

УДК 624.21

**ПОРЯДОК ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ
ИСПЫТАНИЙ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИИ МЕДЛЕННО
ДВИЖУЩЕЙСЯ НАГРУЗКОЙ*****Сухоруков Б. Д.****Днепропетровский национальный университет железнодорожного
транспорта имени академика В. Лазаряна. г. Днепропетровск*

Результаты натурных испытаний являются определяющими при диагностике технического состояния и оценке грузоподъёмности находящихся в эксплуатации мостовых сооружений.

Совершенствование методики проведения испытаний и обработки получаемых при этом данных было и остаётся важным направлением деятельности мостоиспытательных станций и лабораторий.

Очень часто одной из главных задач испытаний мостовых конструкций является получение данных для построения натуральных линий влияния прогибов, перемещений, напряжений, усилий и т. п. в характерных и ответственных местах таких конструкций. Это, как правило, прогибы в серединах пролётов а так же фибровые деформации в наиболее напряжённых элементах и сечениях пролётных строений.

Сравнение натуральных линий влияния с теми, по которым производился расчет мостовой конструкции при проектировании, позволяет оценить: насколько корректно была выбрана расчётная схема; насколько она соответствует действительной работе сооружения под воздействием временной подвижной нагрузки. А так же даёт возможность выявить скрытые резервы грузоподъёмности, решать вопросы, связанные с пропуском сверхнормативных нагрузок и т. п.

Натурные линии влияния каждого конкретного, находящегося в эксплуатации, сооружения являются универсальными носителями информации о его фактических жёсткосных и прочностных характеристиках.

Традиционно натурные линии влияния строятся по данным статических испытаний. Однако, для этого требуется значительное число различных установок испытательной нагрузки на проезжей части моста, что в свою очередь ведёт к большим затратам времени на проведение таких испытаний.

Существенно сократить продолжительность проведения испытаний позволяет применение современной измерительной и регистрирующей аппаратуры, фиксирующей с высокой частотой считывания все контролируемые параметры (прогибы, фибровые деформации) при медленном поступательном движении испытательной нагрузки. При этом, каждый раз в память компьютера заносится время с момента начала записи процесса перемещения испытательной нагрузки по пролётному строению и, соответствующее этому времени, показания датчиков, установленных на нём.

То есть, экспериментальные данные, снимаемые с каждого датчика, представляют собой массив, состоящий из пар чисел (t_i - время, y_i - показание датчика).

Поскольку линия влияния – это функция $f(x)$, аргументом которой является не время t , а координата X положения единичной силы на проезжей части моста, то при обработке экспериментальных данных необходимо прежде всего заменить t_i (время, фиксирующее момент снятия с датчика показания y_i) на x_i – координату положения испытательной нагрузки на пролётном строении в момент снятия показания y_i ;

При равномерном поступательном движении испытательной нагрузки вдоль всей длины пролётного строения l такая замена может быть произведена по формуле:

$$x_i = \frac{l \cdot i}{n} \quad (1),$$

где: l - длина пролётного строения;

$i = 0..n$ - номер, считываемого с датчика показания;

n - номер последнего показания датчика, соответствующий положению испытательной нагрузки в конце пролётного строения.

На практике первый этап обработки может быть реализован таким образом: массив данных из файла, куда они записывались при испытаниях и хранились в памяти компьютера, экспортируются в электронные таблицы Excel и там производятся вычисления по формуле (1).

На следующем этапе обработки данных с целью построения по ним натурной линии влияния возникает задача аппроксимации дискретной зависимости, представленной массивом из пар чисел (x_i, y_i), непрерывной функцией $F(X)$.

При этом функция $F(X)$ (назовём её функцией загрузки) должна быть максимально избавлена от шумовой компоненты измерений, практически всегда присутствующей в считываемых с датчиков и заносимых в память компьютера показаниях.

То есть, фактические показания датчиков y_i тем или иным образом подлежат фильтрации и сглаживанию (например, наперёд задаваемой аналитической зависимостью между ближайшими соседними значениями y_i).

Для решения этой задачи удобно воспользоваться возможностями, предоставляемыми математическим приложением Mathcad.

Так, в Mathcad имеется целый арсенал встроенных функций, позволяющих осуществлять самую различную регрессию, интерполяцию-экстраполяцию и сглаживание данных.

Удовлетворительные результаты в нашем случае даёт локальное сглаживание адаптивным алгоритмом, основанное на анализе ближайших соседей каждой пары данных (X_i, Y_i) .

В принятой в Mathcad форме запись этой процедуры выглядит следующим образом:

$$Z := \text{supsmooth}(X, Y), \quad (2)$$

где: X – вектор действительных значений аргумента (координаты);

Y – вектор действительных значений показаний датчика;

Z – вектор сглаженных значений показаний датчика.

Вслед за сглаживанием проводится сплайн-интерполяция (например, при помощи кубического сплайна):

$$S := \text{cspline}(X, Z), \quad (3)$$

$$F(X) := \text{interp}(S, X, Z, X) \quad (4)$$

Необходимо отметить, что после выполнения вышеприведенных процедур сглаживания и интерполяции данных наблюдается некоторое (до 10%) уменьшение их максимальных значений. И, что бы его компенсировать, представляется целесообразным ввести к функции $F(X)$ соответствующий поправочный множитель.

