Кудряшов Е. В., Заренков С. В., Ходунова О. А.

МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛАСТИЧНОСТИ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ НА ОСНОВЕ ПРОСТОЙ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ. ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛАСТИЧНОСТИ

В статье рассмотрена математическая модель контактной подвески, построенная на основе метода конечных элементов и позволяющая выполнять расчеты эластичности с высокой точностью. В числе достоинств модели – простота, доступность для воспроизведения, универсальность. Перспективная область применения – расчеты контактных подвесок для высоких скоростей движения в соответствии с международными требованиями. Приведено сравнение результатов расчетов на основе модели с экспериментальными данными, полученными в ходе испытаний скоростной контактной подвески на участке Лихославль – Калашниково Октябрьской железной дороги в 2005-2009 гг. Описаны усовершенствованные приборы и методы изменений, использованные при проведении экспериментов.

При повышении скоростей движения на электрифицированных железных дорогах возникает необходимость в разработке новых и совершенствовании существующих конструкций токоприемников и контактных подвесок, для чего требуются адекватные методы расчета и измерения параметров этих систем.

Одной из ключевых характеристик контактной подвески является *pacnpedenenue* эла*стичности* в пролетах. Значение эластичности в какой-либо точке пролета по определению равно отношению величины подъема контактного провода к силе нажатия, вызвавшей этот подъем. Распределение эластичности позволяет охарактеризовать процесс взаимодействия токоприемника с контактной подвеской в квазистатическом приближении. Несмотря на то, что эластичность не является единственной характеристикой, определяющей качество токосъема и допустимую скорость движения (необходимо учитывать целый ряд факторов, в том числе динамических), она остается одним из показателей, на который разработчики контактных подвесок обращают первостепенное внимание. Считается, что чем более равномерна кривая распределения эластичности в пролетах подвески, тем меньше размах колебаний точки контакта токоприемника с контактным проводом при движении, соответственно, тем бо́льшую скорость можно развить при удовлетворительном качестве токосъема. В нормативных документах Международного союза железных дорог приводятся значения относительной неравномерности эластичности, допустимые для различных скоростей движения [1].

В нашей стране до последнего времени применялись методы расчета эластичности, разработанные еще в середине прошлого века [2]. Как показывают результаты экспериментальных исследований, эти методы не позволяют достоверно рассчитывать эластичность современных скоростных контактных подвесок. Традиционные методы используют приближенные формулы и эмпирические коэффициенты, полученные во времена СССР для широко применяемых тогда типовых контактных подвесок, рассчитанных на обычные скорости.

Развитие вычислительной техники в последние десятилетия позволило построить детальные математические модели взаимодействия токоприемников и контактной подвески – как статические, так и динамические. Модели позволяют определять параметры системы токосъема с высокой точностью, в том числе – рассчитывать эластичность контактной подвески. В России такие модели разработаны, в частности, в Уральском государственном университете путей сообщения [3] и в компании «Универсал – контактные сети» [4]. Однако большинство известных моделей чрезвычайно сложны для воспроизведения широким кругом специалистов. В открытых источниках информация по их устройству, как правило, неполная.

В настоящей статье дано подробное описание метода расчета эластичности контактной подвески на основе простой конечноэлементной модели, для повторения которой требуются лишь минимальные знания в области математики и программирования.

В первой части статьи рассмотрена последовательность определения равновесного статического состояния контактной подвески методом конечных элементов (МКЭ) в варианте метода перемещений [5]. Эта последовательность, реализованная в виде программного модуля, является основой для расчета эластичности, алгоритм которого приведен во второй части статьи. В третьей части рассмотрены современные методики и приборы для высокоточного измерения эластичности. В заключительной части статьи приведено сравнение результатов расчетов на основе предлагаемого метода с данными экспериментов, полученными с использованием описанных измерительных средств.

