УДК 629.047 EDN: ILKVZS

ПРОБЛЕМЫ ПОИСКА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДИТЕЛЯ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Р.Б. Гончаров goncharov.roman@bmstu.ru
В.Н. Зузов zuzov@bmstu.ru
Б.Б. Косицын kositsyn_b@bmstu.ru
Б.В. Падалкин padalkin@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Повышение пассивной безопасности легковых автомобилей является актуальной задачей снижения травматизма водителя и пассажиров. Активные элементы пассивной безопасности, такие как подушки и ремни, позволяют снизить вероятность летального исхода и получения тяжелых травм при дорожно-транспортных происшествиях. Поставлена задача определить рациональное расположение и параметры функционирования активных элементов системы пассивной безопасности водителя на примере кософронтального удара с перекрытием 40 % по Правилам ООН № 94. Для решения задачи использована метамодель на основе искусственной нейронной сети, которая прогнозирует критерии травмирования в зависимости от конструктивных параметров элементов безопасности. Для рационального решения применен метод многокритериальной оптимизации — генетический алгоритм. По результатам моделирования суммарная балльная оценка безопасности увеличилась в 2,2 раза, а улучшение отдельных критериев травмирования достигло 80 %. Основной прогресс получен благодаря уменьшению изгибающего момента в шее и прогиба грудной клетки, что стало возможным благодаря увеличению объема и оптимизации параметров газоприхода и газорасхода подушки безопасности в рулевом колесе. Подобранные параметры коленной подушки безопасности позволили снизить травматизм нижних конечностей. Анализ чувствительности с использованием кор-

Ключевые слова

Пассивная безопасность, легковой автомобиль, оптимизация, машинное обучение, подушка безопасности, ремень безопасности

реляционного метода Спирмена позволил количественно оценить влияние каждой проектной переменной на критерии травмирования. Наибольший вклад вносят объем и газорасход подушки безопасности в рулевом колесе, а также положение и газоприход коленной подушки

Поступила 01.11.2025
Принята 10.07.2026
© Автор(ы), 2026

Введение. Аварии легковых автомобилей вследствие кософронтального лобового столкновения относятся к наиболее опасным случаям дорожно-транспортных происшествий с точки зрения тяжести последствий для водителей и пассажиров [1, 2]. Одним из направлений повышения пассивной безопасности является совершенствование конструктивных элементов кузова, предназначенных для поглощения энергии удара [3–6]. Для снижения травматизма водителя и пассажиров широко применяются активные средства, такие как ремни безопасности (РБ) [7, 8] и подушки безопасности (ПБ) [9–12]. Оптимизация расположения и параметров функционирования активных элементов системы пассивной безопасности автомобиля является важной задачей, решение которой позволит обеспечить максимальную защиту людей и свести к минимуму риск получения травм. Для ее решения в основном используются алгоритмы машинного обучения [13–15], позволяющие не только ускорить процесс поиска рациональных решений, но и дать количественную оценку влияния проектных переменных на критерии травмирования.

В настоящее время требования к пассивной безопасности легковых автомобилей строго регламентируются международными и национальными правилами: NHTSA, IIHS, Euro NCAP, C-NCAP и др. Правила ООН № 94[1] — это часть технического регламента Таможенного союза ТР ТС 018/2011, они регламентируют пассивную безопасность легковых автомобилей при фронтальном ударе с 40%-ным перекрытием на территории России.

Цель настоящей работы — повысить пассивную безопасность легкового автомобиля на стадии проектирования за счет оптимизации параметров расположения и функционирования активных элементов (ПБ и РБ) с применением алгоритмов машинного обучения.

Описание модели взаимодействия ПБ и РБ легкового автомобиля с манекеном приведено в [16]. Подробно рассмотрены требования к пассивной безопасности, предъявляемые Правилами ООН № 94, приведены

[1] Добавление 93: Правила № 94. Пересмотр 4. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты водителя и пассажиров в случае лобового столкновения. ООН, 2022.

особенности моделирования кузова легкового автомобиля, манекена Гибрид III, деформируемого барьера, работы ПБ и РБ, а также зависимости сил нагрузки и разгрузки от перемещения втягивающего устройства РБ и физико-механические параметры ПБ.

Исследование является логическим продолжением [16] и дополняет ее в части поиска рационального расположения и функционирования активных элементов системы пассивной безопасности водителя (ПБ и РБ) легкового автомобиля. Модель дополнена коленной ПБ и позволяет анализировать все критерии травмирования в соответствии с требованиями Правил ООН № 94. Скриншот расчетной модели легкового автомобиля при фронтальном ударе с 40%-ным перекрытием по Правилам ООН № 94 приведен на рис. 1.

