

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 519.862.6, 624.014, 621.332.31

DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_188

*Л. А. Астраханцев, М. П. Базилевский, О. В. Лобанов, В. П. Ступицкий***РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Аннотация. Рассмотрена разработка математических моделей напряженно-деформированного состояния металлических опор контактной сети железных дорог. В качестве математического аппарата использованы методы теории планирования эксперимента. Напряженно-деформированное состояние характеризуется максимальным напряжением в элементе по Мизесу, максимальным продольным нормальным сжатым и растянутым напряжением, деформацией элемента. Входными переменными выступают сжимающая/растягивающая сила, наличие повреждения на элементе, его длина и площадь поперечного сечения, дополнительная сила в поперечном направлении. Проведен полный факторный эксперимент из 32 опытов. Опыты проведены с использованием программного комплекса конечноэлементного моделирования Femap. По результатам опытов с помощью эконометрического пакета Gretl построены четыре математических модели регрессионного типа. С их помощью выявлены факторы, оказывающие наиболее сильное влияние на напряженно-деформированное состояние.

Ключевые слова: контактная сеть, опоры, железная дорога, напряженно-деформированное состояние, теория планирования эксперимента, математическая модель.

Для цитирования: Разработка математических моделей напряженно-деформированного состояния металлических опор контактной сети железных дорог методами теории планирования эксперимента / Л. А. Астраханцев, М. П. Базилевский, О. В. Лобанов, В. П. Ступицкий // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 188–195. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_188.

Введение

Эффективным инструментом в научных исследованиях является теория планирования эксперимента (ТПЭ) [1, 2], основная задача которой – выбор числа и условий проведения опытов, методов математической обработки их результатов для принятия решений. ТПЭ широко применяется в различных отраслях науки, требующих проведения контролируемых исследований: в физике, химии, биологии, инженерии, экономике и т.д. Так, например, в [3] с помощью ТПЭ построены математические модели расчета оптимального напряжения системы внешнего электроснабжения газовых месторождений, в [4] – модель влияния параметров воздушной среды рабочих помещений на интенсивность испарения опасных химических веществ с поверхности пролива, в [5] – модель влияния сырья на получение комплексного CO₂-экстракта, в [6] – модели зависимости величин токов поврежденного асинхронного генератора от расположения точки короткого замыкания внутри обмотки статора, в [7] – модель однофазного асинхронного электродвигателя для судовых систем автоматизации, в [8] – модель влияния некоторых факторов на глубину реза при лазерной резке, в [9] благодаря математической модели, созданной на основе регрессионного анализа, появляется возможность определять потенциалы заземляющих устройств при различных поездных ситуациях, в [10] проанализирован случайный тяговый процесс и выявленные значимые факторы на тяговое электропотребление.

Одной из основных целей стратегии развития холдинга открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2030 года является увеличение скорости движения поездов и повышение их массы с сохранением эффективности и безопасности движения поездов [11]. В связи с этим повышаются требования к своевременному определению изменения технического состояния устройств контактной сети.

Одним из основных элементов контактной сети являются опоры. Отказ опоры контактной сети и потери ею несущей способности могут сопровождаться непредсказуемыми последствиями, которые оказывают влияние на безопасность движения поездов. Правильно оценить состояние и остаточный ресурс устройств контактной сети без привлечения специализированных организаций – сложнейшая задача для персонала дистанций электроснабжения.

Существующие методы диагностики металлических опор контактной сети [12] не учитывают необходимость определения изменения факторов, которые влияют на остаточную несущую способность. Актуальной задачей становится разработка новых методик диагностики опорных конструкций.