Определение равновесного статического состояния подвески на основе МКЭ

Классическая задача статического расчета механической системы методом конечных элементов заключается в нахождении перемещений под действием внешних сил. Вначале система рассматривается в ненагруженном состоянии: составляется модель системы с разбиением на малые конечные элементы, связанные друг с другом в узлах. Далее формируются математические модели конечных элементов, составляются их матрицы жесткости. Затем, на основе матриц жесткости отдельных элементов, формируется матрица жесткой всей системы, связывающая перемещения и нагрузки. Формируется вектор узловых усилий. Решение системы уравнений дает искомые перемещения под действием нагрузок.

Для контактной подвески в качестве начального удобно принять состояние при отсутствии нагрузок от веса проводов, арматуры и т.п. Основные провода (контактный провод, несущий трос) целесообразно представить в модели предварительно натянутых гибких нитей.

Рассмотрим основные этапы статического расчета контактной подвески. В данном расчете натяжения проводов, длины пролетов, длины межструновых пролетов и длины струн считаются заданными. Результатом расчета является статическое положение проводов.

1. Задание начального (ненагруженного) состояния. Разбиение на конечные элементы

Для выполнения расчета даже в одном пролете контактной подвески необходимо построить модель из нескольких пролетов т.к. достаточно велико взаимное влияние элементов смежных пролетов друг на друга. Наиболее адекватные результаты обеспечивает расчет анкерного участка контактной подвески целиком.

В качестве примера рассмотрим модель части подвески из трех пролетов (рисунок 1а). Моделирование выполняется в плоскости *ОХҮ*.



Рисунок 1 – Начальное (ненагруженное) состояние системы: а) пример участка контактной подвески с тремя пролетами; б) – фрагмент для узлов 11–18 с указанием узловых нагрузок

Для простоты рассмотрения примем число струн в пролете равным трем. Пусть на опоре 3 имеется рессорный опорный узел, остальные опорные узлы – нерессорные. (Для практических расчетов необходимо моделировать реальную схему подвески).

В начальном состоянии весовые нагрузки отсутствуют, а значит отсутствует и провес проводов. Примем, что контактный провод и несущий трос расположены горизонтально на расстоянии друг от друга $h_{\rm K}$, соответствующем конструктивной высоте подвески. Все струны подвески как бы «растянуты» до величины $h_{\rm K}$. Рессорные тросы в начальном состоянии также прямолинейны и горизонтальны. Их вертикальное положение совпадает с положением несущего троса (на рисунке рессорный трос показан условно чуть ниже несущего).

Все провода при такой схеме будут расположены вдоль оси *OX*, а струны – вдоль оси *OY* системы координат *OXY*, что позволит упростить дальнейший расчет.

Разобьем провода на соединенные в узлах конечные элементы, так, как показано на рисунке. Узлы необходимо предусмотреть в точках подвеса несущего троса на консолях, в местах крепления фиксаторов к контактному проводу, в местах крепления струн, в местах крепления рессорных тросов и в местах установки каких-либо сосредоточенных масс. В межструновых пролетах на проводах также необходимо предусмотреть по несколько узлов (на рисунке показано по одному). Узлы на несущем, рессорном тросе и контактном проводе удобней всего располагать друг над другом. Каждая струна является одним конечным элементом. Обозначим N_y – получившиеся общее число узлов, $N_Э$ – число элементов.

Пронумеруем узлы. Для каждого узлового сечения номера даем по порядку: узел на несущем тросе, на рессорном тросе (если он есть), на контактном проводе. Пронумеруем также конечные элементы, например, как показано на рисунке 1.

Для дальнейших расчетов необходимо задать координаты узлов в начальном состоянии в виде векторов **X** и **Y** (каждый имеет размерность N_y).

Для описания соответствия между номерами узлов и номерами элементов составим *матрицу инцидентности* (таблица 1). Эта матрица имеет размерность $3xN_3$ и содержит информацию для каждого элемента о его типе и номерах начального и конечного узлов. Например, элемент 6 имеет тип «НТ» (несущий трос), начало в узле 11 и конец в узле 13.