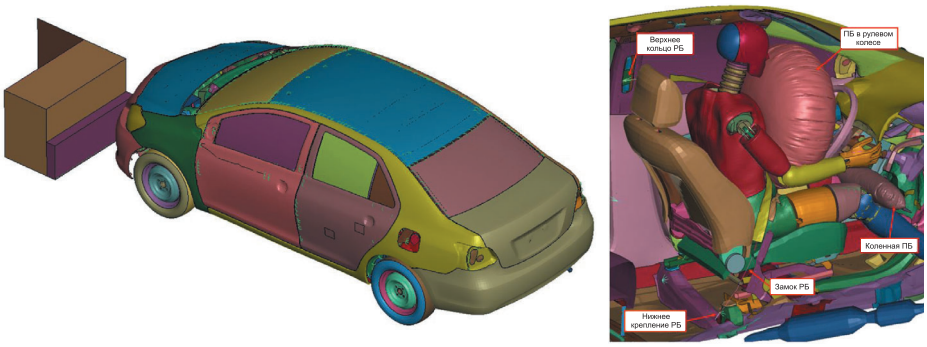


Рис. 1. Скриншот расчетной модели легкового автомобиля при фронтальном ударе с 40%-ным перекрытием по Правилам ООН № 94

Материалы и методы. Критерии травмирования манекена и проектные переменные. Для оценки критериев травмирования (по Правилам ООН № 94) получены временные зависимости ускорений, перемещений, сил и моментов, действующих на манекен Гибрид III в процессе удара. В отличие от правил по пассивной безопасности, принятых в зарубежных странах, например, в европейских странах, КНР, США, Японии, Корее и других, в Правилах ООН № 94 не предусмотрена градация критериев травмирования для оценки тяжести получаемых травм при столкновении. В рамках настоящей работы для оценки травмируемости водителя предлагается дополнить Правила ООН № 94 дифференцированной балльно-рейтинговой системой по аналогии с наиболее широко применяемыми правилами EuroNCAP (Европейский союз)[2]

[2] European new car assessment program (EuroNCAP). Assessment protocol — adult occupant protection, 2024, ver. 9.3.

и CNCAP (КНР)[3] (табл. 1). Для критериев, которые определяются по временным зависимостям (NIC и FFC), балльно-рейтинговая система не вводилась.

Таблица 1

Критерии травмирования

Критерий травмирования	Верхний предел (см. Правила ООН № 94) b_i	Нижний предел a_i	Балл
Голова и шея			
Для головы (HIC_{36}) f_1	1000	650	4
Результирующее ускорение головы в течение 3 мс f_2, g	80	72	
Для шеи (NIC), кН	Зависимости (см. Правила ООН № 94)		
Изгибающий момент шеи при растяжении по оси Y f_3, Н · м	57	42	
Грудь и живот			
Сжатие грудной клетки (ThCC) f_4, мм	42	18,5	4
Для мягких тканей (VC) грудной клетки f_5, м/с	1		
Бедренная кость и колени			
Нагрузка на бедра (FFC), кН	Зависимости (см. Правила ООН № 94)		4
Смещение подвижных коленных суставов f_6, f_7, мм	15	6	
Голень			
Сжатие голени (TCFC) f_8, f_9, кН	8	2	4
Для голени (TI) $f_{10} - f_{13}$	1,3	0,4	

Максимальная оценка в предлагаемой балльно-рейтинговой системе составляет 16 баллов. Предполагается максимум 4 балла для каждой из четырех областей тела: голова и шея, грудь и живот, бедренная кость и колено, голень. Если значение критерия превышает верхний порог, то присва-

[3] CNCAP management regulation. China Automotive Technology and Research Center Co. Ltd. (CATARC), 2024.

ивается 0 баллов. Если он меньше нижнего порога, то присваивается 4 балла. Значения, находящиеся между пороговыми значениями, линейно интерполируются для вычисления баллов от 0 до 4 баллов. Кроме того, каждая область тела делится на сегменты и для расчета итогового балла выбирается наименьший балл сегмента.

В качестве варьируемых параметров выбраны параметры, описывающие положение, габаритные размеры, а также процессы функционирования активных элементов системы пассивной безопасности автомобиля. Так, в табл. 2 приведены 11 проектных переменных и диапазоны их варьирования, которые определялись в [17–20] с учетом конструктивно-компоновочных возможностей рассматриваемого легкового автомобиля.

Таблица 2

Проектные переменные и диапазоны их варьирования

Проектная переменная	Номер п/п	Диапазон варьирования	Примечание
Положение коленной ПБ	1	40/0 мм	Вверх/вниз под углом 52°
Объем ПБ в рулевом колесе	2	«–»0,5–1,3	Масштабный коэффициент
Проницаемость ПБ в рулевом колесе	3	«–»0,5–2	
Проницаемость коленной ПБ	4	«–»0,5–2	
Газоприход ПБ в рулевом колесе	5	«–»0,7–2	
Газоприход коленной ПБ	6	«–»0,7–2	
Усилие натяжения РБ	7	«–»0,8–1,3	
Положение верхнего кольца РБ	8	± 37,5 мм	Вперед/назад
Положение замка РБ	9	7,5/–37,5 мм	
	10	0/–40 мм	Вверх/вниз
Положение нижнего крепления РБ	11	10/–65 мм	

Примечание. Знак «–» расширяет диапазон варьирования для получения нулевых значений.

