

Анализ основных характеристик колебательных процессов дорожных конструкций при динамических испытаниях

Analysis of the main characteristics of vibration processes of road structures during dynamic tests

Саксонова Е.С.

старший преподаватель кафедры «Геотехника и дорожное строительство»
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза
e-mail: saksonovalena@ya.ru

Saksonova E.S.

Senior Lecturer, Department of Geotechnics and Road Construction, Penza State
University of Architecture and Construction, Penza
e-mail: saksonovalena@ya.ru

Бажанов А.П.

д-р техн. наук, профессор кафедры «Геотехника и дорожное строительство»
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза
e-mail: bajan_p@mail.ru

Vazhanov A. P.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department "Geotechnics and Road
Construction", Penza State University of Architecture and Construction, Penza
e-mail: bajan_p@mail.ru

Аннотация

Важнейшей задачей, стоящей сегодня перед дорожным хозяйством РФ, является реальное повышение сроков службы нежестких дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием до 24 лет. Автомобильные дороги с такими дорожными одеждами образуют основу дорожной сети России и составляют до 80% протяженности федеральных дорог и до 70% – региональных. Поэтому актуальным является повышение сроков службы, в первую очередь, именно нежестких дорожных одежд с асфальтобетонными покрытиями, подверженными преждевременному разрушению их дорожных конструкций.

Ключевые слова: автомобильные дороги, дорожная одежда, прочность, виброн нагруженность, надежность.

Abstract

The most important task facing the road economy of the Russian Federation today is a real increase in the service life of non-rigid road coverings with asphalt concrete pavement up to 24 years. Highways with such roadways form the basis of the Russian road network and account for up to 80% of the length of Federal roads and up to 70% of regional roads. Therefore, it is important to increase the service life of first of all non-rigid road coverings with asphalt concrete coverings that are subject to premature destruction of their road structures.

Keywords: highways, road clothing, strength, vibration load, reliability.

При проектировании нежестких дорожных одежд в соответствии с действующими нормативными документами [1], учитывается целый комплекс факторов снижения сроков их службы, обусловленных длительным воздействием на дорожные одежды постоянных во времени статистических нагрузок и процессов усталостного разрушения их материалов [2].

Однако, при расчете дорожных конструкций в число факторов воздействия на дорожную одежду не включается ее вибронагруженность, т.е. процесс возникновения свободных затухающих колебаний слоев дорожных одежд, развивающийся из-за ударно-импульсного воздействия движущихся по ним транспортных средств, при котором формируются их дополнительные динамические прогибы. Отсутствие при проектировании учета вибронагруженности нежестких дорожных одежд приводит к тому, что они изначально не обеспечиваются необходимыми прочностными свойствами [3].

В настоящее время изучением динамических свойств дорожных конструкций занимаются научно-исследовательские коллективы, в задачу которых входит определение с необходимой степенью точности их основных характеристик, таких как собственные частоты, собственные формы и соответствующие им коэффициенты демпфирования упругих колебаний данных конструкций. Определение этих характеристик является наиболее трудным этапом динамических исследований, требующим для каждого нового типа дорожных конструкций проведения обширных работ как теоретического, так и экспериментального характера.

Анализ натуральных исследований процессов деформирования нежестких дорожных одежд в процессе воздействия на них транспортных средств позволил установить в дорожных одеждах характерные участки возникновения вибраций в виде их свободных затухающих колебаний с характерными для этих участков амплитудно-временными характеристиками. При этом, уровень данных колебаний оказался во многом зависимым от дефектов дорожного покрытия, которое, в свою очередь, оказалось причиной роста динамической нагрузки со стороны движущихся транспортных средств с одновременным увеличением вибрации дорожных одежд [5].

Таким образом, колебания всех слоев дорожных конструкций, включающих массу дорожной одежды и грунта земляного полотна, приходят в движение. Учитывая упругие свойства данных слоев дорожной одежды и земляного грунта, эти движения преобразовываются в колебательные, поэтому в процессе ударно-импульсного нагружения дорожной конструкции фиксируются их амплитудно-временные характеристики.

Выполнение исследований по установлению (на основании расчетов и материалов наблюдения) прямых связей между уровнем вибрационного нагружения конструкций дорожной одежды и темпов их разрушения на исследуемых участках автомобильных дорог связано с решением сложных технических задач и большими материальными затратами для успешного решения этих. Поэтому, выполнение исследований вынужденных колебаний дорожных конструкций при их периодических возмущениях требует дальнейшего совершенствования и экспериментального подтверждения.