Номер элемента:		6	7	8		30	31	32	 57	
Тип элемента:		HT	HT	HT	•••	КП	КП	КП	 Струна	
Номер начального узла:		11	13	15		12	14	16	 13	
Номер конечного узла:		13	15	17	:	14	16	18	 14	

Таблица 1 – Пример матрицы инцидентности системы

С помощью матрицы инцидентности гибко задается структура модели контактной подвески: число пролетов, число струн в пролетах, какие опорные узлы рессорные, какие – нерессорные и т.д. Сформировав такую матрицу, последующий расчет можно вести практически независимо от конкретной схемы подвески.

2. Формирование математических моделей и матриц жесткости конечных элементов

В модели контактной подвески будем использовать два типа конечных элементов: элемент натянутой гибкой нити для проводов и эластичный элемент для струн (рисунок 2).



Рисунок 2 – Конечные элементы: a) – натянутой гибкой нити; б) – эластичной струны

Каждый узел этих элементов имеет только одну степень свободы – вертикальное перемещение у. На рисунке стрелками показаны положительные направления перемещений. Для любого конечного элемента с началом в узле «Н» и концом в узле «К» можно сформировать вектор узловых перемещений $Q = y_H y_K^T$. Согласно процедуре МКЭ распределенные нагрузки на конечные элементы преобразуются в узловые. Каждый конечный элемент загружен внешними нагрузками и усилиями взаимодействия с соседними элементами.

Они образуют *вектор узловых усилий* $P = p_{\rm H} p_{\rm K}^{\rm T}$. Связь между узловыми усилиями и узловыми перемещениями, происходящими под действием усилий, определяется матрицей жесткости *R*:

$$R \cdot Q = P. \tag{1}$$

Матрица жесткости рассмотренных элементов имеет размерность 2x2:

$$R = \begin{bmatrix} r_{\rm HH} & r_{\rm HK} \\ r_{\rm KH} & r_{\rm KK} \end{bmatrix}.$$
(2)

Компоненты матрицы $r_{\rm HH}$, $r_{\rm HK}$, $r_{\rm KH}$, $r_{\rm KK}$ физически представляют собой реакции, возникающие в начальном и конченом узлах элемента (что отмечено первыми буквами «Н» и «К» индекса) от смещения узлов – начальных или конечных (вторая буква индекса). Например, $r_{\rm KH}$ – это реакция конечного узла от смещения начального узла.

Пользуясь принципом возможных перемещений [5], можно найти компоненты матриц жесткости. Для элементов натянутой гибкой нити и эластичной струны, соответственно:

$$R_{\rm HMTM} = \frac{H}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1\\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \qquad R_{\rm CTPYHM} = \frac{ES}{e} \begin{bmatrix} 1 & -1\\ -1 & 1 \end{bmatrix}.$$
(3)

где *H* – натяжение нити, *l* – длина элемента нити, *E* – модуль упругости струны, *S* – площадь поперечного сечения струны, *e* – длина струны.

3. Формирование глобальной матрицы жесткости всей системы

Глобальная матрица жесткости всей системы **R** определяет связь между глобальными векторами узловых перемещений **Q** и узловых усилий **P** для всего ансамбля элементов системы ($\mathbf{R} \cdot \mathbf{Q} = \mathbf{P}$). В случае использования в модели рассмотренных выше элементов матрица **R** имеет размерность $N_y \ge N_y$.

Глобальная матрица жесткости формируется из компонентов матриц жесткости отдельных конечных элементов. Рассмотрим алгоритм формирования матрицы **R**.

Вначале инициализируем матрицу жесткости – заполняем нулями. Затем для каждого элемента вычисляем его локальную матрицу жесткости. Например, для элемента 6 типа «элемент несущего троса», в соответствии с (2) и (3), локальная матрица жесткости

$$R_{6} = \begin{bmatrix} r_{\rm HH} & r_{\rm HK} \\ r_{\rm KH} & r_{\rm KK} \end{bmatrix} = \frac{T}{l_{6}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T/l_{6} & -T/l_{6} \\ -T/l_{6} & T/l_{6} \end{bmatrix},$$
(4)

где T – натяжение несущего троса, l_6 – длина элемента 6.