Планирование эксперимента и построение метамодели на основе искусственной нейронной сети. Сложность оптимизации применительно к решению задач, связанных с пассивной безопасностью автомобилей,

заключается в большой трудоемкости при подготовке конечно-элементных моделей и временных затратах на машинный расчет, что ведет к необходимости обоснованного выбора числа проводимых виртуальных экспериментов [14, 17, 19], типа искусственной нейронной сети (ИНС), числа слоев и нейронов в каждом слое для построения адекватной регрессионной метамодели. Для определения рационального числа экспериментов, позволяющих построить метамодель с достаточным для решения поставленной задачи уровнем точности прогнозирования, разработана нелинейная математическая функция (упрощенный аналог метамодели) вида

$$\hat{y}(x) = \sum_{i=1}^{11} x_i^n \left| \sin(x_i) \right|,$$

где i от 1 до 11 — число проектных переменных; x_i — варьируемые проектные переменные; $n = 2$ — степень полинома с заранее известными результатами оптимизации.

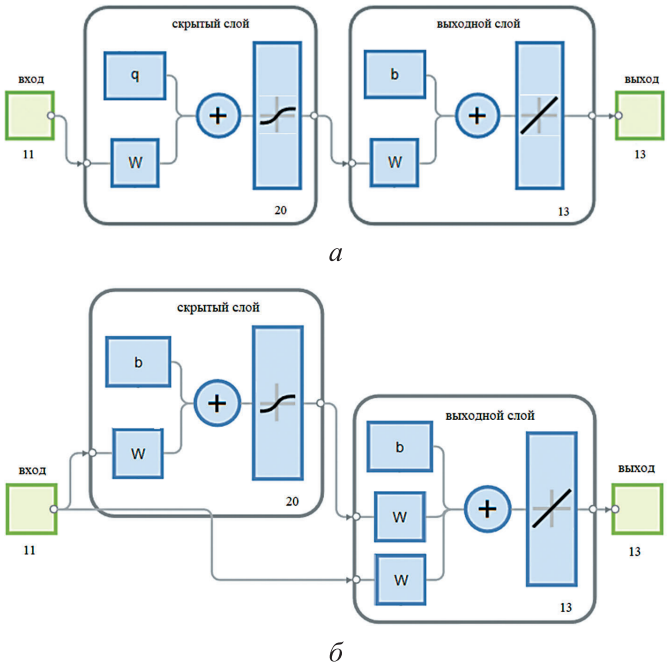
Минимум целевой функции равен нулю при всех нулевых значениях варьируемых переменных. Диапазон варьирования проектных переменных в целом соответствует основной решаемой задаче, но с учетом расширения диапазона для получения нулевых значений (см. табл. 2).

В качестве типа ИНС рассматривались полносвязные однослойный и многослойные персептроны [17] с 10, 20, 30 и 40 нейронами в каждом скрытом слое с функцией активации скрытых слоев — гиперболический тангенс [21], а также каскадные нейронные сети и сети прямого распространения. Скриншоты ИНС прямого распространения и каскадная ИНС, приведены на рис. 2. В качестве алгоритма обучения использовалась байесовская регуляризация [22], устойчивая к переобучению при небольших обучающих выборках.

Для определения оптимального размера обучающей выборки, обеспечивающей точность оптимизации на основе метамодели, анализировали наборы данных трех видов: 300, 500 и 1000 экспериментов, сгенерированных случайным образом (латинский гиперкуб) [15] в диапазоне варьирования всех проектных переменных.

Оптимизация рассматриваемой функции проводилась в программном комплексе MATLAB с помощью генетического алгоритма [17, 19, 23] (размер популяции 10 000; максимальное число поколений 500 000). Для каждого типа нейронной сети, числа слоев (нейронов в каждом слое)

и экспериментов строилось по три независимых ИНС. Значения математической функции $y(x)$, полученные по результатам оптимизации, приведены в табл. 3.



а

б

Рис. 2. Скриншоты ИНС прямого распространения (*а*) и каскадной ИНС (*б*)

Таблица 3

Результаты оптимизации математической функции $y(x)$

Тип ИНС	Число нейронов в слоях ИНС					
	Однослойная ИНС				Двуслойная ИНС	
	[10]	[20]	[30]	[40]	[10 10]	[20 20]
Число экспериментов 300						
Прямого распространения	–228 –310 –300	–138 –543 –347	–1248 –1719 –1592	–214 –168 –217	–161 –62 –277	–168 –294 –301
Каскадная	–1443 –1713 –638	–1248 –1719 –1592	–1546 –1033 –1152	–1606 –1539 –1633	–1604 –1483 –1393	–1409 –1512 –1718
Число экспериментов 500						
Прямого распространения	–148 –81 –148	–9 **0** **0,5**	–674 31 –373	–148 –386 –2437	–28 –161 –72	–38 25 –15,3

Окончание табл. 2

Тип ИНС	Число нейронов в слоях ИНС					
	Однослойная ИНС				Двуслойная ИНС	
	[10]	[20]	[30]	[40]	[10 10]	[20 20]
Каскадная	–72 –70 –45	–65 –25 –27	–541 –717 –290	–1598 –3281 –3281	–16 –87 –74	–3102 –3283 –2907
Число экспериментов 1000						
Прямого распространения	–92 –133 –80	**–0,5** **–1,78** **–0,17**	**–1,2** –12,8 **–0,26**	–18 **–0,2** **–3,8**	–12 –26 –37	**–0,2** **0** **0,14**
Каскадная	–639 –115 –650	**–1,38** –29 –507	–1254 **–2,2** **–2**	–1121 –1264 –642	**0,2** **0,1** **0,1**	–1170 –1020 –1121

Примечание. Полужирным выделены значения, близкие к нулю.