В основе экспериментальных методов определения собственных частот, собственных форм и соответствующих им коэффициентов демпфирования лежат вибрационные исследования [6] реальных дорожных конструкций или их специальных конструктивно подобных макетов, представляющих собой почти точные уменьшенные копии этих объектов.

В настоящее время наметились два пути экспериментального определения основных динамических характеристик макетов дорожных конструкций: задание

испытываемым макетам конструкции вынужденных колебаний с применением испытательных вибростендов, имеющих в организациях дорожного хозяйства страны [7] и снятием их экспериментальных характеристик, а также задание тем или иным способом свободных колебаний, исследуемым макетам конструкции [8] и их анализ с целью оценки динамических характеристик реальных дорожных конструкций.

Испытания макетов конструкций методом создания свободных колебаний проводятся при исследовании простых объектов с малым демпфированием, к которым и относятся дорожные конструкции. Вынужденные колебания чаще всего используются при испытаниях макетов сложных конструкций со средним и сильным демпфированием.

На данном временном этапе для отработки их динамических характеристик на макетах дорожных конструкций наибольшее распространение получили резонансные методы с гармонической и квазигармонической формами задания вибрации (с непрерывным изменением частоты) [8]. По сравнению с другими эти методы характеризуются более простой аппаратной реализацией и более высоким быстродействием. При использовании данных методов искомые динамические характеристики дорожных конструкций могут быть получены путем анализа амплитудных, частотных и фазовых характеристик или резонансных кривых их макетов.

При моделировании колебаний на макетах дорожных конструкций следует учитывать, что каждый слой реальной дорожной конструкций представляет собой колебательную систему, обладающую собственной массой, жесткостью и силами трения, реализующими диссипацию данной конструкции [9]. При этом, с учетом требований ОДН 218.046-01, вычисление неизвестных величин колеблющихся масс слоев дорожных конструкций m_i и их коэффициентов жесткости k_i предполагается осуществлять с использованием следующих зависимостей [3]:

$$m_i = \rho_i V_i = \rho_i h_i F_{np} \quad (1),$$

где m_i – колеблющиеся массы слоев дорожной одежды, кг;

ρ_i – плотность i -го слоя, кг/м³;

V_i – приведенный объем i -го слоя, м³;

h_i – толщина i -го слоя, м;

F_{np} – приведенная площадь, м².

$$k_i = \frac{E_{ynpi} \cdot m_i}{F_{np} \cdot \rho_i} \quad (2),$$

где k_i – жесткость слоя дорожной одежды, кН/м;

E_{ynpi} – модуль упругости, МПа.

Фирмой AS Spacem Департамента Эстонской Республики проведен анализ амплитудно-частотного спектра вибронгруженности конструкции дорожной одежды участка автомобильной дороги М-13, который позволил установить следующие пиковые значения частот дорожной одежды [3]:

- низкие частоты 0,8 - 1,3 - 2,5 - 5,0 Гц;
- средние частоты 8,0 - 12,5 - 16,0 - 20,0 Гц;
- высокие частоты 31,5 - 50,0 Гц.

Сопоставление расчетно-теоретических значений масс и жесткости слоев на исследуемом участке автомобильной дороги и соответствующих им

теоретическим частотам исследуемой дорожной конструкции с полученными экспериментальными параметрами позволяет сделать вывод о том, что:

- частоты 0,8 - 1,3 - 1,6 Гц – это частоты свободных колебаний дорожной одежды;
- частота 2,5 Гц близка к парциальной частоте грунта земляного полотна;
- частота 5,0 Гц соответствует парциальной частоте слоя песка;
- частоты 12,5 – 16,0 Гц относятся к частотам фракционированного щебня и щебня, пропитанного битумом;
- частоты 31,5 – 50,0 Гц соответствуют слоям из плотного и пористого асфальтобетона.

Растущая конструктивно-технологическая сложность стадий проектирования, этапов строительства и содержания автомобильных дорог в совокупности с одновременным повышением их надежности требуют при реализации рассмотренных методов испытаний макетов дорожных конструкций в стендовых условиях применения специальных испытательных систем, позволяющих наряду с расширением задач измерительной техники, осуществлять автоматическое, программное управление режимами проводимых испытаний [10].

В этом отношении большими возможностями располагают системы управления динамическими испытаниями с полигармоническим силовозбуждением, имитирующим случайный процесс и сочетающим в себе достоинства резонансных методов и методов испытаний на случайную вибрацию [6]. Создание подобных систем обуславливает необходимость разработки их отдельных элементов и устройств, в том числе и средств селекции амплитудной и фазовой информации гармонических и квазигармонических исследуемых сигналов.

