строением моста или опорой (Ha et 2002), (Cai 2005), (Abu-Farsakh и Chen 2014), (Ng 2014). Стандартные расчеты устойчивости железнодорожной насыпи учитывают только вертикальный удар подвижного состава, веса железнодорожного пути и земли. Такой подход оправдан, поскольку стандарт PN-EN 1991-2: 2007 [1] для земляных работ железных дорог определяет только вертикальные нагрузки. Также технические спецификации для интероперабельности (TSI) [2] для железных дорог земляные работы указывают только на необходимость учета вертикальных нагрузок.

Цель работы

Если железнодорожный путь искривлен, центробежная сила действует на насыпь, когда проходит поезд. Сила ветра, действующая поперечно на подвижной состав, перенесена на набережную. Кроме того, тепловые силы в изогнутых рельсах создают боковое давление на балласт, а значит, и на насыпь. Вышеупомянутые горизонтальные удары могут существенно повлиять на устойчивость железнодорожной насыпи.

Развитие новых технологических процессов потребовало высокой точности как при изготовлении оборудования, так и при его эксплуатации. Исследования в области наноструктур ведутся на микроскопах с разрешением $2...10^{\circ}$ А , а современные

лабораторные эксперименты уже сравнимы с фундаментальными исследованиями 50-ых годов. При этом надо отмечать, что исследовательские центры расположены в черте города, имеющей свой собственный уровень низкочастотных колебаний. На предприятиях, выпускающих высокоточное оборудование, уровень колебаний выше в силу наличия большого количества виброактивного оборудования. Цель работы заключается в анализе влияния этих воздействий на устойчивость железной дороги с помощью применения ДГК.

Основная часть

Выбор параметров динамического гасителя продольных колебаний осуществлялся на основе результатов анализа устойчивости ДГК. При выполнении этого анализа использовалась усовершенствованная линейная математическая модель низкочастотная ($f_{\max} \leq 50$ Гц). Указанная особенность усовершенствованной математической модели обеспечивает возможность оперативно выполнять анализ влияния параметров ДГК на устойчивость. При построении этой модели использовался подход к математическому моделированию динамического взаимодействия, предложенный в работе [11]. Анализ устойчивости насыпи выполнялся в соответствии с концепцией Ляпунова об устойчивости по I-му приближению и основывался на решении алгебраической проблемы собственных значений [11, 12]. Параметры собственных колебаний указанных систем определялись в результате расчета их комплексных частот колебаний, то есть собственных значений $\{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$:

$$\lambda = -\alpha + j \cdot 2\pi \cdot f = (-\delta + j \cdot 2\pi) f, \quad (1)$$

где i_f – i -я собственная частота затухающих (или нарастающих) колебаний системы; α_i и $\delta = \alpha / f$ – коэффициенты затухания (при $\alpha_i > 0$, $\delta > 0$) и или нарастания (при $\alpha_i < 0$, $\delta < 0$) i колебаний с частотой i_f .

Отметим, что показатель затухания i_δ , использовавшийся в настоящей работе при анализе устойчивости, по форме представления аналогичен логарифмическому декременту колебаний одночастотной системы. Эффективность ДГК оценивалась его способностью сократить протяженность интервалов и уменьшить по модулю отрицательные значения коэффициентов i_δ (то есть уменьшить показатели нарастания колебаний в этих интервалах). Уменьшение указанных величин трактовалось как «смягчение» неустойчивости линейной системы насыпи с ДГК. Такая трактовка вполне обоснована, поскольку уменьшение периода существования нарастающих собственных колебаний линейной динамической системы ведет к уменьшению амплитуд колебаний соответствующей нелинейной системы [13]. При этом необходимо подчеркнуть, что окончательное заключение об эффективности ДГК можно сделать только на основе результатов расчета амплитуд колебаний нелинейной динамической системы.