В результате анализа оптимизации определено следующее:

– наилучший результат оптимизации метамодели на основе ИНС, обученной на 300 экспериментальных данных, для всех рассмотренных вариантов равен –62, тогда как целевое значение должно быть близким к нулю, что является недопустимым с позиции точности прогнозируемых результатов;

– близкие к нулю значения целевой функции и варьируемых проектных переменных по результатам оптимизации для заданной математической функции $y(x)$ получаются в случае однослойной ИНС прямого распространения с 20 нейронами;

– увеличение числа расчетных экспериментов (500 и более) ведет к повышению точности прогнозирования оптимального решения;

– ИНС прямого распространения дает результаты лучшие, чем каскадные сети;

– наличие нескольких слоев в структуре ИНС и более 20 нейронов в скрытом слое не ведет к повышению точности прогнозирования из-за увеличения числа внутренних варьируемых параметров при обучении нейронной сети;

– ИНС с идентичными параметрами, обученные на одном и том же массиве данных, могут давать разные результаты прогнозирования, что ведет к необходимости многократного обучения ИНС (до тех пор, пока результаты прогнозирования не будут совпадать с экспериментальными

данными) [17] или к использованию метода суперпозиции ИНС (метамоделей) [24] для получения однозначных результатов.

В связи с тем, что при решении задачи оптимизации параметров активных элементов пассивной безопасности необходимо обеспечить однозначность результатов прогнозирования метамоделей на основе ИНС независимо от цикла обучения. Для проведения параметрической оптимизации с 11 проектными переменными рациональным вариантом с позиции точности и затрат времени на подготовку и расчет модели является суперпозиция метамоделей на основе однослойных ИНС прямого распространения с 20 нейронами и функцией активации в скрытом слое — гиперболический тангенс [21], обученных с помощью алгоритма байесовской регуляризации [22] на основе 500 экспериментальных данных.

Метод суперпозиции метамоделей позволяет уменьшить влияние «плохих» метамоделей на основе ИНС на результат прогнозирования (и как следствие оптимизации) путем назначения весовым коэффициентам значений, близких к нулю, что повышает общую точность прогнозирования при неизменном объеме обучающей выборки [24]:

$$\tilde{y}(x) = \sum_{i=1}^{k} w_i \, \hat{y}_i(x), \tag{1}$$

где $\tilde{y}(x)$ — результат прогнозирования суперпозиции метамоделей $\hat{y}_i(x)$; k — число метамоделей; w_i, $\hat{y}_i(x)$ — весовые коэффициенты и результаты прогнозирования i-й метамодели.

Для расчета весовых коэффициентов применялась оптимизация на основе генетического алгоритма. Целевая функция — минимизация суммарной среднеквадратической ошибки между прогнозируемым и фактическим значениями из обучающей выборки, соответствующей тому же набору проектных переменных. В настоящей работе анализировались точность прогнозирования результатов на основе суперпозиций метамоделей, состоящих из наборов 10, 15 и 20 метамоделей на основе ИНС. Для каждого набора генерировалось пять независимых вариантов (всего 225 ИНС). Качество каждой суперпозиции метамоделей оценивалось с помощью анализа чувствительности на основе нелинейного корреляционного метода Спирмена. Корреляционная зависимость между результатом расчета суперпозиции метамоделей $\tilde{y}(x_1)$ и проектной переменной x_1 приведена на рис. 3.

Из анализа чувствительности следует, что варианты суперпозиций из 10 и 15 метамоделей могут дать существенно разные результаты прогнозирования, что недопустимо при решения оптимизационных задач,

поскольку может повлечь получение недостоверных результатов, которые нельзя верифицировать альтернативным способом. Таким образом, подход, заключающийся в применении суперпозиции из 20 метамоделей, позволяет повысить точность результатов прогнозирования без увеличения числа экспериментальных данных (500 экспериментов). Это позволяет применять его при решении задачи оптимизации параметров активных элементов системы пассивной безопасности автомобиля и обеспечить снижение временных затрат на формирование обучающей выборки.