Аппаратура для селекции частотных компонент выходных сигналов исследуемых макетов дорожных конструкций должна обладать рядом специфических особенностей по сравнению с широко распространенной аппаратурой для исследования других различных систем и, в зависимости от требований, предъявляемых к ней, должна осуществлять: либо преобразование сигналов в цифровую форму, либо детектирование, либо нахождение коэффициентов передачи, а в общем случае – изображающих функций, либо, наконец, измерение или запись преобразованных величин в виде резонансных кривых или амплитудных и фазовых частотных характеристик. Однако оснащенность организаций дорожной отрасли автоматизированными средствами преобразования, регистрации информации и управления ходом эксперимента при динамических испытаниях макетов дорожных конструкций не отвечает современным требованиям.

В условиях дефицита сложной и дорогостоящей аппаратуры перед предприятиями дорожной отрасли ставится задача разработки устройств преобразования информации с целью дальнейшего использования ее для регистрации и управления режимами проводимых испытаний, обладающих рациональной структурой, а также разработка методов оценки их метрологических характеристик на основе вероятностно-статистического подхода.

Общие качественные понятия и представления характеристик дорожных конструкций можно проанализировать с помощью колебаний простейших моделей механических систем при их динамических исследованиях методом свободных и вынужденных колебаний [6]. В качестве таких простейших моделей следует начать рассмотрение линейной и нелинейной консервативных систем с колебаний пружинного или математического маятника (рис. 1) [10].

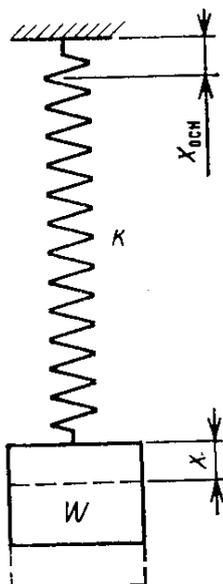


Рис. 1. Системы с колебаний пружинного или математического маятника

Механическая система колебаний пружинного или математического маятника базируется на смещении груза W , прикрепленного к концу легкой пружины с жесткостью k , вниз на расстояние x , пропорциональное длине растяжения пружины $x_{осн}$ относительно положения равновесия груза и возвращении его в исходное состояние.

На пружинный маятник в данной системе колебаний с учетом сил трения действуют упругая сила $F_{упр}$ и сила сопротивления $F_{сопр}$:

$$F_{упр} = -kx \quad (3),$$

где k – коэффициент жесткости пружины;
 x – смещение маятника от положения равновесия;
 $x_{осн}$ – длина растяжения пружины.

$$F_{сопр} = -rv \quad (4),$$

где r – сила сопротивления пружины;
 v – скорости движения груза.

Коэффициент сопротивления r в выражении (4) численно равен силе сопротивления, возникающей при единичной скорости движения тела:

$$r = \left| \frac{F_{сопр}}{v} \right| \quad (5).$$

В соответствии с положением второго закона Ньютона аналитическое выражение закона движения пружинного маятника может быть найдено из следующего выражения:

$$ma = -(kx + rv) \quad (6).$$

С учетом того, что

$$v = \frac{dx}{dt} \text{ и } a = \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

можно записать линейное дифференциальное уравнение второго порядка затухающих колебаний пружинного маятника в следующем виде:

$$\frac{d^2x}{d^2t} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (8),$$

где $\frac{r}{m} = 2\beta$;

β – коэффициент затухания;

$\frac{k}{m} = \omega_0^2$ – частота незатухающих свободных колебаний в отсутствие потерь

энергии в колебательной системе.

Решение дифференциального уравнения (8) представляется в виде уравнений затухающих колебаний:

$$x = Ae^{-\beta t} \cos(\omega_{зам}t + \alpha); x = Ae^{-\beta t} \sin(\omega_{зам}t + \alpha_1) \quad (9).$$

Для механической системы пружинного маятника имеем:

$$\omega_{зам} = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{r}{2m}\right)^2} \quad (10),$$

$$T_{зам} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{r}{2m}\right)^2}} \quad (11).$$

Амплитуда затухающих колебаний:

$$A_{зам} = Ae^{-\beta t} \quad (12)$$

для пружинного маятника $\beta = \frac{r}{2m}$.

Механические колебания представляют собой периодические или почти периодические изменения физической величины $x(t)$, описывающей механическое движение (координата, угол, скорость, ускорение, кинетическая и потенциальная энергии) [11].

$$x(t+T) = x(t) \text{ для любого момента времени } t.$$

Линейной частотой периодических колебаний f называется число колебаний в единицу времени:

$$f = \frac{1}{T} \quad (13),$$

где T – период колебаний (минимальная положительная величина).

