

7. Chen T.D., Vybory transportnykh sredstv [Choice of transportation vehicles] // *Management of a Shared, Autonomous, Electric Vehicle Fleet: Vehicle Choice, Charging Infrastructure & Pricing Strategies*. p-hd. 2015.
8. Rodier C., Shaheen S. Ekonomicheskie preimushchestva karsheringa [Economic benefits of car sharing] // *Carsharing and carfree housing: predicted travel, emission, and economic benefits*. 2004. Pp. 2–3.
9. Catalano M., Lo Casto B., Migliore M. Otsenka i modelirovanie sprosа na usluzhi karsheringa [Estimation and modeling of demand for car sharing services] // *Car sharing demand estimation and urban transport demand modelling using stated preference techniques / European Transport*, No. 40. 2008. Pp. 33–50.
10. Moskva stala mirovym liderom po chislu avtomobilei karsheringa [Moscow became the world leader in the number of carsharing cars], 2020. [Electronic media]. URL: <https://www.autostat.ru/news/42403/> (Accessed: April 08, 2020)
11. Karshering Delimobil' v Krasnoyarske [Car-sharing Delimobil in Krasnoyarsk] [Electronic media]. URL: <https://old.delimobil.ru/kry/index> (Accessed: April 23, 2020)
12. Raiony Krasnoyarska [Krasnoyarsk districts] [Electronic media]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D> (Accessed: April 02, 2020)
13. Kharitonov S.P. Metod «blizhaishego soseda» dlya matematicheskoi otsenki raspredeleniya biologicheskikh ob"ektov na ploskosti i na linii [The "nearest neighbor" method for the mathematical assessment of the distribution of biological objects on a plane and on a line], 2005. 213 p.

Информация об авторах

Берфельд Максим Андреевич – магистрант кафедры транспорта, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: electroschokker@gmail.com

Корягин Марк Евгеньевич – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Красноярск, e-mail: markkoryagin@yandex.ru

Катаргин Владимир Николаевич – к. т. н., профессор, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: vnkatarin@sfu-kras.ru

Information about the authors

Maksim A. Berfel'd – Master's student, the Subdepartment of Transport, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: electroschokker@gmail.com

Mark E. Koryagin – Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Subdepartment of Higher Mathematics, Siberian Transport University, e-mail: markkoryagin@yandex.ru

Vladimir N. Katargin – professor, Ph.D. in Engineering Science, Siberian Federal University, e-mail: vnkatarin@sfu-kras.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).59-70

УДК 629.023

Определение точности методики расчета скорости перед столкновением транспортного средства по остаточным деформациям в результате дорожно-транспортного происшествия

В. А. Ксенофонтова, Л. А. Княшко, П. К. Сопин✉

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Российская Федерация

✉ PKSopin@sevsu.ru

Резюме

При расследовании обстоятельств дорожно-транспортных происшествий для выяснения механизма столкновения важно точно определить скорости, с которыми двигались транспортные средства. Работа посвящена оценке точности методики определения скорости транспортного средства перед наступлением дорожно-транспортного происшествия по возникшим остаточным деформациям элементов конструкции автомобилей. Для определения точности методики проводилось натурное экспериментальное исследование остаточных деформаций. Основой методики эксперимента является принцип подобия Кирпичева – Барба – Кика. Описан порядок проведения эксперимента, применяемая установка и исследуемые образцы, включающие как масштабные модели, так и реальные элементы конструкции автомобиля. Экспериментальная установка позволяет с управляемой энергией удара деформировать различные образцы, а затем по измеренным деформациям произвести определение эквивалентной энергии методом смещенного объема. Приведены полученные экспериментальные данные в виде массивов координат деформированных узлов масштабных моделей. Отражены результаты теоретического определения энергии удара, затраченной на деформацию образцов. Проводились эксперименты и для реальных элементов конструкции автомобилей. Количество поглощенной энергии определялось методом смещенного объема. Для определения зоны распространения пластической деформации был произведен металлографический анализ структуры зоны деформации. Проведенный анализ экспериментальных и расчетных значений определения энергии деформации образцов показал, что метод определения поглощенной энергии дает погрешность не более 14 %, при этом повышение точности измерений деформированного объекта позволяет повысить точность результата. Сделан вывод, что методика расчета скорости перед дорожно-транспортным происшествием по остаточным деформациям транспортного средства имеет высокую точность и представляет собой инструментальную базу для объективного исследования механизма дорожно-транспортного происшествия.

Ключевые слова

энергия деформации, пластические и упругие деформации, эксперимент, скорость деформирования, критерии подобия, моделирование, дорожно-транспортное происшествие

Для цитирования

В. А. Ксенофонтова Определение точности методики расчета скорости перед столкновением транспортного средства по остаточным деформациям в результате дорожно-транспортного происшествия / В. А. Ксенофонтова, Л. А. Кияшко, П. К. Сопин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 59–70. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).59-70

Информация о статье

поступила в редакцию: 24.04.2020, поступила после рецензирования: 27.05.2020, принята к публикации: 14.06.2020

Determining the accuracy of the methodology for calculating the speed before the collision of the vehicle by residual deformations as a result of a traffic accident

V. A. Ksenofontova, L. A. Kiyashko, P. K. Sopin ✉

Sevastopol State University, Sevastopol, the Russian Federation

✉ PKSopin@sevsu.ru

Abstract

When investigating the circumstances of road traffic accidents, it is important to accurately determine the speeds at which the vehicles were moving in order to determine the collision mechanism. The work is concerned with the assessment of the accuracy of the method for determining the speed of a vehicle before a traffic accident based on the residual deformations of vehicle structural elements. To determine the accuracy of the method, a full-scale experimental observation of residual deformations was carried out. The experimental technique is based on the Kirpichev – Barba – Kick similarity principle. The experimental procedure, the plant used and the samples under study, including both scale models and real elements of the car structure, are described. The experimental plant makes it possible to deform various samples with controlled impact energy and then determine the equivalent energy according to the measured deformations by the displaced volume method. The obtained experimental data are provided in the form of arrays of coordinates of deformed nodes of scale models. The article reflects the results of the theoretical determination of the impact energy spent on deformation of the samples. Experiments were also carried out for real elements of car structure. The amount of absorbed energy was determined by the displaced volume method. To determine the zone of propagation of plastic deformation, a metallographic analysis of the structure of the deformation zone was performed. The analysis of the experimental and calculated values for determining the deformation energy of the samples showed that the method for determining the absorbed energy gives an error of no more than 14%, while increasing the accuracy of measurements of the deformed object makes it possible to increase the accuracy of the result. It is concluded that the method for calculating the speed before a traffic accident on the basis of residual deformations of a vehicle has a high accuracy and represents an instrumental basis for an objective study of the mechanism of a traffic accident.