Используя матрицу инцидентности (таблица 1), определяем, что начало элемента 6 соответствует узлу системы с номером 11, а конец – узлу 13. Компонент локальной матрицы $r_{\rm HH} = T/l_6$, определяющий реакцию начального узла элемента на его же перемещение, засылаем с суммированием в ячейку матрицы **R** с номерами строки и столбца 11-11. Компонент $r_{\rm KH} = -T/l_6$ (реакция конечного узла на перемещение начального узла), засылаем с суммированием в ячейку 13-11, $r_{\rm HK} = -T/l_6$ – в ячейку 11-13 и $r_{\rm KK} = T/l_6$ – в 13-13. Длину l_6 легко вычислить по координатам узлов элемента: $l_6 = x_{13} - x_{11}$, где x_{11} и x_{13} – компоненты вектора **X**.

Выполнив эту операцию для каждого элемента, получаем глобальную матрицу жесткости **R** всей системы. Ее фрагмент приведен в таблице 2.

Строки и столбцы матрицы **R**, соответствующие зафиксированным перемещениям узлов, закрепленных на консолях (в рассматриваемом примере – 1, 17, 35, 54), необходимо заполнить нулями, за исключением диагональной ячейки, в которую записывается единица.

-	11	12	13	14	15	16	17	18
11	$T/l_5+T/l_6$	0	$-T/l_6$	0	0	0	0	0
12	0	$K/l_{29} + K/l_{30}$	0	$-K/l_{30}$	0	0	0	0
13	$-T/l_{6}$	0	$T/l_6 + T/l_7 + ES/e_{57}$	$-ES/e_{57}$	$-T/l_{7}$	0	0	0
14	0	$-K/l_{30}$	$-ES/e_{57}$	$K/l_{30} + K/l_{31} + ES/e_{57}$	0	$-K/l_{31}$	0	0
15	0	0	$-T/l_{7}$	0	$T/l_7 + T/l_8$	0	0	0
16	0	0	0	$-K/l_{31}$	0	$K/l_{31}+K/l_{32}$	0	$-K/l_{32}$
17	0	0	0	0	0	0	1	0
18	0	0	0	0	0	$-K/l_{32}$	0	$K/l_{32} + K/l_{33}$

Таблица 2 – Фрагмент глобальной матрицы жесткости всей системы **R** (для узлов 11–18)

В таблице 1 использованы обозначения: T – натяжение несущего троса; K – натяжение контактного провода; $l_5...l_{33}$ – длины соответствующих элементов проводов; e_{57} – проектная длина струны, соответствующей элементу номер 57.

При принятой нумерации узлов матрица жесткости будет иметь ленточную структуру с шириной ленты 5 для нерессорной подвески и 7 если в системе имеется хотя бы один рессорный узел. Матрица является симметричной и положительно определенной.

4. Формирование глобального вектора узловых усилий

Глобальный вектор узловых усилий имеет N_y компонентов. В векторе учитываются приведенные к узловым распределенные нагрузки от веса проводов, веса зажимов, дополнительных фиксаторов, а также вертикальные составляющие сил реакций фиксаторов. В узлах крепления струн к несущему тросу и контактному проводу в векторе нагрузок дополнительно учитываются встречно направленные силы, обеспечивающие в нагруженном состоянии системы проектное расстояние между несущим тросом и контактным проводом, равное длине струны. Величина этих сил равна $ES(h_K - e)/e$, где E и S – модуль упругости и площадь сечение струны, e – длина конкретной струны, h_K – расстояние между несущим тросом и контактным проводов в исходном состоянии.

Для пояснения принципа формирования вектора нагрузок **Р** в таблице 3 приведен его фрагмент. На рисунке 1 б) для того же фрагмента показано приложение нагрузок.