Гармонические колебания – изменения во времени t физической величины $x(t)$ [12]

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0); A > 0; \omega_0 > 0 \quad (14),$$

где A – амплитуда колебаний;

$\varphi = (\omega_0 t + \varphi_0)$ – фаза колебаний;

φ_0 – начальная фаза колебаний;

ω_0 – циклическая (круговая) частота колебаний.

Частота колебаний ω_0 не зависит от способа возбуждения колебаний, определяется свойствами колебательной системы (изохронность). Значения амплитуды и начальной фазы определяются начальными условиями, т.е. способом возбуждения колебаний:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (15).$$

Значения амплитуды A и начальной фазы φ_0 определяются начальными условиями, т.е. способом возбуждения колебаний.

Кинематика гармонических колебаний материальной точки вдоль прямой характеризуется смещением (отклонением) ее от положения равновесия

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (16).$$

Проекция скорости ее скорости находится из выражения

$$v_x(t) = \dot{x} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = v_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}) \quad (17),$$

где $v_0 = A\omega_0$ – амплитудное значение скорости. Скорость точки опережает ее смещение по фазе на $\frac{\pi}{2}$.

Проекция ускорения точки

$$a_x(t) = \dot{v}_x(t) = \ddot{x} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = a_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \pi) = -\omega_0^2 x(t) \quad (18)$$

$a_0 = A\omega_0^2 = v_0\omega_0$ – амплитудное значение ускорения. Ускорение опережает смещение по фазе на π (в противофазе).

Добротность – параметр колебательной системы, определяющий ширину резонанса и характеризующий, во сколько раз запасы энергии в системе больше, чем потери энергии за один период колебаний. В общем виде для любой колебательной системы добротность вычисляется по следующей формуле

$$Q = \frac{2\pi f_0 W}{P_d} = \frac{2\pi W}{E_d} = P \frac{2\pi n A}{E_d} \quad (19),$$

где f_0 – резонансная частота;

W – запасённая энергия системы;

P_d – рассеиваемая мощность;

E_d – рассеиваемая энергия за один период колебаний;

A – работа, совершаемая внешней силой за один период колебаний;

n – количество колебаний, которое сделала система, прежде чем достигла максимальной амплитуды колебаний.

Из формулы (19) следует, что чем выше добротность колебательной системы, тем больше колебаний сделает система под действием внешней силы, прежде чем достигнет максимальной амплитуды.

Скорость затухания колебания характеризуется логарифмическим декрементом затухания колебательной системы – безразмерной физической величиной λ , описывающей уменьшение амплитуды колебательного процесса и равной натуральному логарифму отношения двух последовательных (или через некоторое целое количество периодов) амплитуд колеблющейся величины в одну и ту же сторону:

$$\lambda = \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} = \frac{1}{n} \ln \frac{x(t)}{x(t+nT)} = \beta T \quad (20).$$

Декремент затухания равен показателю экспоненты в законе затухающих колебаний:

$$y = A e^{-\beta T} \cos(\omega t) \quad (21).$$

Из декремента затухания можно рассчитать другую величину – коэффициент демпфирования по следующей формуле

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi^2 / \lambda^2}}; \quad \xi = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (22).$$

Для колебательных систем с вязким трением (сила сопротивления пропорциональная скорости движения) физической величиной, определяющей характер колебаний, является коэффициент демпфирования.

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (23),$$

где c – коэффициент силы сопротивления движению;

k – коэффициент упругости;

m – масса подвижного груза.

При коэффициенте демпфирования меньше единицы колебательная система будет плавно затухать. Чем меньше будет коэффициент, тем дольше будут длиться колебания. При коэффициенте равном единице или большем никаких колебаний система испытывать не будет, а просто плавно будет стремиться к нулевому положению.

Коэффициент демпфирования связан с добротностью следующей формулой:

$$Q = \frac{1}{2\xi} \quad (24).$$

Из формулы (24) следует, что чем больше добротность колебательной системы, тем меньше декремент затухания. Чем меньше декремент затухания, тем меньше теряется энергии с каждым колебанием и тем больше колебаний совершит система перед остановкой.

Затуханием колебаний называется постепенное уменьшение амплитуды колебаний с течением времени, обусловленное потерей энергии колебательной системой.

Собственные колебания без затухания – это идеализация. Причины затухания могут быть разные. В механической системе к затуханию колебаний приводит наличие трения. В электромагнитном контуре к уменьшению энергии колебаний приводят тепловые потери в проводниках, образующих систему. Когда израсходуется вся энергия, запасенная в колебательной системе, колебания прекратятся. Поэтому амплитуда затухающих колебаний уменьшается, пока не станет равной нулю.