Keywords

deformation energy, plastic and elastic deformations, experiment, deformation velocity, similarity criteria, modeling, traffic accident

For citation

Ksenofontova V. A., Kiyashko L. A., Sopin P. K. Opredeleniye tochnosti metodiki rascheta skorosti pered stolknoviyem transportnogo sredstva po ostatochnym deformatsiyam v rezul'tate dorozhno-transportnogo proisshestviya [Determining the accuracy of the methodology for calculating the speed before the collision of the vehicle by residual deformations as a result of a traffic accident]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, No. 3(67), pp. 59–70. 10.26731/1813-9108.2020.3(67).59-70

Article Info

Received: 24.04.2020, Revised: 27.05.2020, Accepted: 14.06.2020

Введение

При столкновениях и наездах на препятствие, когда масса последнего соизмерима с массой транспортного средства или превышает ее, значительная часть кинетической энергии транспортных средств гасится при деформации автомобилей. В данной

ситуации параметры кузовов, деформированных в результате дорожно-транспортного происшествия (ДТП) транспортных средств, являются наиболее информативными при определении скорости движения, предшествующей столкновению [1].

Конструкция типа «кузов автомобиля» имеет несколько особенностей по сравнению с другими инженерными конструкциями. Во-первых, она изготовлена из мягких сталей, допускающих большие пластические деформации, что обусловлено технологией изготовления (штамповка, сварка). Во-вторых, элементы конструкции представляют собой комбинации листового материала, в том числе элементы жесткости – лонжероны, пороги, стойки и другие, которые также изготовлены из листа, хотя могут иметь в сечении сложную форму [2].

Применение энергопоглощающих элементов для кузовов современных транспортных средств обуславливается их технологической и экономической эффективностью, которую возможно достичь путем непосредственного исследования процессов, происходящих внутри этих элементов [3–5].

Данные исследования получают широкое применение в расследовании обстоятельств ДТП и представляют собой инструментальную базу для объективного исследования механизма ДТП [6–11] при реализации разработанной методики, которая позволяет с заданной энергией удара деформировать элементы конструкции автомобиля, макеты, опытные образцы.

Разработка экспериментального исследования

Основу экспериментального исследования составила методика определения скорости транспортного средства перед столкновением по остаточным деформациям в результате ДТП.

В подтверждение точности методики проводились эксперименты как на натуральных образцах элементов кузова автомобиля, так и на масштабных моделях. Основу методики эксперимента составил принцип подобия Кирпичева – Барба – Кика [12], который формулируется следующим образом: если осуществлять в подобных условиях одинаковые процессы пластического деформирования геометрически подобных тел из одинакового материала, то развиваемые удельные усилия деформирования (в единичном объеме) будут равны между собой, отношение полных усилий деформирования будет равно квадрату, а отношение затрачиваемых работ – кубу отношений соответствующих линейных размеров.

Если обозначить длину, ширину и высоту натуре через l_n, b_n, h_n , а модели через l_m, b_m, h_m , то их отношение в соответствии с названным принципом будет величиной постоянной:

$$\frac{l_n}{l_m} = \frac{b_n}{b_m} = \frac{h_n}{h_m} = const = k_m, \quad (1)$$

где k_m – масштаб моделирования.

Соотношение (1) обуславливает необходимость равенства степени деформации натуре и модели:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_m, \quad (2)$$

времени деформирования –

$$t_n = t_m, \quad (3)$$

скоростей деформации –

$$\dot{\varepsilon}_n = \dot{\varepsilon}_m. \quad (4)$$

Для выполнения условий (1)–(4) необходимо, чтобы скорости деформирования отличались на величину масштаба моделирования:

$$V_m = \frac{V_n}{k_m}. \quad (5)$$

Указанный принцип может быть записан в виде:

$$\frac{V_n t_n}{l_n} = \frac{V_m t_m}{l_m}, \quad (6)$$

или в общепринятой для критериев подобия записи:

$$\frac{Vt}{l} = idem. \quad (7)$$

Общая последовательность действий при проведении экспериментов:

- проводятся измерения размеров модели;
- на поверхности модели наносится сетка с точным измерением координат узлов сетки;
- осуществляется пластическая деформация модели с заданной скоростью деформации;
- определяются пластические перемещения узлов сетки, по которым можно вычислить энергию деформации;
- энергия деформации модели пересчитывается в энергию деформации натуре.

Реализация методики осуществляется на экспериментальной установке, которая работает по принципу маятникового копра и содержит тонкую трубчатую штангу длиной l , к которой прикреплен сменный массивный боек массой M_σ ; шкалу для определения угла φ отклонения штанги от вертикали; массивное основание, к которому крепится испытуемый образец.

Модель изготавливается в масштабе в соответствии с критериями подобия при соблюдении требований к идентичности свойств материала модели и натуре. Такая установка позволяет передать испытуемой модели заданное количество кинетической энергии и затем произвести определение эквивалентной энергии деформации методом смещенного объема [13], который основан на принципе постоянства объема, либо методом расчета энергии, затраченной на пластическую деформацию в соответствии с принципом Э. Зибеля [14]:

$$U_\sigma = \sigma_s V_{cm}, \quad (8)$$

где $V_{cm} = V_0 \delta$ – смещенный объем; δ – истинная степень деформации; V_0 – первоначальный объем.