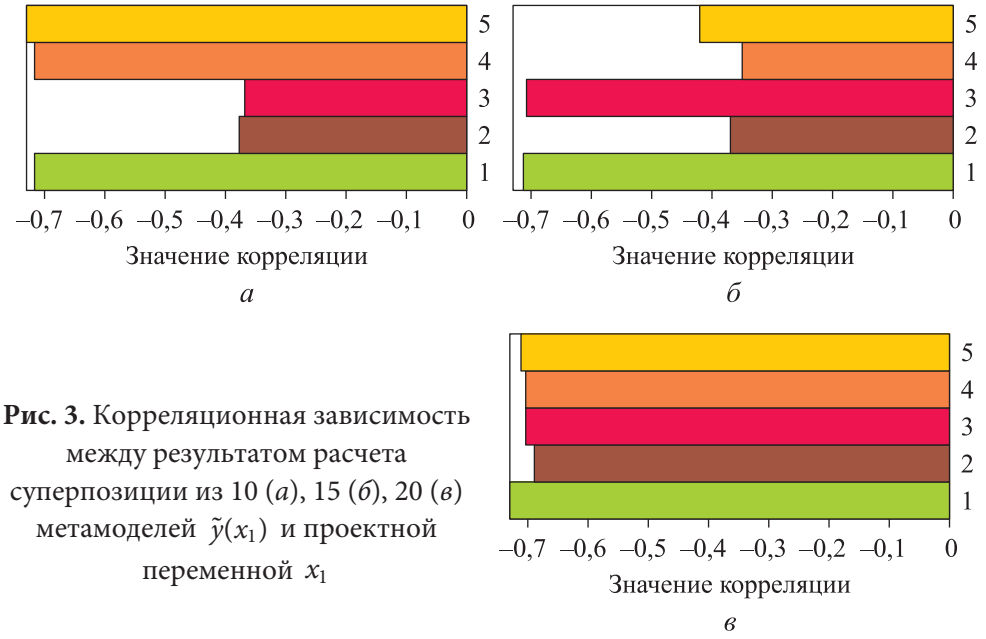


Рис. 3. Корреляционная зависимость между результатом расчета суперпозиции из 10 (*а*), 15 (*б*), 20 (*в*) метамоделей $\tilde{y}(x_1)$ и проектной переменной x_1

Постановка и решение задачи параметрической оптимизации расположения и параметров функционирования активных элементов системы пассивной безопасности водителя легкового автомобиля. На основании приведенных выкладок для параметрической оптимизации создана суперпозиция из 20 метамоделей на основе однослойных ИНС прямого распространения с 20 нейронами и функцией активации гиперболический тангенс [21] в скрытом слое, обученных с помощью алгоритма байесовской регуляризации. Скриншот архитектуры суперпозиции из 20 метамоделей приведен на рис. 4 [22]. Разработанная метамодель на основе ИНС имеет 11 входов — проектных переменных (см. табл. 2) и 13 выходов — критериев травмирования (см. табл. 1), на основании которых происходит расчет целевой функции. При формировании расчетных точек, как и при решении тестовой задачи, использовался латинский

гиперкуб [15]. Для обучения метамодели на основе ИНС проведено 500 расчетов в программном комплексе LS-DYNA. Машинное время, затраченное на расчет, составило 21 день на 120 ядрах.

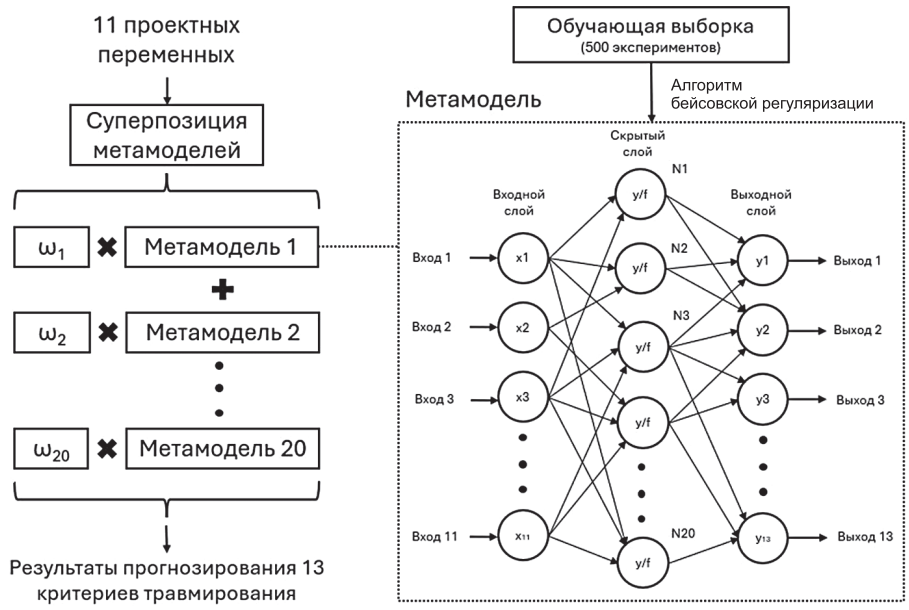


Рис. 4. Архитектура суперпозиции из 20 метамоделей

В качестве критериев травмирования выбраны: HIC_{36} (№ 1), результирующее ускорение головы в течение 3 мс (№ 2), значение изгибающего момента шеи при растяжении (№ 3), сжатие грудной клетки (№ 4), критерий по мягким тканям для грудной клетки (№ 5), смещение левого (№ 6) и правого (№ 7) подвижных коленных суставов, критерий сжатия левой (№ 8) и правой (№ 9) голени, показатель травмирования левой (№ 10, № 11) и правой (№ 12, № 13) голени, замеренный в верхней и нижней точках каждой голени.

Для повышения точности прогнозирования метамодели на основе ИНС разнородные значения критериев травмирования нормализованы в диапазоне [0; 1]. Это необходимо для приведения данных, имеющих различные единицы измерения (HIC, результирующее ускорение головы, изгибающий момент шеи, сжатие грудной клетки и др.) и диапазоны значений (см. табл. 1), к единому виду, что позволяет сравнивать их между собой и использовать в качестве обучающего массива.