Анализ статистических данных показывает увеличение дефектов, связанных с металлическими конструкциями. Одними из самых распространенных повреждений металлических опор являются погнутости, которые представляют собой деформацию элементов конструкции [13]. Сложность влияния данного дефекта на оценку технического состояния заключается в определении режима работы элемента, на котором находится повреждение. Согласно указанию по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети [14], дефекты, расположенные на конструкциях с работой на сжатие, имеют меньший допуск на величину погнутости. Это связано с тем, что сжатые элементы быстрее теряют состояние равновесия и, как правило, с отрицательной динамикой развития состояния, что приводит к нарушению целостности конструкции. К сожалению, современные методики не учитывают изменение состояния, нетипичные повреждения опорных конструкций и способ оценки остаточной несущей способности.

В связи с этим целью данной работы является разработка на основе методов ТПЭ математических моделей влияния различных факторов на напряженно-деформированное состояние отдельных элементов металлических опорных конструкций контактной сети железных дорог.

Отбор входных и выходных переменных

Для правильной оценки технического состояния в процессе эксплуатации необходимо понимать причины возникновения повреждений. На контактной сети имеется большое количество факторов, вызывающих появление повреждений опорных конструкций. Все эти факторы можно разделить на три группы: климатические, эксплуатационные и случайные. Но, к сожалению, количественно оценить перечисленные факторы проблематично.

Рассматривая металлическую ферменную опору (рис. 1), можно пояснить, что нагрузка, действующая на нее, изменяется под воздействием внешних факторов.

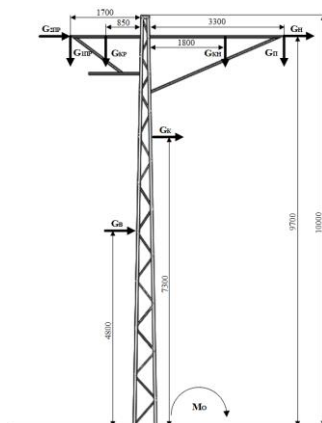


Рис. 1. Схема опоры М6/10

На расчетной схеме плечи сил приведены в соответствии с размерами опоры, размерами типовых консолей и типовых кронштейнов, также представлены нагрузки, которые приложены к опоре в процессе эксплуатации:

$G_{\text{п}}$ – вертикальная нагрузка от веса контактной подвески, Н;

$G_{\text{к}}$ – нагрузка от изменения направления проводов, Н;

$G_{\text{кн}}$ – нагрузка от веса консоли, Н;

$G_{\text{кр}}$ – нагрузка от веса кронштейна, Н;

$G_{1\text{пр}}$ – вертикальная нагрузка от веса проводов, расположенных на кронштейне, Н;

$G_{2\text{пр}}$ – нагрузка от давления ветра на провода, расположенные на кронштейне, Н;

$G_{\text{в}}$ – нагрузка от давления ветра на поверхность опоры, Н;

$G_{\text{н}}$ – суммарная горизонтальная нагрузка от давления ветра на несущий трос и контактный провод, Н;

M_0 – момент в основании опоры, возникающий из-за работы грунта, Н/м.

Все представленные нагрузки изменяются под действием климатических факторов, процесса движения поездов и режима работы устройств контактной сети. При этом возникают сложности с определением степени их влияния на несущую способность. Что в свою очередь может привести к появлению повреждений или разрушению конструкции.

Для решения данной проблемы рассмотрим влияние факторов на отдельные элементы конструкций, а именно: раскосов, поясов и фрагментов стоек металлических опор контактной сети. И в первую очередь необходимо выявить, какие параметры будут изменять их напряжено-деформированное состояние.

Рассмотрим основные влияющие параметры фрагмента металлической опоры (стойка, раскос или пояс):

1 Внешняя продольная сила или сумма действующих сил. Основной фактор, влияющий на внутренние напряжения в элементах металлических конструкций.

2 Наличие дефектов на конструкции. Один из них – это дефект типа погнутость конструктивных элементов, возникающий в следствие нарушений в процессе эксплуатации или случайных механических повреждений. Данный дефект в свою очередь может повысить внутреннее напряжение в элементе и возможно меняет его характер.