Энергия, сообщенная модели, при массе бойка M_σ будет равна работе удара [15]:

$$\mathcal{E}_{y\sigma} = M_\sigma l \cos \alpha, \quad (9)$$

где α – угол подъема бойка.

В состав установки входит также образец-свидетель, устанавливаемый из пластического материала. При ударе образец деформируется пластически вместе с моделью, но при отскоке его упругая деформация равна нулю, что позволяет судить об упругой составляющей модели по разнице остаточных длин модели и образца-свидетеля:

$$\Delta l_y = l_{ocm}^m - l_{ocm}^{ob}, \quad (10)$$

где Δl_y – упругая составляющая модели; l_{ocm}^m – остаточная длина модели; l_{ocm}^{ob} – остаточная длина образца-свидетеля.

Для проведения экспериментов использовались образцы в виде цилиндрических замкнутых оболочек из тонколистовой стали.

Для идентификации остаточных деформаций на поверхности каждого образца наносится сетка с шагом 10 мм по высоте и с круговым шагом $\Theta_i = 30^0$ (рис. 1).

Каждый узел, например, А имеет точные координаты X_A , r_O и Θ_A , где r_O – радиус, равный $\frac{D_O}{2}$. Третье измерение – толщина стенки образца в данном случае может не учитываться, так как по гипотезе Кирхгофа о недеформируемой нормали в тонкостенных конструкциях [16] напряжения по толщине стенки считаются однородными и погрешность такого подхода составляет менее 1 %.

Так как все элементы конструкции кузова легкого автомобиля изготовлены из листовой стали (или алюминия), можно при анализе деформаций в них пренебрегать изменением напряженно-деформированного состояния в направлении, нормальном к исследуемой поверхности.

В этом случае энергия удара выразится в виде:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{уд} &= M_{\sigma} l \cos \alpha = \\ &= M_{\sigma} l \frac{l_1}{\sqrt{2} l} = \frac{1}{\sqrt{2}} M_{\sigma} l_1, \end{aligned} \quad (11)$$

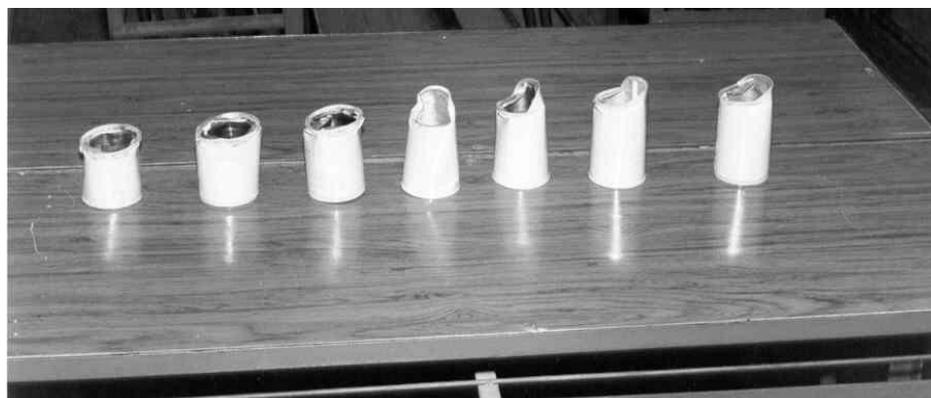


Рис. 2. Деформированные образцы
Fig. 2. Deformed samples

где l_1 – расстояние от сменного бойка до массивного основания копра.

Деформированные образцы (рис. 2) были подвергнуты тщательному обмеру по всем узлам координатной сетки.

До деформации узлы сетки имели следующие координаты:

$$x_{ij}^0 = 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 \text{ мм};$$

$$r_{ij}^0 = 32,5 \text{ мм}$$

для всех сечений.

$$\Theta_{ij}^0 = 0^0, 30^0, 60^0, 90^0, 120^0, 150^0, 180^0, 210^0, 240^0,$$

$$270^0, 300^0, 330^0, 360^0.$$

Представлены координаты узлов образцов 1–7 после деформации (табл. 1–7), где в каждой ячейке, соответствующей номеру узла по x (индекс i) и по Θ (индекс j), представлены координаты узлов A_{ij} , x_{ij} , r_{ij} , Θ_{ij} (без верхнего индекса).