Затухающие колебания, как и собственные, в системах, разных по своей природе, можно рассматривать с единой точки зрения – общих признаков. Однако, такие характеристики, как амплитуда и период, требуют переопределения, а другие – дополнения и уточнения по сравнению с такими же признаками для собственных незатухающих колебаний. Общие признаки и понятия затухающих колебаний следующие:

– дифференциальное уравнение должно быть получено с учетом убывания в процессе колебаний колебательной энергии;

– уравнение колебаний – решение дифференциального уравнения;

– амплитуда затухающих колебаний зависит от времени;

– частота и период зависят от степени затухания колебаний;

– фаза и начальная фаза имеют тот же смысл, что и для незатухающих колебаний.

Реальные конструкции современных автомобильных дорог являются нелинейными системами, в которых один или все их коэффициенты зависят от перемещений грунтовых масс их дорожных конструкций. Нелинейности систем

дорожных конструкций являются следствием нарушения закона Гука, связанного с наличием в этих конструкциях дефектов, обусловленных ошибками в проектной документации, нарушением технологических процессов строительства и содержания автомобильных дорог, а также применением на этапах их жизненного цикла некондиционных дорожно-строительных материалов.

Таким образом, изложенный выше подход расчета параметров вибронегруженности, т.е. процесса возникновения свободных затухающих колебаний слоев дорожных одежд, развивающийся из-за ударно-импульсного воздействия движущихся по ним транспортных средств на стадиях проектирования автомобильных дорог, наряду с учетом усталостных повреждений в материалах покрытий дорожных одежд, будет способствовать успешному решению задачи обеспечения необходимых прочностных показателей дорожных конструкций от их преждевременного разрушения.

При этом, отмеченная выше сложность и высокие материальные затраты по выполнению исследований вибрационного нагружения реальных конструкций дорожной одежды могут быть существенно уменьшены за счет перехода к выполнению данных исследований на эквивалентных макетных образцах реальных конструкций дорожной одежды при динамических испытаниях этих макетов методом свободных колебаний, с помощью специальных испытательных вибростендов с требуемым для этих целей частотным диапазоном 0,8–50 Гц, скоростью сканирования частоты возбуждения дорожной одежды в пределах 2–3 октав в минуту при линейном законе ее изменения и величинами вибро смещений, а также виброускорений в пределах от 0,01 до 1 мм и от 0,5 до 1g.

Литература

1. ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд // – Москва: ФГУП «Союздорнии». 2017. – 134 с.
2. *Артамонов Д.В.* Математические модели волновой динамики автомобильных дорог / Д. В. Артамонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 3 (15). – С. 135–141.
3. *Осиновская В.А.* Разработка теории вибрационного разрушения нежестких дорожных одежд и путей повышений их долговечности / В.А. Осиновская Автореферат диссертации на соискание степени доктора технических наук – Москва: МАДИ 2011, С. 1–43.
4. *Осиновская В.А.* Влияние вибрации нежестких дорожных одежд на их прочность проектирования / В.А. Осиновская Интернет-журнал «Науковедение». – № 5 (24). – 2014. – С. 1–15.
5. *Осиновская В.А.* Вибрационное нагружение нежестких дорожных одежд / В.А. Осиновская Научный вестник Воронежского ГАСУ Строительство и архитектура. – №1 (33). – 2014. – С. 1–15.
6. *Абрамович С.В.* Исследование устойчивости систем автоматического управления моногармоническими виброиспытаниями. К.: АН УССР. Ин-т кибернетики. Секция "Техн. кибернетика", 1972. – 34 с.
7. *Челомей В.Н.* Колебания линейных систем Т. 1. / Под ред. В. В. Болотина. – Москва: Машиностроение, 1978, 1978. – 352 с
8. Справочные материалы для конструкторов по динамике. Т3. / Ред. коллегия: д-р техн. наук А. Г. Пилюттик (отв. ред.) и др. Т. 3: Динамическая схема. Учет упругих деформаций. Кн. 2. Уравнения возмущенного движения. Теоретические методы определения коэффициентов. - ГОНТИ № 1,1969. - 159 с.
9. *Теодорчик К.Ф.* Автоколебательные системы. М – Л.: Госиздат, 1952. – 272 с.
10. *Кренделл С.* Случайные колебания. – Москва: Мир, 1967. – 356 с.

11. *Галкин А.Ф.* Лекции по физике. В 4 ч. Ч. 4. Колебания, волны, оптика / А. Ф. Галкин; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 100 с.

12. *Тимошенко С.П.* Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко, Д.Х.Янг, У.Уивер. – Москва: Машиностроение, 1985. – 472 с.