3 Геометрические размеры конструктивного элемента. К ним будут относиться: длина элемента, его поперечное сечение, а именно форма и площадь. От этих факторов будет зависеть величина и распределение внутреннего напряжения.

Таким образом, для построения математических моделей было принято решение использовать следующие управляющие входные переменные:

x_1 – сжимающая или растягивающая сила, которая действует на металлический элемент конструкции, Н;

x_2 – наличие повреждения на элементе;

x_3 – длина исследуемого элемента, мм;

x_4 – площадь поперечного сечения, мм²;

x_5 – влияние дополнительной силы в поперечном направлении, Н.

В качестве выходных переменных, характеризующих напряженно-деформированное состояние металлических опор контактной сети, были выбраны следующие:

y_1 – максимальное напряжение в элементе по Мизесу, МПа;

y_2 – максимальное продольное нормальное сжатое напряжение, МПа;

y_3 – максимальное продольное нормальное растянутое напряжение, МПа;

y_4 – деформация элемента, мм.

Планирование эксперимента

Проводился полный факторный эксперимент типа 2^5 , т.е. каждый фактор рассматривался лишь на верхнем и нижнем уровне. Общее число опытов в этом случае составило 32. Опыты проводились с использованием программного комплекса конечноэлементного моделирования Femap [15]. Программа позволяет выполнять расчеты статических напряжений и деформаций, устойчивости, определения собственных частот и форм колебаний, анализа тепловых установившихся и переходных процессов, а также задач статики и динамики в нелинейной постановке для широкого класса машиностроительных и других конструкций.

Femap позволяет достоверно определять изменения внутренних напряжений в элементах и при этом сохранять высокий уровень повторяемости исследования. Для проведения опытов сначала была создана трехмерная модель (рис. 2) фрагмента стойки металлической опоры, а затем осуществлялось разбиение на конечные элементы.

Характеристики материала были приняты для стали марки 09Г2С, из которой изготавливалась опора. Материал опорной металлоконструкции моделировался изотропной средой. Были заданы следующие характеристики материала:

- модуль упругости $E = 210000$ МПа – отношение напряжения к деформации сжатия (удлинения);
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,28$ – абсолютная величина отношения поперечной и продольной относительной деформации образца материала;
- плотность материала $\rho = 7,89 \cdot 10^{-9}$ т/мм³.

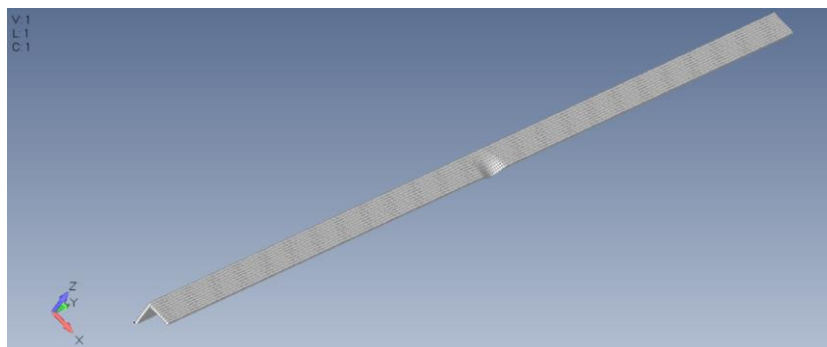


Рис. 2. Модель фрагмента металлической опоры с повреждением

В системе Femap в каждом опыте сначала задавались значения входных переменных x_1, x_2, x_3, x_4 и x_5 , после чего фиксировались значения выходных переменных y_1, y_2, y_3, y_4 . Значение переменных брались из фактически используемых элементов и измеренной нагрузки на них. Условия проведения опытов представлены в таблице.