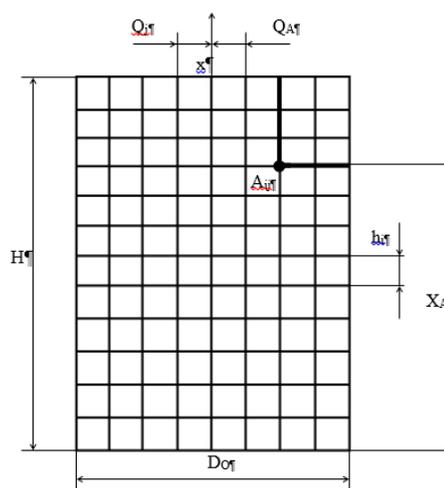


Рис. 1. Образец с сеткой элементов
Fig. 1. Sample with a grid of elements

Таблица 1. Координаты узлов образца 1
Table 1. Coordinates of nodes of sample 1

j	i												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	x ₀₀ =0 r ₀₀ =32,5 Θ ₀₀ =0	0 32,5 30	0 32,5 60	0 32,5 90	0 32,5 120	0 32,5 150	0 32,5 180	0 32,5 210	0 32,5 240	0 32,5 270	0 32,5 300	0 32,5 330	0 32,5 360
1	x ₁₀ =25 r ₁₀ =32,5 Θ ₁₀ =0	25 32,5 30	25 32,5 60	25 32,5 90	25 32,5 120	25 32,5 150	25 32,5 180	25 32,5 210	25 32,5 240	25 32,5 270	25 32,5 300	25 32,5 330	25 32,5 360
2	x ₂₀ =50 r ₂₀ =32,5 Θ ₂₀ =0	50 30 32	49 28 55	49 24 87	40 25 122	40 23 145	40 24 177	40 24 201	49 27 223	47 32 264	48 34 302	49 35 322	49 31 345
3	x ₃₀ =75 r ₃₀ =32,5 Θ ₃₀ =0	70 28 35	68 32 53	67 31 90	66 31 118	69 29 144	67 35 167	71 36 205	73 37 225	70 35 265	72 28 298	69 27 305	68 27 352
4	x ₄₀ =100 r ₄₀ =32,5 Θ ₄₀ =0	87 35 37	95 38 66	93 36 87	92 28 117	86 25 140	82 24 168	83 27 200	84 31 243	92 37 268	96 39 311	95 35 323	93 34 358
5	x ₅₀ =125 r ₅₀ =32,5 Θ ₅₀ =0	118 31 27	117 30 58	115 32 77	121 32 113	122 30 142	116 28 165	115 27 212	119 25 223	122 26 248	120 28 302	121 32 315	123 35 344
6	x ₆₀ =150 r ₆₀ =32,5 Θ ₆₀ =0	131 26 23	138 27 28	135 34 88	132 33 119	135 31 135	127 38 167	121 39 197	123 35 221	120 33 238	121 28 293	124 31 305	131 33 320
7	x ₇₀ =175 r ₇₀ =32,5 Θ ₇₀ =0	170 23 22	168 27 65	161 29 98	158 33 126	155 36 164	154 37 177	150 42 202	149 40 241	152 42 257	156 37 296	163 34 322	170 31 237

Таблица 2. Координаты узлов образца 2
Table 2. Coordinates of nodes of sample 2

j	i												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	x ₀₀ =0 r ₀₀ =32,5 Θ ₀₀ =0	0 32,5 30	0 32,5 60	0 32,5 90	0 32,5 120	0 32,5 150	0 32,5 180	0 32,5 210	0 32,5 240	0 32,5 270	0 32,5 300	0 32,5 330	0 32,5 360
1	x ₁₀ =25 r ₁₀ =32,5 Θ ₁₀ =0	25 32,5 30	25 32,5 60	25 32,5 90	25 32,5 120	25 32,5 150	25 32,5 180	25 32,5 210	25 32,5 240	25 32,5 270	25 32,5 300	25 32,5 330	25 32,5 360
2	x ₂₀ =50 r ₂₀ =32,5 Θ ₂₀ =0	50 32,5 30	50 32,5 60	50 32,5 90	50 32,5 120	50 32,5 150	50 32,5 180	50 32,5 210	50 32,5 240	50 32,5 270	50 32,5 300	50 32,5 330	50 32,5 360
3	x ₃₀ =75 r ₃₀ =32,5 Θ ₃₀ =0	70 28 34	67 33 55	67 31 92	62 31 118	63 28 145	67 33 167	69 34 207	71 31 225	73 32 255	72 29 297	69 28 310	69 27 355

4	$x_{10} = 100$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	92 34 37	95 37 66	91 36 87	92 27 117	88 25 140	86 22 168	83 25 200	84 29 243	90 30 268	92 32 311	95 33 323	93 34 358
5	$x_{10} = 125$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	115 30 27	117 27 57	116 26 75	121 28 115	120 32 145	117 35 164	115 32 212	118 34 223	121 27 251	120 28 302	121 31 313	118 35 342
6	$x_{10} = 150$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	138 26 23	139 28 27	135 34 89	132 35 119	131 31 134	128 37 157	123 39 187	123 34 211	125 33 248	124 28 297	129 32 306	135 33 322
7	$x_{10} = 175$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	165 22 20	162 24 62	154 29 95	151 34 117	138 36 162	126 39 174	118 38 200	121 37 235	128 34 258	138 37 292	163 32 332	168 29 236

Таблица 3. Координаты узлов образца 3

Table 3. Coordinates of nodes of sample 3

j	i												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	$x_{00} = 0$ $r_{00} = 32,5$ $\Theta_{00} = 0$	0 32,5 30	0 32,5 60	0 32,5 90	0 32,5 120	0 32,5 150	0 32,5 180	0 32,5 210	0 32,5 240	0 32,5 270	0 32,5 300	0 32,5 330	0 32,5 360
1	$x_{10} = 25$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	25 32,5 30	25 32,5 60	25 32,5 90	25 32,5 120	25 32,5 150	25 32,5 180	25 32,5 210	25 32,5 240	25 32,5 270	25 32,5 300	25 32,5 330	25 32,5 360
2	$x_{20} = 50$ $r_{20} = 32,5$ $\Theta_{20} = 0$	50 32,5 30	50 32,5 60	50 32,5 90	50 32,5 120	50 32,5 150	50 32,5 180	50 32,5 210	50 32,5 240	50 32,5 270	50 32,5 300	50 32,5 330	50 32,5 360
3	$x_{10} = 75$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	70 28 30	68 34 57	67 31 92	65 32 117	65 28 146	67 32 174	69 31 208	72 31 235	73 30 265	72 29 295	68 27 318	69 27 352
4	$x_{10} = 100$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	95 33 37	94 37 67	92 36 85	92 28 119	87 24 143	84 23 169	82 25 207	84 28 241	91 30 265	92 31 308	94 33 325	93 34 354
5	$x_{10} = 125$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	117 30 27	119 29 57	116 26 75	120 27 115	121 32 145	114 34 164	112 32 212	110 33 223	113 28 251	116 28 302	116 31 313	118 32 342
6	$x_{10} = 150$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	138 26 23	135 28 27	134 34 88	132 35 119	127 31 136	125 37 157	119 39 187	123 34 212	125 33 248	124 28 297	129 32 308	133 33 332
7	$x_{10} = 175$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	155 26 26	152 28 62	147 29 94	127 34 116	118 35 160	114 36 176	111 38 202	102 34 237	98 32 268	105 35 282	133 32 332	152 34 246