11	$-g_{\rm H}(l_5/2+l_6/2)$
12	$-g_{\rm K}(l_{29}/2+l_{30}/2)$
13	$-g_{\rm H}(l_6/2+l_7/2) - g_{\rm C}e_{57}/2 - G_{3\rm H} - ES(h_{\rm K}-e_{57})/e_{57}$
14	$-g_{\rm K} \left(l_{30}/2 + l_{31}/2 \right) - g_{\rm C} e_{57}/2 - G_{3\rm K} + ES \left(h_{\rm K} - e_{57} \right) / e_{57}$
15	$-g_{\rm H}(l_7/2+l_8/2)$
16	$-g_{\rm K}(l_{31}/2+l_{32}/2)$
17	0
18	$-g_{\rm K}(l_{32}/2+l_{33}/2)-G_{\rm J}\Phi/2-G_{3\Phi}+P_{\rm B}\Phi$

Таблица 3 – Фрагмент вектора нагрузок Р (для узлов 11–18)

Использованы дополнительные обозначения: g_H , g_K , и g_C – погонные веса несущего троса, контактного провода и струн соответственно; G_{3H} и G_{3K} – веса струновых зажимов на несущем тросе и на контактном проводе; $G_{D\Phi}$ – вес дополнительного фиксатора; $G_{3\Phi}$ – вес фиксирующего зажима; $P_{B\Phi}$ – вертикальная составляющая реакции фиксатора.

Вертикальные составляющие реакций фиксаторов $P_{B\Phi}$ определяются исходя из рассмотрения схемы фиксатора (рисунок 3):

$$P_{\rm B\Phi} = P_{\rm M} \cdot tg \left(\arcsin \frac{H_s}{L_{\Phi}} \right), \tag{5}$$

где L_{Φ} – длина дополнительного фиксатора, H_S – вертикальное расстояние от оси контактного провода до центра шарнира крепления дополнительного фиксатора к стойке, $P_{\rm H}$ – усилие от излома контактного провода в месте крепления фиксатора.



Рисунок 3 - Схема фиксатора

Усилие от излома $P_{\rm H}$ определяется по известным формулам, приведенным, например, в [2]. Так, на прямом участке пути при одинаковых по абсолютным значениям разносторонних зигзагах контактного провода *z* и одинаковых длинах смежных пролетов *L*

$$P_{\rm H} = 4K \cdot z / L, \tag{6}$$

где К – натяжение контактного провода.

Для узлов, закрепленных на консолях (например, для узла 17), соответствующие компоненты вектора нагрузок необходимо положить равными нулю. Если концевые узлы на контактном проводе (2 и 55) не закреплены от вертикальных перемещений, прикладываемые нагрузки от фиксаторов и зажимов в этих узлах необходимо поделить пополам.

5. Нахождение перемещений и координат узлов в нагруженном состоянии

После формирования глобальной матрицы жесткости **R** и вектора узловых усилий **P**, решая систему линейных алгебраических уравнений $\mathbf{R} \cdot \mathbf{Q} = \mathbf{P}$, найдем вектор узловых перемещений **Q**. Новые координаты узлов $\mathbf{Y}_{\text{нагр}}$, соответствующие нагруженному состоянию системы, определим суммированием начальных координат узлов с найденными перемещениями: $\mathbf{Y}_{\text{нагр}} = \mathbf{Y} + \mathbf{Q}$. Вектор координат **X** не изменяется т.к. все перемещения – вертикальные.

6. Определение натяжений струн. Проверка разгружения струн

Натяжение каждой струны Н_{стр} в нагруженном состоянии определяется по закону Гука:

$$H_{\rm crp} = ES \frac{e_{\rm harp} - e}{e},\tag{7}$$

где *е* – начальная (проектная) длина струны, *е*_{нагр} – длина струны в нагруженном состоянии.

Длина $e_{\text{нагр}}$ определяется через координаты узлов в нагруженном состоянии, найденные на этапе 5. Если в какой-либо струне возникло сжимающее усилие ($H_{\text{стр}}<0$), она должна быть удалена из модели. Статический расчет необходимо выполнить заново с этапа 3, при этом в матрицу жесткости не заносятся соответствующие разгруженной струне компоненты. В векторе узловых усилий нагрузки $ES(h_{\text{K}} - e)/e$ также не учитываются. При этом весовые нагрузки от всех струн сохраняются.