Условия проведения опытов

Характеристика плана	$x_1, \text{Н}$	x_2	$x_3, \text{мм}$	$x_4, \text{мм}^2$	$x_5, \text{Н}$
Нижний уровень x_j^-	-10000	0	1	1	0
Верхний уровень x_j^+	10000	1	2	2	100
Нулевой уровень x_j^0	0	0,5	1,5	1,5	50
Интервал варьирования λ_j	10000	0,5	0,5	0,5	50

В таблице нулевые уровни находятся по формулам $x_j^0 = \frac{x_j^+ + x_j^-}{2}$, $j = \overline{1,5}$, а интервалы варьирования – по формулам $\lambda_j = \frac{x_j^+ - x_j^-}{2}$, $j = \overline{1,5}$.

После проведения опытов осуществлялось кодирование входных переменных по формулам $z_j = \frac{x_j - x_j^0}{\lambda_j}$, $j = \overline{1,5}$:

$$z_1 = \frac{x_1}{10000}, z_2 = \frac{x_2 - 0,5}{0,5}, z_3 = \frac{x_3 - 1,5}{0,5}, z_4 = \frac{x_4 - 1,5}{0,5}, z_5 = \frac{x_5 - 50}{50}.$$

При таком кодировании переменные z_j , $j = \overline{1,5}$ будут принимать значения «-1» на нижнем уровне, и «+1» – на верхнем.

После чего с помощью метода наименьших квадратов для каждой выходной переменной оценивалась регрессионная модель следующего вида:

$$y_i = b_0 + \sum_{j=1}^{15} b_j z_{ij} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1,32}, \quad (1)$$

где $z_6 = z_1 z_2$, $z_7 = z_1 z_3$, $z_8 = z_1 z_4$, $z_9 = z_1 z_5$, $z_{10} = z_2 z_3$, $z_{11} = z_2 z_4$, $z_{12} = z_2 z_5$, $z_{13} = z_3 z_4$, $z_{14} = z_3 z_5$, $z_{15} = z_4 z_5$ – взаимодействия переменных; b_0, b_1, \dots, b_{15} – неизвестные параметры; $\varepsilon_i, i = \overline{1, n}$ – ошибки аппроксимации. Для оценивания моделей (1) применялся эконометрический пакет Gretl [16].

Завершив оценивание, для каждой модели была реализована процедура исключения незначимых по t -критерию Стьюдента [16] коэффициентов при входных переменных. Уровень значимости α задавался равным 0,1. В результате были построены следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1 = & 150,419 - 12,028 z_1 + 12,228 z_2 + 27,117 z_3 - 80,807 z_4 + 82,833 z_5 - \\ & - 12,028 z_9 - 19,582 z_{13} + 33,773 z_{14} - 60,291 z_{15}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}_2 = & 120,075 + 29,21 z_1 + 20,233 z_2 + 20,537 z_3 - 61,611 z_4 + 68,117 z_5 - \\ & - 17,133 z_8 - 14,182 z_{13} + 29,77 z_{14} - 50,822 z_{15}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}_3 = & -129,427 + 36,023 z_1 - 15,971 z_2 - 27,057 z_3 + 69,816 z_4 - 77,468 z_5 - \\ & - 11,752 z_8 + 13,956 z_9 + 19,03 z_{13} - 36,291 z_{14} + 59,027 z_{15}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}_4 = & 33,177 + 25,563 z_3 - 27,155 z_4 + 32,762 z_5 - \\ & - 21,048 z_{13} + 25,484 z_{14} - 27,037 z_{15}. \end{aligned} \quad (5)$$

В моделях (2)–(5) в скобках под коэффициентами указаны наблюдаемые значения t -критерия Стьюдента, подтверждающие значимость переменных.

Значения коэффициентов детерминации R^2 моделей (2)–(5) равны 0,9604, 0,9410, 0,9541 и 0,9065 соответственно. Все эти значения, за исключением модели (5), довольно близки к единице, поэтому можно сделать вывод о достаточно высоком качестве построенных регрессий. Графики фактических и расчетных по моделям (2)–(5) значений выходных переменных в зависимости от номера опыта представлены на рис. 3.