Таблица 4. Координаты узлов образца 4
Table 4. Coordinates of nodes of sample 4

j	i												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	$x_{00} = 0$ $r_{00} = 32,5$ $\Theta_{00} = 0$	0 32,5 30	0 32,5 60	0 32,5 90	0 32,5 120	0 32,5 150	0 32,5 180	0 32,5 210	0 32,5 240	0 32,5 270	0 32,5 300	0 32,5 330	0 32,5 360
1	$x_{10} = 25$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	25 32,5 30	25 32,5 60	25 32,5 90	25 32,5 120	25 32,5 150	25 32,5 180	25 32,5 210	25 32,5 240	25 32,5 270	25 32,5 300	25 32,5 330	25 32,5 360
2	$x_{20} = 50$ $r_{20} = 32,5$ $\Theta_{20} = 0$	50 32,5 30	50 32,5 60	50 32,5 90	50 32,5 120	50 32,5 150	50 32,5 180	50 32,5 210	50 32,5 240	50 32,5 270	50 32,5 300	50 32,5 330	50 32,5 360
3	$x_{30} = 75$ $r_{30} = 32,5$ $\Theta_{30} = 0$	67 25 31	65 33 62	67 30 96	65 32 115	61 28 142	62 32 176	65 32 208	69 31 235	70 30 263	68 27 294	65 27 318	64 25 355
4	$x_{40} = 100$ $r_{40} = 32,5$ $\Theta_{40} = 0$	96 33 37	94 37 69	95 36 84	93 28 117	88 24 147	84 23 169	84 25 210	80 29 244	90 32 265	92 31 309	91 35 325	92 34 350
5	$x_{50} = 125$ $r_{50} = 32,5$ $\Theta_{50} = 0$	116 30 27	119 29 57	115 26 75	120 27 115	121 33 145	113 35 164	112 32 212	110 33 223	113 29 251	116 28 302	116 31 313	118 30 342
6	$x_{60} = 150$ $r_{60} = 32,5$ $\Theta_{60} = 0$	125 26 24	126 27 55	124 34 82	122 34 120	117 31 141	106 37 162	105 35 185	82 34 215	84 32 246	90 28 297	110 32 308	120 34 342
7	$x_{70} = 175$ $r_{70} = 32,5$ $\Theta_{70} = 0$	135 28 27	132 26 65	127 29 90	124 34 111	119 33 150	111 36 172	109 37 206	86 33 238	89 32 258	94 35 292	112 34 342	122 34 352

Таблица 5. Координаты узлов образца 5
Table 5. Coordinates of nodes of sample 5

j	i												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	$x_{00} = 0$ $r_{00} = 32,5$ $\Theta_{00} = 0$	0 32,5 30	0 32,5 60	0 32,5 90	0 32,5 120	0 32,5 150	0 32,5 180	0 32,5 210	0 32,5 240	0 32,5 270	0 32,5 300	0 32,5 330	0 32,5 360
1	$x_{10} = 25$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	25 32,5 30	25 32,5 60	25 32,5 90	25 32,5 120	25 32,5 150	25 32,5 180	25 32,5 210	25 32,5 240	25 32,5 270	25 32,5 300	25 32,5 330	25 32,5 360
2	$x_{20} = 50$ $r_{20} = 32,5$ $\Theta_{20} = 0$	50 32,5 30	50 32,5 60	50 32,5 90	50 32,5 120	50 32,5 150	50 32,5 180	50 32,5 210	50 32,5 240	50 32,5 270	50 32,5 300	50 32,5 330	50 32,5 360

3	$x_{10} = 75$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	63 25 30	62 32 62	65 30 94	63 30 116	61 28 144	62 32 172	65 31 208	61 31 234	62 30 262	64 28 298	65 27 324	63 26 357
4	$x_{10} = 100$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	90 33 34	92 36 70	93 37 94	92 29 122	87 25 137	85 24 178	85 26 213	82 29 246	89 31 266	90 33 315	90 35 325	92 34 352
5	$x_{10} = 125$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	92 30 27	91 28 58	81 26 75	69 26 117	62 34 145	61 35 166	60 31 214	65 33 224	70 29 252	77 27 302	85 31 315	91 33 345
6	$x_{10} = 150$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	96 26 25	86 27 57	80 35 83	72 34 120	66 31 144	65 36 163	62 34 185	67 35 216	72 33 248	80 29 302	88 32 321	95 35 353
7	$x_{10} = 175$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	98 28 27	87 26 65	81 29 90	74 34 111	69 33 150	67 36 172	64 37 206	70 33 238	74 32 258	84 35 292	92 34 342	97 34 348

Таблица 6. Координаты узлов образца 6

Table 6. Coordinates of nodes of sample 6

j	i													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0	$x_{00} = 0$ $r_{00} = 32,5$ $\Theta_{00} = 0$	0 32,5 30	0 32,5 60	0 32,5 90	0 32,5 120	0 32,5 150	0 32,5 180	0 32,5 210	0 32,5 240	0 32,5 270	0 32,5 300	0 32,5 330	0 32,5 360	
1	$x_{10} = 25$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	25 32,5 30	25 32,5 60	25 32,5 90	25 32,5 120	25 32,5 150	25 32,5 180	25 32,5 210	25 32,5 240	25 32,5 270	25 32,5 300	25 32,5 330	25 32,5 360	
2	$x_{20} = 50$ $r_{20} = 32,5$ $\Theta_{20} = 0$	48 32,5 30	49 32,5 62	51 32 91	49 31 120	47 32,5 152	48 32 180	50 31 212	50 30 241	48 30 273	47 32 302	50 32 331	49 32 358	
3	$x_{10} = 75$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	53 25 30	52 32 62	55 30 94	53 30 116	51 28 144	52 32 172	50 31 208	51 31 234	49 30 262	52 28 298	55 27 324	53 26 357	
4	$x_{10} = 100$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	55 33 33	55 37 70	52 37 95	50 29 122	50 26 137	53 24 179	50 26 214	51 30 248	50 34 268	53 33 313	56 35 326	54 35 355	
5	$x_{10} = 125$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	58 30 28	56 28 58	53 26 76	50 26 117	52 34 145	54 35 168	51 31 215	53 33 226	53 29 254	55 27 305	58 31 321	58 33 345	
6	$x_{10} = 150$ $r_{10} = 32,5$ $\Theta_{10} = 0$	62 29 24	58 26 58	55 33 85	53 34 122	53 32 137	55 37 157	52 34 177	54 37 212	55 35 245	60 30 305	61 32 326	62 33 357	