После обучения на заданной обучающей выборке (500 экспериментов) значение коэффициента детерминации R^2 индивидуальных метамо-

делей на основе ИНС лежит в диапазоне 0,651–0,693, а для суперпозиции из 20 метамоделей R^2 = 0,763, что соответствует коэффициенту множественной корреляции 0,87. Следовательно, применение подхода, основанного на суперпозиции метамоделей, для решения задачи определения рациональных параметров активной системы пассивной безопасности водителя легкового автомобиля, позволило повысить точность прогнозирования результатов на 10,1 %.

В качестве целевой функции использован суммарный балл $f(x)$ в соответствии с предложенной балльно-рейтинговой системой, который максимизируется в рамках цикла оптимизации (максимальное возможное значение составляет 16 баллов):

$$\begin{aligned}\max\left(f(x)\right) = \min\left(f_1(x), f_2(x), f_3(x)\right) + \\ + \min\left(f_4(x), f_5(x)\right) + \min\left(f_6(x), f_7(x)\right) + \\ + \min\left(f_8(x), f_9(x) + f_{10}(x) + f_{11}(x) + f_{12}(x) + f_{13}(x)\right),\end{aligned} \tag{2}$$

где $f_i(x)$ — балл для i-го критерия травмирования; x — вектор проектных переменных.

Балл критерия травмирования рассчитывается по формуле

$$\begin{gathered}f_i(x) = \frac{4\left(b_i - \tilde{y}_i(x)\right)}{\left(b_i - a_i\right)} \text{ при } a_i < \tilde{y}_i(x) \le b_i; \\ 4 \text{ балла при } \tilde{y}_i(x) \le a_i;\ 0 \text{ при } \tilde{y}_i(x) > b_i,\end{gathered} \tag{3}$$

где a_i, b_i — нижний и верхний пределы i-го критерия травмирования (см. табл. 1); $\tilde{y}_i(x)$ — результат прогнозирования i-го критерия травмирования; i — число рассматриваемых критериев травмирования.

Для проведения параметрической оптимизации применялся генетический алгоритм (размер популяции 10 000; максимальное число поколений 500 000) [17, 19, 23, 24], который является методом глобальной оптимизации, поддерживает разнообразие за счет мутаций и рекомбинации особей, что позволяет избегать локальных максимумов/минимумов. Блок-схема алгоритма оптимизации приведена на рис. 5.

Полученную рациональную конструкцию необходимо проверить с помощью виртуального эксперимента. Максимальное значение погрешности прогнозирования метамодели, указанное в [19, 20, 23], не превышает 10 % по сравнению с проверочным расчетом. Исходя из этого, если средняя погрешность прогнозирования не более 10 %, то требуется только финальная верификация параметров на натурном эксперименте.



Рис. 5. Блок-схема алгоритма оптимизации

Если средняя погрешность прогнозирования более 10 %, то в зависимости от трудоемкости возможно несколько вариантов доработки метамодели на основе ИНС. Наименее трудоемкий вариант предполагает увеличение числа разнотипных метамоделей в составе суперпозиции с последующей оптимизацией весовых коэффициентов. Этот вариант не требует затрат времени на подготовку и проведение дополнительных виртуальных экспериментов и является наиболее быстрым и экономным. Однако может не обеспечить ожидаемого роста точности результатов. В свою очередь самый затратный вариант — генерация дополнительного набора виртуальных экспериментов с учетом всех проектных переменных и полного диапазона их варьирования.

Наиболее эффективный подход включает в себя предварительный анализ чувствительности перед добавлением новых экспериментов. Такой шаг позволяет выявить наиболее значимые проектные переменные и сократить общее число варьируемых параметров, что снижает время подготовки экспериментов. При этом увеличение объема обучающей выборки напрямую повышает точность прогнозирования.

Для каждого рассмотренного варианта следующим этапом является переобучение суперпозиции метамоделей для оптимизации и верификации новых конструктивных параметров. Если средняя абсолютная погрешность прогнозирования критериев травмирования не более 10 %, то проводится натурная верификация. В противном случае выполняется новый цикл уточнения метамоделей на основе ИНС.

Результаты. Результаты параметрической оптимизации параметров активных элементов системы пассивной безопасности легкового автомобиля приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Результаты параметрической оптимизации для проектных переменных

Проектная переменная	Базовое значение	Результат оптимизации	Примечание
Положение коленной ПБ	0	4 мм	Вверх под углом 52°
Объем ПБ в рулевом колесе	1	1,3	Масштабный коэффициент
Проницаемость ПБ в рулевом колесе		1,92	
Проницаемость коленной ПБ		0,92	
Газоприход ПБ в рулевом колесе		1,11	

Окончание табл. 4

Проектная переменная	Базовое значение	Результат оптимизации	Примечание
Газоприход коленной ПБ	1	0,72	Масштабный коэффициент
Усилие натяжения РБ		1,3	
Положение верхнего кольца РБ	0	16,6 мм	Вперед
Положение замка РБ		–21,6 мм	Назад
		–20,6 мм	Вниз
Положение крепления нижнего крепления РБ		10 мм	Вперед