Обычно в математической модели динамического взаимодействия насыпи с ДГК описание упругих продольных колебаний корпуса сводится к традиционному учету нескольких изолированных тонов его собственных

колебаний [1-7]. При этом значения параметров собственных колебаний в результате решения отдельной задачи, и вводятся в указанную модель в качестве коэффициентов уравнений. Любое изменение значений физических параметров элементов ДГК приводит к необходимости снова решать задачу определения параметров собственных колебаний насыпи, вводить в математическую модель их новые значения. Это усложняет выполнение сравнительного анализа эффективности различных ДГК и повышает трудоемкость их выбора.

Дифференциальные уравнения движения основной массы виброгасителя, составленные из условия уравнивания возмущающей восстанавливающей силы, а также инерционными силами, с учетом сделанного замечания, запишутся в виде:

$$\begin{aligned} M\ddot{q} + (1 + i\gamma_q)Kq - (1 + i\gamma_Z)k(z - q) = \\ = Pe^{i\omega t}mz + (1 + i\gamma_q)\ddot{k}(z - q) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Найдём в общем случае, то есть при учете поглощения энергии, как в основной системе, так и в гасителе, решение системы уравнений 2. Будем считать, что свободные колебания системы, возникающие в начальный момент времени, быстро затухают, то есть будем искать установившиеся колебания. Частные интегралы системы уравнений, описывающих установившиеся колебания имеют вид:

$$q = \tilde{O}e^{i\omega t}, z = \tilde{Z}e^{i\omega t}. \quad (3)$$

На основании формул комплексная амплитуда смещения гасителя относительно основной конструкции:

$$\frac{\tilde{Z} - \tilde{Q}}{Q_{CT}} = \frac{g^2}{\Delta}. \quad (4)$$

Колебания основной массы могут возбуждаться также инерционной возмущающей силой, амплитудное значение которой пропорционально квадрату ее частоты. В этом случае:

$$P = m_r r \omega^2, \quad (5)$$

где m_r – неуровновешенная масса;
 r – эксцентриситет этой массы.

При инерционном возбуждении колебаний основной конструкций выражение для статической деформации под действием амплитудного значения возмущающей силы принимает несколько иной вид:

$$Q_{CT} = \frac{m_r r \omega^2}{K} = \frac{m_r r}{M} g^2 = Q_r g^2 \quad (6)$$

В рассматриваемом случае реакция гасителя полностью уравнивает приложенную к основной конструкции возмущающую силу. Свойство динамического гасителя снижать амплитуду колебаний основной конструкции при частоте возмущающей силы, близкой к собственной частоте гасителя, используется для уменьшения колебаний установок и конструкций в том случае, когда частота возмущающей силы изменяется в строго ограниченных, весьма узких пределах.

Частоты свободных колебаний системы будем определить предположение, что внутреннее сопротивление отсутствует, дифференциальные уравнения рассматриваемой системы могут быть получены, если входящие в них

значения возмущающих силы коэффициента внутреннего сопротивления предположить равными нулю.

Методы оценки общей устойчивости земляных работ можно разделить на следующие:

- анализ предельного равновесия;
- анализ предельных напряжений;
- анализ снижения прочности на сдвиг;
- эмпирические методы.

Согласно Еврокоду [4], первый метод считается основным, а второй и третий методы являются альтернативными, а эмпирические методы отражены в правилах использования сопоставимого опыта.

Был использован метод снижения прочности на сдвиг для исследования. В этом методе устойчивость земной конструкции анализируется на основе напряженного и деформированного состояния почвы. Во время расчета прочность грунта на сдвиг снижается за счет уменьшения прочностных параметров грунта. Центробежные силы составляют большую долю в сумме всех горизонтальных сил в нагрузке.

Ветровая нагрузка на подвижной состав достигает значительных значений. Это связано с неблагоприятным соотношением поперечных размеров подвижного состава.

Тепловые силы оказывают наименьшее влияние (по сравнению с другими горизонтальными силами) на работу устойчивости железнодорожной насыпи. Однако в предельном состоянии давление со стороны этих сил могло иметь решающее влияние на разрушение.