7	$x_{10} = 175$	64	59	57	54	55	57	55	56	57	62	65	63
	$r_{10} = 32,5$	29	26	30	32	32	35	35	33	33	35	33	34
	$\Theta_{10} = 0$	27	65	90	114	150	172	208	238	260	294	342	347

Таблица 7. Координаты узлов образца 7

Table 7. Coordinates of nodes of sample 7

j	i													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0	$x_{00} = 0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	$r_{00} = 32,5$	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	
	$\Theta_{00} = 0$	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	
1	$x_{10} = 25$	24	25	25	23	24	25	24	25	22	23	22	25	
	$r_{10} = 32,5$	32	32	31	32,5	32,5	32	31	30	32	32	31	31	
	$\Theta_{10} = 0$	31	62	94	122	150	180	212	240	271	302	328	359	
2	$x_{20} = 50$	48	49	51	49	47	48	50	50	48	47	50	49	
	$r_{20} = 32,5$	32,5	32,5	32	31	32,5	32	31	30	30	32	32	32	
	$\Theta_{20} = 0$	30	62	91	120	152	180	212	241	273	302	331	358	
3	$x_{30} = 75$	53	52	55	52	51	51	50	50	49	50	51	50	
	$r_{30} = 32,5$	25	32	30	30	28	32	31	30	30	28	27	26	
	$\Theta_{30} = 0$	30	62	94	115	146	177	204	234	262	294	325	356	
4	$x_{40} = 100$	53	54	54	51	51	52	48	48	47	51	52	52	
	$r_{40} = 32,5$	32	34	35	28	26	24	25	31	34	32	34	35	
	$\Theta_{40} = 0$	33	70	95	122	137	179	214	248	268	313	326	355	
5	$x_{50} = 125$	54	56	53	50	52	52	46	45	47	50	53	52	
	$r_{50} = 32,5$	31	28	27	26	35	35	31	33	30	27	31	35	
	$\Theta_{50} = 0$	29	58	77	117	145	169	215	223	254	307	321	347	
6	$x_{60} = 150$	56	57	55	53	53	52	47	47	50	52	54	54	
	$r_{60} = 32,5$	30	26	33	33	31	34	33	35	35	31	32	33	
	$\Theta_{60} = 0$	25	62	87	127	147	167	179	215	247	315	328	359	
7	$x_{70} = 175$	58	57	56	54	55	54	48	50	52	54	55	56	
	$r_{70} = 32,5$	27	26	31	30	29	29	31	32	33	33	32	31	
	$\Theta_{70} = 0$	26	67	92	116	154	174	213	242	259	296	346	349	

Деформация образцов 1–7 производилась бойком массой $M_6 = 20,4$ кг, при отклонении его на расстояние $l_1 = 80...1200$ мм с частичным перекрытием на 50 % и с полным перекрытием. Энергия удара вычислялась по формуле (11). Представлены исходные данные эксперимента (табл. 8).

Для сравнения величин энергии удара (табл. 8) и найденных координатным методом [17] по данным таблиц замеров образцов были вычислены переме-

щения в прямоугольных координатах u_{ij}, v_{ij}, w_{ij} для каждого узла ij :

$$\begin{aligned} u_{ij} &= z_{ij}^0 - z_{ij}, \\ v_{ij} &= y_{ij}^0 - y_{ij}, \\ w_{ij} &= x_{ij}^0 - x_{ij}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $z_{ij}^0, y_{ij}^0, x_{ij}^0$ – координаты узлов недеформированного образца (см. рис. 1); z_{ij}, y_{ij}, x_{ij} – координаты узлов после деформации.

Таблица 8. Результаты определения энергии удара, затраченной на деформацию образцов

Table 8. Results of determining the impact energy spent on deformation of samples

№ образца	Энергия удара, Дж	Перекрытие, %
1	141,84	50
2	155,2	50
3	180,7	50
4	200,3	100
5	210,8	100
6	221,6	100
7	235,7	100

Для удобства вычислений был совершен переход от цилиндрических координат r, Θ, x к декартовым по формулам:

$$\begin{aligned}x_{ij} &= x_{ij}, \\z_{ij} &= r_{ij} \cos \Theta_{ij}, \\y_{ij} &= r_{ij} \sin \Theta_{ij}.\end{aligned}$$

Представлены окончательные результаты (табл. 9).

Таблица 9. Сравнение экспериментальных и расчетных значений (координатным методом) определения энергии деформации образцов

Table 9. Comparison of experimental and estimated values (by the coordinate method) for determining the deformation energy of samples

Показатель	№ образца						
	1	2	3	4	5	6	7
$\mathcal{E}_{уд}, \text{ Дж}$	141,84	155,2	180,7	200,3	210,8	221,6	235,7
$\mathcal{E}_д, \text{ Дж}$	118,1	131,4	155,7	173,7	189,4	203,8	211,3
$\Delta \mathcal{E}, \%$	16,7	15,4	13,8	13,2	10,1	8,1	10,3

Величина $\mathcal{E}_{yд}$ взята из (табл. 8), а величина $\mathcal{E}_д$ содержит в себе также 5 % упругой составляющей и 15 % потерь на тепловые преобразования.

Погрешность $\Delta \mathcal{E} < 14 \%$ является результатом погрешности измерений.

Были проведены испытания на удар следующих элементов конструкций: двери, бампер, лонжероны, порог, стойки.

Верхняя часть двери была деформирована локальным ударом $\mathcal{E}_{yд} = 200 \text{ Дж}$.

Количество поглощенной энергии устанавливалось методом смещенного объема. Для определения зоны распространения пластической деформации был произведен металлографический анализ структуры зоны деформации. Границей зоны считались участки, на которых отсутствует ориентация зерен металла (число ориентированных зерен 2 % на 1 мм^2).

В результате был найден смещенный объем и $\mathcal{E}_д = 182,35 \text{ Дж}$.

Отличие результатов эксперимента и вычисления

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{200 - 182,35}{182,35} \cdot 100\% = 9,68 \%$$

Аналогичный эксперимент был проведен с бампером.