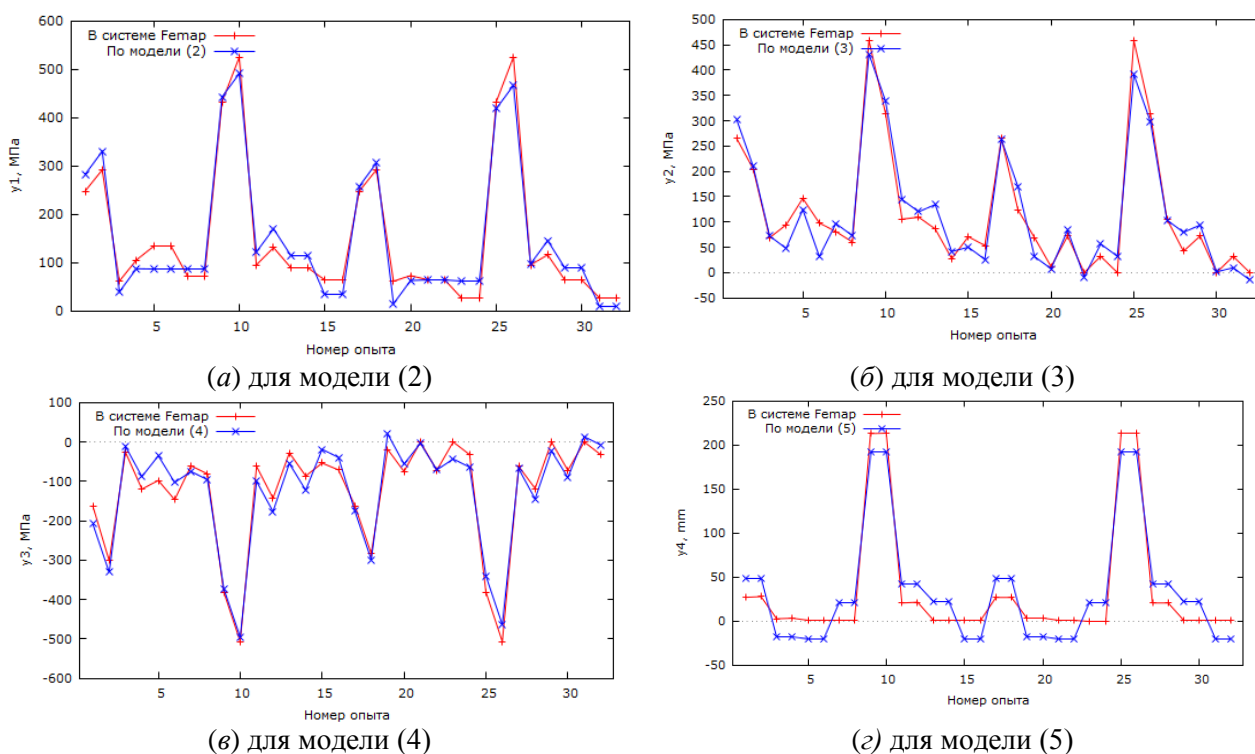


Рис. 3. Графики фактических и расчетных по моделям значений выходных переменных

Из рис. 3 видно, что расчетные по моделям значения выходных переменных практически совпадают с фактическими, полученными в системе Femar.

Заключение

В работе построены в достаточной мере точные математические модели (2)–(5) зависимости напряженно-деформированного состояния металлических опор контактной сети железных дорог от различных факторов. Достоинством построенных моделей является то, что, в отличие от расчетов с помощью Femar, в распоряжение исследователя поступают аналитические выражения, которые можно анализировать и с помощью которых можно мгновенно получить прогнозы напряженно-деформиро-