Алгоритм расчета эластичности контактной подвески

Рассмотренная выше последовательность статического расчета является основой алгоритма определения эластичности. При программной реализации статический расчет удобно оформить в виде отдельного модуля (подпрограммы).

Алгоритм расчета распределения эластичности включает следующие этапы:

1. Если длины струн подвески заранее неизвестны, их необходимо предварительно рассчитать. При этом должно быть задано проектное высотное положение контактного провода под каждой струной с учетом заданной стрелы провеса. Используется метод последовательных приближений. Для расчета длин струн на первой итерации выполняется статический расчет подвески при произвольных начальных длинах всех струн, например, 1,5 м. Находится высотное положение контактного провода при таких струнах и сравнивается с заданным. Далее длина каждой струны корректируется за значение разности между заданным и полученным высотным положением контактного провода под струной. После этого статический расчет выполняется еще раз. Снова сравнивается заданное и полученное положение контактного провода, снова корректируются длины струн. Этот процесс повторяется до тех пор, пока разница в длине любой струны на соседних итерациях не окажется менее, например, 1 мм, после чего итерационный процесс прекращается.

2. Выполняется статический расчет контактной подвески с заданными или рассчитанными на этапе 1 длинами струн. В результате находится высотное положение контактного провода без нажатия.

3. К каждому узлу контактного провода в пределах расчетного пролета последовательно прикладывается заданная сила нажатия $P_{\rm T}$, которая учитывается в векторе узловых усилий **P**. Для каждого положения силы выполняется статический расчет. Находится подъем контактного провода при нажатии с силой $P_{\rm T}$ относительно положения, определенного на шаге 2. Под каждым узлом вычисляется эластичность как отношение подъема контактного провода к силе нажатия $P_{\rm T}$.

При выполнении статических расчетов на шаге 3 необходимо учитывать, что при подъеме контактного провода меняются значения параметров фиксаторов H_S (см. рисунок 3), а следовательно, меняются и вертикальные составляющие реакций фиксаторов $P_{B\Phi}$. Целесообразно уточнить значения $P_{B\Phi}$ методом последовательных приближений. На первой итерации в качестве исходных данных используются значения $P_{B\Phi}$ без учета подъема контактного провода. Рассчитывается поднятое положение контактного провода, после чего значения $P_{B\Phi}$ уточняются. Далее расчет выполняется еще раз, при этом в качестве исходных данных используются уточненные значения $P_{B\Phi}$. Этот процесс повторяется до тех пор, пока значения $P_{B\Phi}$ на соседних итерациях не станут почти одинаковыми (с заданной точностью).

Измерения эластичности

Традиционный способ измерения эластичности заключается в приложении к контактному проводу силы нажатия с помощью простейших ручных приспособлений, например, в виде рычага, фиксации силы нажатия по динамометру и измерении подъема контактного провода по линейке. Эластичность рассчитывается как отношение подъема контактного провода к силе нажатия. Измерения обычно производятся с дрезины (автомотрисы) или лейтера. При всей простоте такой способ имеет два существенных недостатка: низкая скорость измерений и низкая точность вследствие погрешностей приборов, а также колебаний контактного провода, из-за которых трудно однозначно зафиксировать его положение. Кроме того, рычажные приспособления не обеспечивают вертикальность приложения силы нажатия.

В ходе испытаний скоростной контактной подвески на экспериментальном участке Лихославль – Калашниково Октябрьской железной дороги в период с 2005 по 2009 гг. были разработаны усовершенствованные методы и приборы для измерения эластичности.

Измерения эластичности производились двумя способами: с помощью вагоналаборатории для испытания контактной сети (ВИКС) и с помощью специально разработанных автоматизированных устройств.