Погрешность составила

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{200 - 178,81}{178,81} \cdot 100\% = 11,85 \%$$

Заключение

Подводя итог, необходимо отметить, что в результате исследований была разработана общая последовательность действий при проведении экспериментов по оценке погрешности определения скорости транспортного средства перед столкновением по остаточным деформациям в результате ДТП с возможными вариантами математического расчета энергии деформации.

Разработанная методика позволяет с заданной энергией удара деформировать различные элементы конструкции автомобиля, макеты, опытные образцы.

Проведенные эксперименты показали, что основные методы определения поглощенной энергии дают погрешность не более 14 %, при этом повышение точности измерений деформированного объекта позволяет повысить точность результата.

Список литературы

1. Совершенствование методов автотехнической экспертизы при дорожно-транспортных происшествиях : монография / В.П. Волков, В.А. Ксенофонтова, В.Н. Торлин и др. Харьков : Изд-во ХНАДУ, 2010. 476 с.
2. Повышение точности определения скорости при столкновении двух автомобилей / Е.В. Яковенко, А.В. Бабкин, А.А. Ветрогон // Вісник СевНТУ. 2013. № 142. С. 206–210.
3. Аблаев А.Р. Критерии эффективности оборудования (элементов систем) // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. № 4–1(336). С. 59–65.
4. Гольчевский В.Ф., Жигалов Н.Ю., Гольчевская Н.Ю. Экспертное исследование прочностных свойств кузовов транспортных средств, подвергшихся конструктивным изменениям : монография. Иркутск : ВСИ МВД РФ, 2015. С. 56–69.

5. Оптимизация прочности каркаса салона автомобиля при фронтальном ударе с использованием программного обеспечения решения задач линейной статики / А.Р. Кирсанов, С.К. Хализов, С.А. Курдюк и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Конструирование и технология. М. : МГТУ, 2005. № 3. С. 119–126.
6. Sun Liqing, Lin Yi, Sun Fengchun Simulation of restraint system performance upon the occupant's response during impact // *J. Beijing Inst. Technol.* 1999. Vol. 8. № 2. Pp. 207–213.
7. Bruce F. McNally, Wade Bartlett. 20th Annual Special Problems in Traffic Crash Reconstruction at the Institute of Police Technology and Management. Jacksonville, Florida : University of North Florida, 2002.
8. Hiemer M., Barrho J. Observer design for road gradient estimation // *Reports in Industrial Information Technology.* 2004. Vol. 7. Pp. 23–30.
9. Cliff W., Moser A. Reconstruction of Twenty Staged Collisions with PC–Crash's Optimizer. 2001. SAE 2001–01–0507.
10. Becker T., Reade M., Scurlock B. Simulations of Pedestrian Impact Collisions with Virtual CRASH 3 // *Accident Reconstruction Journal.* 2016. Vol. 26. № 2. URL: <http://arxiv.org/abs/1512.00790>.
11. Nurkhaliesha Balqis Hamzah, Halim Setan, Zulkepli Majid. Reconstruction of traffic accident scene using close–range photogrammetry technique // *Geoinformation Science Journal.* 2010. Vol. 10. No. 1. Pp. 17–37.
12. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М. : Наука, 1987. 430 с.
13. Ксенофонтова В.А., Бабкин А.В., Торлин В.Н. Исследование процесса деформации кузова легкового автомобиля при наезде на неподвижное препятствие // *Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. Харьков : РИО ХГАДТУ, 2001. № 7–8. С. 36–38.*
14. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М. : Машиностроение, 1977. 423 с.
15. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М. : Металлургия, 1976. 488 с.
16. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости : пер. с англ. М. : Наука, 1979. 325 с.
17. Ксенофонтова В.А. Разработка метода определения скорости транспортного средства до столкновения в результате ДТП : дис. ... канд. техн. наук. Харьков, 2003. 226 с.

References

1. V.P. Volkov, V.A. Ksenofontova, V.N. Torlin et al. Sovershenstvovanie metodov avtotekhnicheskoi ekspertizy pri dorozhno-transportnykh proissheshtviyakh: monografiya [Improvement of methods of autotechnical expertise in road traffic accidents: a monograph]. Kharkov: Publishing house of KhNADU, 2010. 476 p.
2. Vetrogon A.A., Yakovenko E.V., Babkin A.V. Povyshenie tochnosti opredeleniya skorosti pri stolknovenii dvukh avtomobilei [Improving the accuracy of determining the speed in a collision of two cars] // *Visnik SevNTU [The Herald of SevNTU].* Sevastopol, 2013. No. 142. Pp. 206–210.
3. Ablaev A.R. Kriterii effektivnosti oborudovaniya (elementov sistem) [Equipment efficiency criteria (system elements)] // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology].* Oryol: Turgenev Oryol State University Publ., 2019. No. 4–1 (336). Pp. 59–65. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39217117pdf> (Accessed: November 06, 2019).
4. Gol'chevskii V.F., Zhigalov N.Yu., Gol'chevskaya N.Yu. Ekspertnoe issledovanie prochnostnykh svoystv kuzovov transportnykh sredstv, podverghshikhsya konstruktivnym izmeneniyam: monografiya [Expert study of the strength properties of vehicle bodies subjected to structural changes: a monograph]. Irkutsk: East-Siberian Institute of Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation Publ., 2015. Pp. 56–69.
5. Kirsanov A.R., Khalizov S.K., Kurdyuk S.A., Ivanov E.O., Ovchinnikov V.A. Optimizatsiya prochnosti karkasa salona avtomobilya pri frontal'nom udare s ispol'zovaniem programmnoho obespecheniya resheniya zadach lineinoi statiki [Optimization of the strength of the car interior frame during frontal impact using the software for solving linear statics problems] // *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. «Priboroostroenie». Konstruirovaniye i tekhnologiya [Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. "Instrument making". Design and technology].* Moscow: MSTU Publ., 2005. No. 3 Pp. 119–126. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-prochnosti-karkasa-salona-avtomobilya-pri-frontalnom-udare-s-ispolzovaniem-programmnogo-obespecheniya-resheniya-zadach> (Accessed: November 10, 2019).
6. Sun L., Lin Y., Sun F. Simulation of restraint system performance upon the occupant's response during impact // *J. Beijing Inst. Technol.* 1999. Vol. 8. No. 2. Pp. 207–213.
7. McNally B. F., Bartlett W., 20th Annual Special Problems in Traffic Crash Reconstruction at the Institute of Police Technology and Management, University of North Florida, Jacksonville, Florida, April 15–19, 2002.
8. Hiemer M., Barrho J. Observer design for road gradient estimation. *Reports in Industrial Information Technology*, Vol. 7, Shaker Verlag, Aachen, 2004. Pp. 23–30.
9. Cliff W. and Moser A. Reconstruction of Twenty Staged Collisions with PC–Crash's Optimizer, SAE 2001–01–0507, 2001.
10. Becker T., Reade M., Scurlock B. Simulations of Pedestrian Impact Collisions with Virtual CRASH 3, *Accident Reconstruction Journal.* 2016. Vol. 26. No. 2. URL: <http://arxiv.org/abs/1512.00790>.
11. Nurkhaliesha Balqis Hamzah, Halim Setan and Zulkepli Majid Reconstruction of traffic accident scene using close–range photogrammetry technique // *Geoinformation Science Journal.* 2010. Vol. 10. No. 1. Pp. 17–37.
12. Sedov L.I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike [Similarity and dimensional methods in mechanics]. Moscow: Nauka Publ., 1987. 430 p.
13. Ksenofontova V.A., Babkin A.V., Torlin V.N. Issledovanie protsesssa deformatsii kuzova legkovogo avtomobilya pri naезде na nepodvizhnoe prepyatstvie [Study of the process of deformation of the body of a car when hitting a stationary obsta-