ванного состояния металлических опор в зависимости от входных величин. В связи с этим уменьшаются трудозатраты на проведение диагностики и отсутствует необходимость в моделировании каждого элемента и повреждения. Установлено, что во всех моделях наиболее сильное влияние на напряженно-деформированное состояние оказывает влияние дополнительной силы в поперечном направлении (x_5), площадь поперечного сечения стойки опоры (x_4), а также их взаимодействие (x_4x_5). Эти модели могут быть использованы в процессе диагностики для определения остаточного ресурса металлических опорных конструкций. Следующим этапом в исследовании будет разработка методики диагностики, основанная на построенных математических моделях зависимости напряженно-деформированного состояния. Модель, в свою очередь, может позволить перейти на систему обслуживания по фактическому техническому состоянию металлических конструкций контактной сети. Это позволит повысить безопасность и надежность движения поездов.

Список литературы

- 1 **Казakov, В. Г.** Планирование экспериментальных исследований и статистическая обработка данных. Основы научных исследований в промышленной теплоэнергетике / В. Г. Казakov, П. В. Луканин, Е. Н. Громова. – Санкт-Петербург : ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 95 с. – ISBN 978-5-91646-274-6.
- 2 **Гефан, Г. Д.** Основы теории эксперимента / Г. Д. Гефан, Н. К. Ширяева. – Иркутск : ИРГУПС, 2017. – 136 с. – EDN: YUPVHV.
- 3 **Богачков, И. М.** Математические модели расчета оптимального напряжения системы внешнего электроснабжения газовых месторождений, полученные с применением теории планирования эксперимента / И. М. Богачков // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 1(50). – С. 4–9. – DOI 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-4-9.
- 4 Планирование эксперимента при исследовании загрязнения воздушной среды производственных помещений / Т. Н. Швецова-Шиловская, О. В. Полехина, Д. Е. Иванов, Ф. И. Скворцов // Вычислительные технологии. – 2020. – Т. 25. – № 3. – С. 152–159. – DOI 10.25743/ICT.2020.25.3.016.
- 5 **Каминир, О. Н.** Исследование антиоксидантных свойств комплексного CO₂-экстракта методом математического планирования эксперимента / О. Н. Каминир, Г. И. Касьянов, О. В. Косенко // Биотехнологические, экологические и экономические аспекты создания безопасных продуктов питания специализированного назначения : материалы Международной научно-практической конференции, Краснодар, 22 мая 2020 г. – 2020. – С. 265. – ISBN 978-5-8333-0952-0.
- 6 **Соболь, А. Н.** Применение теории планирования эксперимента для анализа неисправностей автономных асинхронных генераторов гибридных электростанций / А. Н. Соболь, А. А. Андреева // The Scientific Heritage. – 2020. – № 53-1. – С. 57–63. – EDN EXNNGD.
- 7 **Каракаев, А. Б.** Разработка математической модели однофазного асинхронного электродвигателя для судовых систем автоматизации методами планирования эксперимента / А. Б. Каракаев,

References

- 1 **Kazakov, V. G.** Experimental research planning and statistical data processing. Fundamentals of scientific research in industrial thermal power engineering / V. G. Kazakov, P. V. Lukanin, E. N. Gromova. – Saint Petersburg : HSE SPbGUPTD, 2021. – 95 p. – ISBN 978-5-91646-274-6.
- 2 **Gefan, G. D.** Fundamentals of experimental theory / G. D. Gefan, N. K. Shiryayeva. – Irkutsk : ISTU, 2017. – 136 p. – EDN: YUPVHV.
- 3 **Bogachkov, I. M.** Mathematical Models for Calculating the Optimal Voltage of the External Electricity Supply System for Gas Fields Obtained Using the Experiment Planning Theory / I. M. Bogachkov // Electrotechnical systems and complexes. – 2021. – No. 1(50). – P. 4–9. – DOI 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-4-9.
- 4 Planning an experiment in the study of air pollution in industrial premises / T. N. Shvetsova-Shilovskaya, O. V. Polekhina, D. E. Ivanov, F. I. Skvortsov // Computational Technologies. – 2020. – Vol. 25. – No. 3. – P. 152–159. – DOI 10.25743/ICT.2020.25.3.016.
- 5 **Kaminir, O. N.** Research of antioxidant properties of complex CO₂ extract by the method of mathematical experiment planning / O. N. Kaminir, G. I. Kasyanov, O. V. Kosenko // Biotechnological, ecological and economic aspects of creating safe food for specialized purposes: materials of the International Scientific and Practical Conference, Krasnodar, May 22, 2020. – 2020. – P. 265. – ISBN 978-5-8333-0952-0.
- 6 **Sobol, A. N.** Application of planning theory experiment for fault analysis autonomous asynchronous generators of hybrid power plants / A. N. Sobol, A. A. Andreeva // The Scientific Heritage. – 2020. – No. 53-1. – P. 57–63. – EDN EXNNGD.
- 7 **Karakayev, A. B.** Development of a mathematical model of a single-phase asynchronous electric motor for ship automation systems by methods of experiment planning / A. B. Karakayev,