Определение статических характеристик с помощью ВИКС основано на автоматическом получении дискретных данных, аппроксимированных до кривых отжатия контактных подвесок по участку при известном нажатии измерительного токоприемника. Для каждого принятого значения статического нажатия проводится три поездки. Измерение эластичности подвески осуществляется путем регистрации высоты контактных проводов без нажатия токоприемника, а затем при нажатии 15 и 30 даН. Обработка результатов дает данные об эластичности во всех пролетах анкерных участков как отношение величины отжатия проводов и нажатия токоприемника. По полученным значениям строится кривая распределения эластичности по длине анкерного участка. Скорость движения вагона-лаборатории при измерении высотного положения контактных проводов с фиксированным нажатием измерительного токоприемника не должна превышать 10 км/ч, что способствует отстройке от дополнительных сил воздействия на контактную сеть (аэродинамического воздействия на полоз измерительного токоприемника, инерционных сил и т. д.) и увеличению точности измерений. При проходе без нажатия скорость измерений может быть увеличена, так как датчик высотного положения провода позволяет получать данные высокой точности и при более высоких скоростях движения ВИКС (при наличии датчиков высотного положения крыши вагона).

Погрешность измерений определения высоты подвеса контактного провода с помощью ВИКС составляет ±10 мм. Такой метод определения эластичности применим в качестве общей оценки эластичности по участку с высокой скоростью. При проведении сравнительных испытаний скоростных контактных подвесок необходимы более точные измерения, для которых были специально разработаны автоматизированные средства и методика измерений.

Методика основана на измерении величины отжатий контактных проводов при их нагружении вертикально направленными силами с помощью специально разработанного устройства MECS (рисунок 4) [6]. Измерения отжатий проводов контактной подвески производятся с дрезины (или лейтера) с заданным шагом в выбранных пролетах. При измерениях фиксируются вертикально приложенные силы и вертикальные перемещения контактных проводов, по которым определяется эластичность.

Устройство MECS позволяет дрезине беспрепятственно передвигаться от одной измерительной точки до другой вдоль участка контактной сети, так как оно полностью располагается ниже контактных проводов.

Порядок проведения измерений:

дрезина с измерительным устройством располагается под измерительной точкой;

 вертикальный шток устройства со специальной насадкой для двух (или четырех) контактных проводов устанавливается под измерительной точкой;

– с помощью цифровой видеокамеры, направленной на измерительную шкалу, фиксируется начальное положение проводов при минимальной нагрузке ($P = 0.01P_{\text{ном}}$);

– производятся замеры отжатий контактных проводов при нагружении их силами $P_{\text{ном}} = 15$ и 30 даН;

 – аналогично производятся замеры значений отжатий контактных проводов при разгружении (для отстройки от сил сухого трения в шарнирах устройства);

– полученные данные измерений автоматически записываются в блоке обработки и индикации перемещений контактных проводов.



Рисунок 4 – Устройство MECS для измерения отжатий проводов контактных подвесок

Результаты измерения отжатий контактных проводов обрабатываются с помощью программы «ТехноСканер» [7].

Такой способ регистрации отжатий контактных проводов позволяет увеличить скорость проведения измерений и повысить точность определения перемещений проводов с учетом длительно затухающих колебаний подвески при их нагружении (рисунки 5, 6).

Прибор оснащен системой глобального позиционирования GPS/ГЛОНАСС для автоматической привязки результатов измерения к местности.

По нескольким изменениям для каждой точки пролета определяется усредненное значение эластичности. По полученным данным строятся графики распределения эластичности в пролетах.

Погрешность измерений, возникающая при использовании предложенного метода, не превышает ± 2 %.



Рисунок 5 – Интерфейс программы для обработки результатов измерения отжатия контактных проводов



Рисунок 6 – Результаты измерения отжатия контактных проводов с учетом затухающих колебаний подвески

Сравнение данных расчета и эксперимента

На рисунке 7 приведены результаты расчета эластичности, выполненного описанным методом для одного из пролетов контактной подвески на экспериментальном участке Лихославль – Калашниково в сравнении с экспериментальными данными, полученными с помощью устройства MECS. На рисунке также показан результат расчета эластичности по ранее применявшейся методике на основе [2]. В конечноэлементном расчете учитывается межструновая эластичность. Данные эксперимента и расчета по методике [2] имелись только под струнами, поэтому на графиках соответствующие точки соединены прямыми линиями.