Следующий этап обработки данных непосредственно связан с нахождением по функции загрузки пролётного строения испытательной нагрузкой $F(X)$ искомой функции $f(x)$ – натурной линии влияния.

В зависимости от характера воздействия на проезжую часть моста испытательной нагрузки (в виде сосредоточенных сил от колёс авто-/железнодорожного транспорта или распределённой гусеничной нагрузки) в статье [1] приводятся соответствующие алгоритмы вычислений.

Для примера рассмотрим случай построения натурной линии влияния прогиба железнодорожного пролётного строения в середине его длины.

Заметим, что для железнодорожных мостов в качестве испытательной нагрузки удобнее всего использовать локомотивы. У такой нагрузки одинаковое давление на все оси и она симметрична относительно середины своей длины (рис. 1).

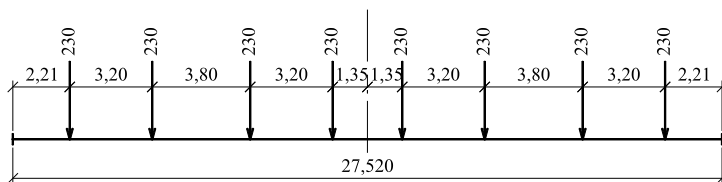


Рис. 1. Колёсная схема и давление на рельсы от осей электровоза ВЛ-8 (расстояния в м; давление в кН)

Алгоритм вычисления ординат натурной линии влияния для рассматриваемого случая имеет вид:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{P_0} [F(x) - (P_1 f(x-a_1) + \dots + P_n f(x-a_n))], & 0 \leq x \leq l; \\ 0, & x < 0 \vee x > l. \end{cases} \quad (5),$$

где: P_0, P_1, \dots, P_n – сосредоточенные силы, передаваемое на рельсы от передней и всех последующих осей локомотива (для ВЛ-8 $P_0 = P_1 = \dots = P_7 = 230$ кН);

a_1, a_2, \dots, a_n – расстояниями от передней оси локомотива до последующих его осей (для ВЛ-8 $a_1 = 3.20$ м; $a_2 = 7.00$ м; ...; $a_7 = 23.10$ м)

l – длина пролётного строения.

На практике попытка вычисления ординат натурной линий влияния по алгоритму (5) в среде Mathcad успехом не увенчалась из-за неприемлемо больших затрат времени (расчёт вёлся более суток, а результат так и не был получен). Зато в электронных таблицах Excel (правда, с рядом дополнительных подготовительных процедур) такой расчет был успешно реализован.

Подготовительные процедуры сводились к вычислению значений функции загрузки $F(X)$ во всей области её определения (на всей длине пролётного строения l) с шагом Δ и их экспорту из Mathcad обратно в Excel.

Выбор шага Δ обусловлен схемой расположения осей локомотива, а точнее – Δ должно равняться наибольшему общему кратному расстояний между передней осью локомотива и его последующими осями.

При таком выборе шага, в каком бы месте пролётного строения с координатой X кратной Δ не находилась передняя ось локомотива, все остальные его оси так же будут иметь координаты кратные Δ . Это обстоятельство позволяет производить вычисления искомым ординат линии влияния в электронных таблицах последовательно с шагом Δ .

При необходимости, экспортируя в очередной раз результаты расчёта из Excel в Mathcad, можно проводя интерполяцию, вычислять значения ординат линии влияния в любом месте с координатой X не обязательно кратной Δ .

Таким образом, при обработке экспериментальных данных испытаний мостовых конструкций с целью построения по ним натурных линий влияния пока приходится использовать сразу два математических приложения Mathcad и Excel, что не совсем удобно.

На рис. 2 приведена, построенная вышеописанным способом, натурная линия влияния прогиба середины находящегося в эксплуатации предварительно-напряжённого железобетонного железнодорожного

пролётного строения с расчётным пролётом $l_p = 33.5 \text{ м}$. Там же, для сравнения, приводится теоретическая линия влияния прогиба.



Рис. 2. Натурная и теоретическая линии влияния прогиба середины железнодорожного пролётного строения $l_p = 33.5 \text{ м}$

Как можно видеть, эти линии несколько отличны между собой, причём площадь натурой линии влияния меньше площади теоретической линии влияния. Это говорит о том, что фактическая изгибная жёсткость пролётного строения больше его расчётной (теоретической) жёсткости. Конструктивный коэффициент в данном случае оказался равным $K = 0.89$, что соответствует норме.

Нуждается в дальнейшем совершенствовании методика проведения испытаний. Для повышения точности окончательных результатов следует перейти к непосредственной записи координаты (положения) испытательной нагрузки на проезжей части моста в момент снятия показания датчика, а не устанавливать такую связь по времени снятия очередного показания. Такой переход необходим, поскольку достичь строго равномерного движения испытательной нагрузки, как показывает опыт, весьма сложно.

Можно добиться непосредственной записи положения испытательной нагрузки на проезжей части моста в момент снятия с датчиков показаний, например, прикрепив к испытательной нагрузке конец тонкой стальной проволоки и фиксируя по мере движения нагрузки процесс разматывания проволоки с барабана, неподвижно установленного на мосту.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сухоруков Б. Д. Построение линий влияния по осциллограммам загрузки мостовых конструкций медленно движущейся испытательной нагрузкой / Б. Д. Сухоруков // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. Трудов. – Вып. № 47. – Д: Изд-во ПГАСА. 2008. – С. 460–467.