А. В. Костенко // Эксплуатация морского транспорта. – 2020. – № 1. – С. 154–164. – DOI 10.34046/aumsuomt94/24.

8 **Полях, Д. М.** Применение метода планирования эксперимента для изучения некоторых факторов, влияющих на глубину реза при лазерной резке / Д. М. Полях, М. И. Шейх-Заде, И. Д. Сефедин // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2019. – № 2. – С. 267–270. – EDN ONEGQQ.

9 **Алексеева, П. В.** Разработка математической модели защитных потенциалов металлических подземных сооружений с учетом влияния электрифицированного железнодорожного транспорта / П. В. Алексеева, К. В. Авдеева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4(88). – С. 239–246. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_239.

10 **Чирков, В. К.** Исследование случайного процесса тягового электропотребления / В. К. Чирков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1. – С. 169–173. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_169.

11 Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года («Белая книга» ОАО «РЖД») / ОАО «РЖД». – Москва, 2011. – 340 с.

12 **Селедцов, Э. П.** Эксплуатация опор контактной сети / Э. П. Селедцов, Е. А. Баранов. – Москва : Транспорт, 1970. – 96 с.

13 Определение остаточной несущей способности металлических опорных конструкций контактной сети / В. П. Ступицкий, И. А. Худонов, В. А. Тихомиров, О. В. Лобанов // Известия Транссиба / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3(39). – С. 88–99. – EDN LTKJFW.

14 Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети № 1047/р / Департамент электрификации и электрообеспечения ОАО «РЖД». – Москва, 2022. – 116 с.

15 Расчет несущей способности металлической решетчатой опоры контактной сети при кручении верхней части методом конечных элементов в САПР Femap / В. П. Ступицкий, И. А. Худонов, В. А. Тихомиров, О. В. Лобанов // Транспорт Урала / Уральский государственный университет путей сообщения. – Екатеринбург. – 2021. – № 1(68). – С. 99–102. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-1-99-102.

16 **Базилевский, М. П.** Эконометрика (продвинутый уровень) / М. П. Базилевский, Г. Д. Гефан. – Иркутск : ИрГУПС, 2016. – 76 с. – EDN YUPXML.

A. V. Kostenko // Operation of sea transport. – 2020. – No. 1. – P. 154–164. – DOI 10.34046/aumsuomt94/24.

8 **Poliakh, D. M.** Application of the method of experiment planning for studying some factors influencing machine cut depth at laser-beam cutting / D. M. Poliakh, M. I. Sheikh-Zade, I. D. Sefedin // Scientific Notes of the Crimean Engineering Pedagogical University. – 2019. – No. 2. – P. 267–270. – EDN ONEGQQ.

9 **Alekseeva, P. V.** Development of a mathematical model to maintain the protective potentials of metal underground structures taking into account the influence of the electrified railway transport / P. V. Alekseeva, K. V. Avdeeva // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 4. – P. 239–246. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_239.