На рисунке 7 приведены значения эластичности в характерных точках пролета η_{\min} , η_{\max} , η_{\min} – минимальная, максимальная и под струной в середине пролета. Дополнительно приведены значения коэффициента неравномерности эластичности k_{\Im} , относительной неравно-

мерности *U* и неравномерности относительно максимального значения в середине пролета под струной *U*_{mid}. Значения этих параметров определяются формулами



Рисунок 7 – Распределение эластичности в пролете контактной подвески (экспериментальный участок Лихославль–Калашниково, пролет 263–265). Размеры приведены в метрах

Для оценки расхождения данных расчета и эксперимента использован показатель

$$\delta_{\mathfrak{I}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{\left| \eta_{i}^{\mathfrak{I}} - \eta_{i}^{\mathfrak{P}} \right|}{\eta_{i}^{\mathfrak{I}}} \cdot 100\%, \tag{9}$$

где N – число изменений, η_i^{9} – эластичность при *i*-том измерении по данным эксперимента, η_i^{P} – эластичность в той же точке, определенная по расчету.

Сравнение результатов расчета на основе описанной модели показывает хорошую сходимость с данными эксперимента. Так, для пролета, показанного на рисунке 7, усредненное расхождение эксперимента и результатов расчета на основе модели составило 3,5%. Между тем, расхождение с расчетом по ранее применявшейся методике составило почти 18%.

Отметим, что расхождение результатов между расчетом на основе конечноэлементной модели и данными эксперимента в значительной степени может быть связано с погрешностями монтажа контактной подвески.

Заключение

Применение метода конечных элементов позволило построить простую и доступную для повторения статическую модель контактной подвески, на основе которой реализован расчет эластичности.

Предлагаемый метод расчета эластичности, в отличие от ранее применявшихся, не содержит специальных эмпирических формул и коэффициентов, позволяет гибко задавать параметры контактной подвески и обеспечивает значительно лучшую точность. Метод может использоваться при совершенствовании систем токосъема для высоких скоростей движения.

Для оценки адекватности метода использованы экспериментальные данные, полученные в ходе испытаний контактной сети на участке Лихославль – Калашниково с применением усовершенствованных измерительных средств. Сравнение данных расчета и эксперимента показало очень хорошую сходимость.

Список литературы

1. UIC 799. Characteristics of a.c. overhead contact systems for high-speed lines worked at speeds of over 200 km/h. 2002.

2. Фрайфельд А. В., Брод Г. Н. Проектирование контактной сети. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1991. 335 с.

3. Ефимов А. В., Галкин А. Г., Полыгалова Е. А. Разработка конечно-элементной модели статического взаимодействия токоприемников с контактной сетью // Межвуз. сб. науч. тр.– Самара, СамИИТ, 2001. – С. 72–75.

4. Кудряшов Е. В. Проектирование контактных подвесок на основе статических конечноэлементных моделей // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации контактных подвесок и токоприемников электрического транспорта: Сб. науч. статей с международным участием. – Омск, ОмГУПС, 2011. – С. 196–206.

5. Постнов В. А., Хархурим И. Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций / Л., Судостроение, 1974. 344 с.

6. Пат. № 81922 на полезную модель (РФ), МПК В 60 М 1/00. Устройство для измерения жесткости контактных подвесок / Павлов В. М., Сидоров О. А., Смердин А. Н., Чертков И. Е., Заренков С. В. Заявлено 19.11.2008; Опубл. 10.04.2009. Бюл. № 10.

7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2008612517 от 21.05.08 г. / Сидоров О. А., Павлов В. М., Смердин А. Н., Голубков А. С. Программное обеспечение для распознавания видеоинформации «ТехноСканер 2.0».