Выводы

В этой статье в основном описывается новый подход к достижению переменной отрицательной жесткости. Результаты подтверждают отрицательную жесткость, что теоретические резонансные частоты, рассчитанные по полученному уравнению электромагнитной силы, очень хорошо сравниваются с экспериментальными резонансными частотами. При токе 0,6 А резонансная частота изолятора снижается с 23,25 Гц до 20,25 Гц, а амплитуда ускорения изолятора уменьшается с $30,341 \text{ м/с}^2$ до $3,495 \text{ м/с}^2$ на частоте 23 Гц. Это указывает на то, что отрицательная жесткость, обеспечиваемая EATS, полезна для виброизоляции.

Однако следует отметить, что есть еще несколько аспектов, требующих дальнейшего изучения. Прежде всего, следует изучить некоторые другие методы поддержания концентричности активной ячейки и статора для уменьшения коэффициента демпфирования. Например, линейный подшипник можно заменить скользящей втулкой из политетрафторэтилена. Более того, параметры зубьев EATS должны быть дополнительно изучены для достижения более широкой области отрицательной жесткости и меньшей нелинейности. И последнее, но не менее важное: изоляционные характеристики изолятора в ситуации большого смещения должны быть исследованы, потому что текущая область отрицательной жесткости немного мала для практического применения. Когда смещение активной ячейки превышает 2 мм, жесткость становится

положительной. Влияние кусочной жесткости на динамический отклик может быть дополнительно изучено для решения такой проблемы.

На основании проведенного исследования можно сделать выводы о влиянии анализируемых горизонтальных воздействий на устойчивость откоса. Вертикальные транспортные нагрузки по отношению к общему весу насыпи относительно невелики. При увеличении высоты насыпи, доля напряжений от транспортных нагрузок уменьшается. Вертикальные транспортные нагрузки оказывают значительное влияние на снижение значений безопасности.

Список литературы:

1. Xia H. Analysis of resonance mechanism and conditions of train-bridge system / Xia, H., Zhang, N., & Guo, W. W.. Journal of Sound and Vibration, 297(3):810-822. (2006).
2. Gupta A. Dynamic Analysis of Railway Bridges under High Speed Trains / Gupta, A., & Ahuja, A. S. Universal Journal of Mechanical Engineering, 2(6): 199-204. (2014).
3. Yang Y.B. Vehicle-bridge interaction dynamics and potential applications / Yang, Y. B., & Lin, C. W. Journal of sound and vibration, 284(1): 205-226. (2005).
4. ГОСТ Р 52892-2007 «Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на

конструкцию» / Введ. 2008-10- 01. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2008.

5. Патент РФ № 2136809 Сопряжение моста с насыпью / А.Д.Соколов, Беда В.И., Егорушкин Ю.М., Кондаков Е.И., Ким А.И., Солодунин А.Н.; публикация патента: 10.09.1999.

6. Henri C. Vidal. Patent bridge abutment EP 0113543 B1; Date of publication: 7 March 1990.

7. Structural Engineering International 2/2011; Parametric Study and Length Limitations for Prestressed Concrete Girder Integral Abutment Bridges.

Аннотации:

В статье рассмотрена проблема сопряжения моста с насыпью. Проблема неровности на сопряжении – отсутствие комфорта езды на сопряжении. Рассмотрена литература по этому вопросу, решения и предложения по устранению неровностей стыка. Проведение исследование методов устойчивости насыпи на стыке и сделаны выводы.

Ключевые слова: насыпь, устойчивость, расчет, мост, сопряжение.

The article deals with the problem of connecting a bridge with an embankment. The problem of unevenness at mating is the lack of ride comfort at mating. The literature on this issue, solutions and proposals for eliminating joint irregularities are considered. Research of methods of embankment stability at the junction and conclusions are drawn.

Keywords: embankment, stability, calculation, bridge, interface.