cle] // *Sbornik nauchnykh trudov KhGADTU «Avtomobil'nyi transport» [Proceedings of KhADTU "Road transport"]*. No. 7–8 (2001). Pp. 36–38.

14. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem [Theory of metal forming]*. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977.

15. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivlenie plasticheskoi deformatsii metallov i spлавov [Resistance to plastic deformation of metals and alloys]*. Moscow: Metallurgiya Publ., 1976. 488 p.

16. Goodier J.N., Timoshenko S. P. *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill Education; 3rd edition, 608 p. [Russ. ed.: Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti*. Per. s angl. Moscow: Nauka, 1979]. 325 p.

17. Ksenofontova V.A. *Razrabotka metoda opredeleniya skorosti transportnogo sredstva do stolknoeniya v rezul'tate DTP: dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of a method for determining the speed of a vehicle before a collision as a result of an accident: Ph.D. (Engineering) diss.]* (05.22.20). KhNADU Publ., Kharkov, 2003. 226 p.

Информация об авторах

Ксенофонтова Виктория Анатольевна – к. т. н., доцент кафедры автомобильного транспорта, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, e-mail: vaksenofontova.v@gmail.com

Кияшко Лариса Александровна – старший преподаватель кафедры автомобильного транспорта, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, e-mail: LAKiyashko@sevsu.ru

Сопин Павел Константинович – к. т. н., доцент кафедры автомобильного транспорта, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, e-mail: PKSopin@sevsu.ru

Information about the authors

Victoria A. Ksenofontova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, the Subdepartment of Automobile Transport, Sevastopol State University, Sevastopol, e-mail: vaksenofontova.v@gmail.com

Larisa A. Kiyashko, Senior Lecturer of the Subdepartment of Automobile Transport, Sevastopol State University, Sevastopol, e-mail: LAKiyashko@sevsu.ru

Pavel K. Sopin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, the Subdepartment of Automobile Transport, Sevastopol State University, Sevastopol, e-mail: PKSopin@sevsu.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).70-80

УДК 621.311

Имитационная модель системы тягового электроснабжения для определения энергетических показателей в условиях работы систем накопления электроэнергии

В. Л. Незевак✉

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

✉ NezevakWL@mail.ru

Резюме

В статье рассматриваются вопросы имитационного моделирования работы систем тягового электроснабжения постоянного тока с применением систем накопления электроэнергии. Развитие имитационного моделирования позволяет исследовать влияние одного или ряда факторов на показатели работы системы тягового электроснабжения. К указанным факторам относят массу, техническую скорость, нагрузку на ось, рекуперативное торможение, особенности расписания для грузового движения и др. Моделирование позволяет оценить степень влияния одного или группы факторов на такие показатели работы, как напряжение на токоприемнике, нагрузочная способность силового оборудования, температура нагрева проводов и тросов, тяговое электропотребление, объем рекуперации энергии, технические потери и др. В настоящее время имитационное моделирование позволяет выполнить серию расчетов для получения статистической оценки влияния факторов на показатели (работы системы тягового электроснабжения), а также аналитического представления полученных зависимостей, необходимых для решения задач анализа и прогнозирования изменения показателей работы системы тягового электроснабжения этих показателей. В работе приводятся схемы многовариантных расчетов, выполняемых с целью оценки влияния параметров инфраструктуры, подвижного состава и организации движения на показатели работы систем тягового электроснабжения. Дополнение схем замещения, используемых в настоящее время для расчетов систем тягового электроснабжения, позволяет выполнять большинство расчетов по оценке влияния работы систем накопления электроэнергии на энергетические показатели и оценивать условия их работы. Особенностью расчета схем замещения систем тягового электроснабжения, содержащих устройства накопления электроэнергии, известными методами, в частности, методом узловых потенциалов, является необходимость учета их включенного и отключенного состояния, определяемого ограничениями мощности и энергоемкости, уровнем напряжения в контактной сети. Предложено дополнить существующие методы расчета алгоритмом расчета, учитывающим условия работы системы накопления. Метод расчетов позволяет оценить условия работы систем накопления с электротяговой нагрузкой, требования к их основным параметрам и влияние на показатели работы системы тягового электроснабжения.

Ключевые слова

система тягового электроснабжения, энергетические показатели, имитационное моделирование, методы расчета, алгоритм, схема замещения, системы накопления электроэнергии, степень заряженности.