Таблица 5

Значения критериев травмирования и итоговый балл

Критерий травмирования	Базовое значение, %	Балл	Значение, %		Балл
			спрогнозированное*	расчетное**	
Для головы (HIC_{36})	358	0,5	245 (26)	333 (7)	4
Результирующее ускорение головы в течение 3 мс, g	54,2		46,9 (1)	47,5 (12)	
Для шеи (NIC), кН	Удовлетворяет		–	Удовлетворяет	
Изгибающий момент шеи при растяжении по оси *Y*, Н · м	55		9,3 (18)	11,4 (80)	
Сжатие грудной клетки (ThCC), мм	40,6	0,2	22,8 (17)	27,4 (33)	2,5
Для мягких тканей (VC) грудной клетки, м/с	0,99		0,72 (9)	0,79 (20)	
Нагрузка на бедра (FFC), кН	Удовлетворяет	3,8	–	Удовлетворяет	4
Смещение подвижных коленных суставов, мм	6,53 5,06		6 (–17) 4,61 (13)	5,13 (21) 5,27 (–4)	
Сжатие голени (TCFC), кН	5780 3990	1,0	4715 (11) 3872 (–2)	5290 (8) 3800 (5)	1,8

Окончание табл. 5

Критерий травмирования	Базовое значение, %	Балл	Значение, %		Балл
			спрогнозированное*	расчетное**	
Для голени (TI)	0,81 1,07 0,78 0,95	1,0	0,8 (1) 0,8 (4) 0,75 (0) 0,78 (4)	0,81 (0) 0,83 (22) 0,75 (4) 0,81 (15)	1,8
Суммарный балл / погрешность прогнозирования	–	5,5	(9,5)	–	12,3

* Погрешность прогнозирования критерия травмирования метамоделью (MATLAB) в сравнении с расчетным значением (LS-DYNA).

** Улучшение критерия травмирования по результатам оптимизации по сравнению с базовым расчетом.

Средняя абсолютная погрешность критериев травмирования разработанной суперпозиции метамоделей по сравнению с проверочным расчетом составляет 9,5 %, что является хорошим показателем качества прогнозирования метамодели на основе ИНС.

В результате анализа оптимизации и проверочного моделирования определено, что суммарный балл в соответствии с предлагаемой балльно-рейтинговой системой улучшен в 2,2 раза (от 5,5 до 12,3). Рациональный выбор проектных переменных сильнее всего снизил травмируемость головы манекена, балл увеличился от 0,5 до 4 за счет уменьшения изгибающего момента, действующего на шею; для грудной клетки балл улучшился от 0,2 до 2,5 благодаря уменьшению сжатия грудной клетки; также улучшен критерий сжатия левой и правой голеней (от 1 до 1,8 баллов). Рациональная конструкция привела к улучшению всех критериев травмирования по сравнению с базовым вариантом (до 80 % для шеи манекена), кроме смещения подвижного коленного сустава правой ноги (–4 %).

Объем ПБ в рулевом колесе увеличен в 1,3 раза, газоприход — в 1,11 раза, как и суммарный газорасход в 1,92 раза через структуру материала тканевого мешка ПБ и вентиляционные отверстия по сравнению с вариантом, приведенным в [16]. Положение и параметры коленной ПБ по результатам оптимизации изменены следующим образом: газоприход уменьшен в 0,72 раза, проницаемость ткани ПБ — в 0,92 раза при незначительном смещение ПБ вверх на 4 мм. Сила натяжения РБ увеличена в 1,3 раза. Положение точек крепления РБ смещено в соответствии с табл. 4.

Анализ чувствительности. Для количественной оценки вклада каждой проектной переменной в изменение критерия травмирования проведен анализ чувствительности. Результаты анализа чувствительности для рассматриваемых критериев травмирования, рассчитанные на основе нелинейного корреляционного метода Спирмена, приведены на рис. 6 (цифрами 1–11 отмечены проектные переменные в соответствии с табл. 2). Для головы, шеи и грудной клетки наиболее значимыми проектными переменными являются: объем, газоприход и газорасход ПБ, расположенной в рулевом колесе. В свою очередь положение коленной ПБ и объем ПБ в рулевом колесе влияют на критерии травмирования бедер и колен больше, чем газоприход и проницаемость коленной ПБ. Наибольшее влияние на критерии травмирования голени оказывают положение и газоприход коленной ПБ, а также объем ПБ в рулевом колесе.

Из обобщения анализа результатов чувствительности следует, что положение точек крепления и сила натяжения РБ в меньшей степени влияют на критерии травмирования по сравнению с другими рассматриваемыми проектными переменными. Наибольший вклад вносят объем и газорасход ПБ в рулевом колесе, положение и газоприход коленной ПБ.

Обсуждение полученных результатов. Применение подхода к созданию модели, описывающей связь между входными (11 переменными) и выходными параметрами (13 критериев), основано на суперпозиции из 20 метамоделей и позволило добиться достаточной точности прогнозирования результатов моделирования, несмотря на сложность и высокую нелинейность взаимосвязей между критериями травмирования и проектными переменными. Коэффициент детерминации суперпозиции метамоделей равен 0,763, что согласуется с [25, 26].