10 **Chirkov, V. K.** Study of random process traction electric consumption / V. K. Chirkov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1. – P. 169–173. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_169.

11 Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030 ("White Book" of JSC "Russian Railways") / JSC "Russian Railways". – Moscow, 2011. – 340 p.

12 **Seledtsov, E. P.** Operation of overhead line supports / E. P. Seledtsov, E. A. Baranov. – Moscow : Transport, 1970. – 96 p.

13 Determination of residual bearing capacity of metal support structures of the contact network / V. P. Stupitsky, I. A. Khudonogov, V. A. Tikhomirov, O. V. Lobanov // Izvestiya Transsib / Omsk State University of Railways. – Omsk. – 2019. – No. 3(39). – P. 88–99. – EDN LTKJFW.

14 Instructions for maintenance and repair of support structures of the overhead line No. 1047/r / Department of Electrification and Power Supply of JSC "Russian Railways". – Moscow, 2022. – 116 p.

15 Calculation of bearing capacity of metal lattice catenary pole at torsion of the upper part by finite element method in Femap CAD / V. P. Stupitsky, I. A. Khudonogov, V. A. Tikhomirov, O. V. Lobanov / Transport of the Urals / Ural-Siberian State University. – Yekaterinburg. – 2021. – No. 1(68). – P. 99–102. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-1-99-102.

16 **Bazilevsky, M. P.** Econometrics (advanced level) / M. P. Bazilevsky, G. D. Gefan. – Irkutsk : ISTU, 2016. – 76 p. – EDN YUPXML.

L. A. Astrakhantsev, M. P. Bazilevsky, O. V. Lobanov, V. L. Stupitskiy

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF METAL SUPPORTS OF THE RAILWAY OVERHEAD LINE BY METHODS OF EXPERIMENTAL PLANNING THEORY

Abstract. The paper is devoted to the development of mathematical models of the stress-strain state of metal supports of the railway overhead line. The methods of the theory of experimental planning are used as a mathematical apparatus. The stress-strain state is characterized by the maximum Mises stress in the element, the maximum longitudinal normal compressed and stretched stress, and the deformation of the element. The input variables are the compressive/tensile force, the presence of damage on the element, its length and cross-sectional area, additional force in the transverse direction. A complete factorial experiment of 32 experiments was conducted. The experiments were carried out using the Femap finite element modeling software package. Based on the results of the experiments, four regression-type mathematical models were constructed using the Gretl econometric package. With their help, the factors that have the strongest influence on the stress-strain state have been identified.

Keywords: overhead line, supports, railway, stress-strain state, theory of experiment planning, mathematical model.

For citation: Development of mathematical models of the stress-strain state of metal supports of the railway overhead line by methods of experimental planning theory / L. A. Astrakhantsev, M. P. Bazilevsky, O. V. Lobanov, V. L. Stupitskiy // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 188–195. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_188.

Сведения об авторах

Астраханцев Леонид Алексеевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Электроэнергетика транспорта»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: astrahancev1943@mail.ru

Базилевский Михаил Павлович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Математика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: mik2178@yandex.ru

Лобанов Олег Викторович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Электроэнергетика транспорта»,
аспирант,
e-mail: oleg.6965@mail.ru

Ступицкий Валерий Петрович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Электроэнергетика транспорта»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: dokasvp@mail.ru

Information about the authors

Astrakhantsev Leonid Alekseevich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair «Electrical Power Industry of Transport»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: astrahancev1943@mail.ru

Bazilevsky Mikhail Pavlovich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair «Mathematics»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associated Professor,
e-mail: mik2178@yandex.ru

Lobanov Oleg Viktorovich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair «Electrical Power Industry of Transport»,
Postgraduate Student,
e-mail: oleg.6965@mail.ru

Stupitskiy Valeriy Petrovich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair «Electrical Power Industry of Transport»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associated Professor,
e-mail: dokasvp@mail.ru