Для построения адекватной метамодели на основе ИНС с позиции точности прогнозирования результатов для 11 проектных переменных минимальное необходимое число экспериментов должно быть не менее 500, что доказано в настоящей работе на примере нелинейной математической функции. В [17, 26] определено, что хорошая точность прогнозирования начинается для обучающих выборок размером более 300 экспериментов. Увеличение обучающей выборки ведет к повышению точности, но и требует больших затрат времени на подготовку и расчет виртуальных экспериментов, что не рационально применительно к решению задач, связанных с пассивной безопасностью легковых автомобилей. В случае больших значений погрешности прогнозируемых результатов по сравнению с проверочным расчетом обучающая выборка может быть дополнена путем проведения дополнительных экспериментов, например, методом SRSM [27].

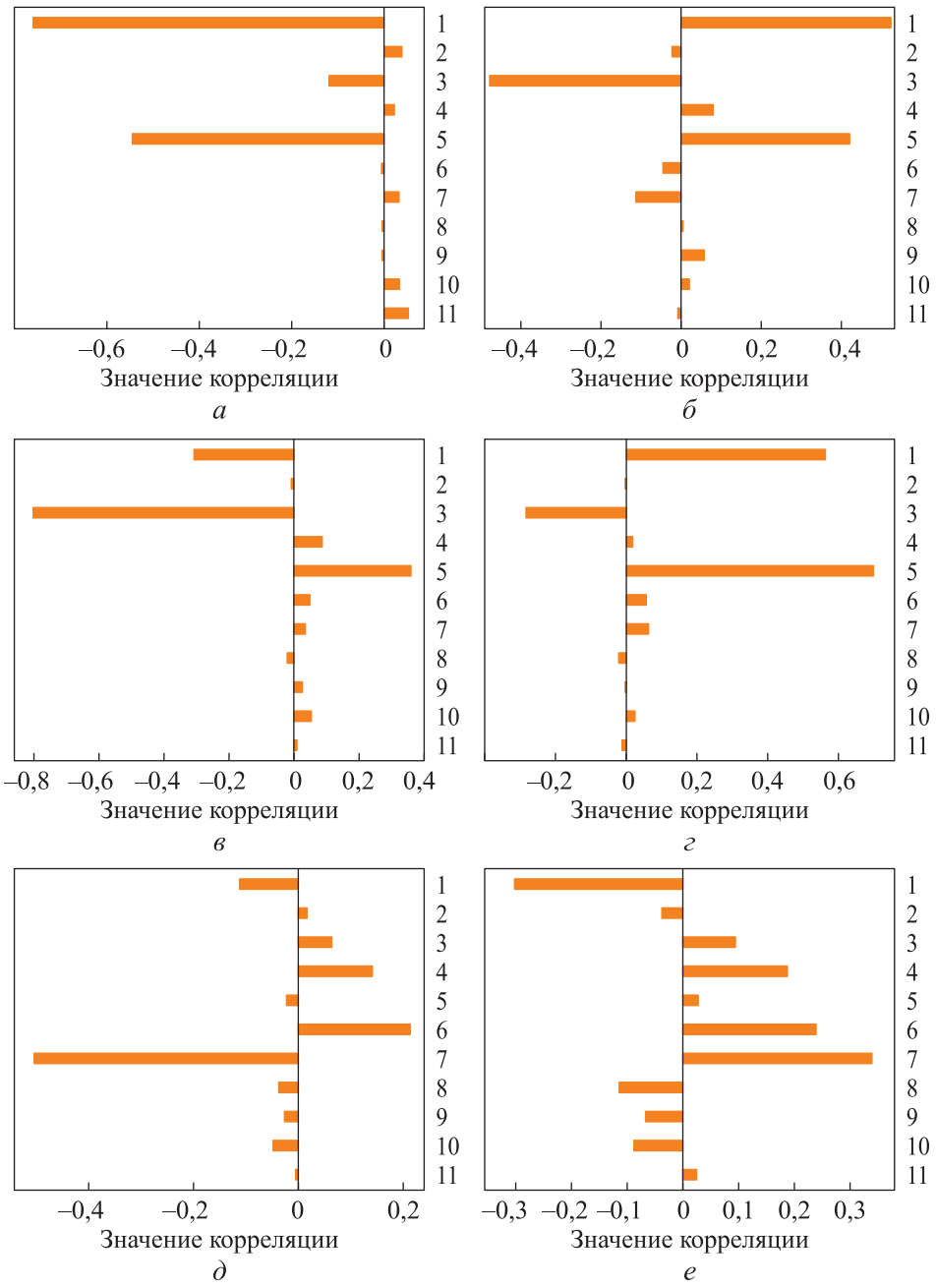


Рис. 6 (начало). Результаты анализа чувствительности критериев травмирования, рассчитанные на основе нелинейного корреляционного метода Спирмена:

результирующее ускорение головы (*а*); для шеи (*б*); сжатие грудной клетки (*в*); для мягких тканей (*г*); смещение левого (*д*) и правого (*е*) коленных суставов

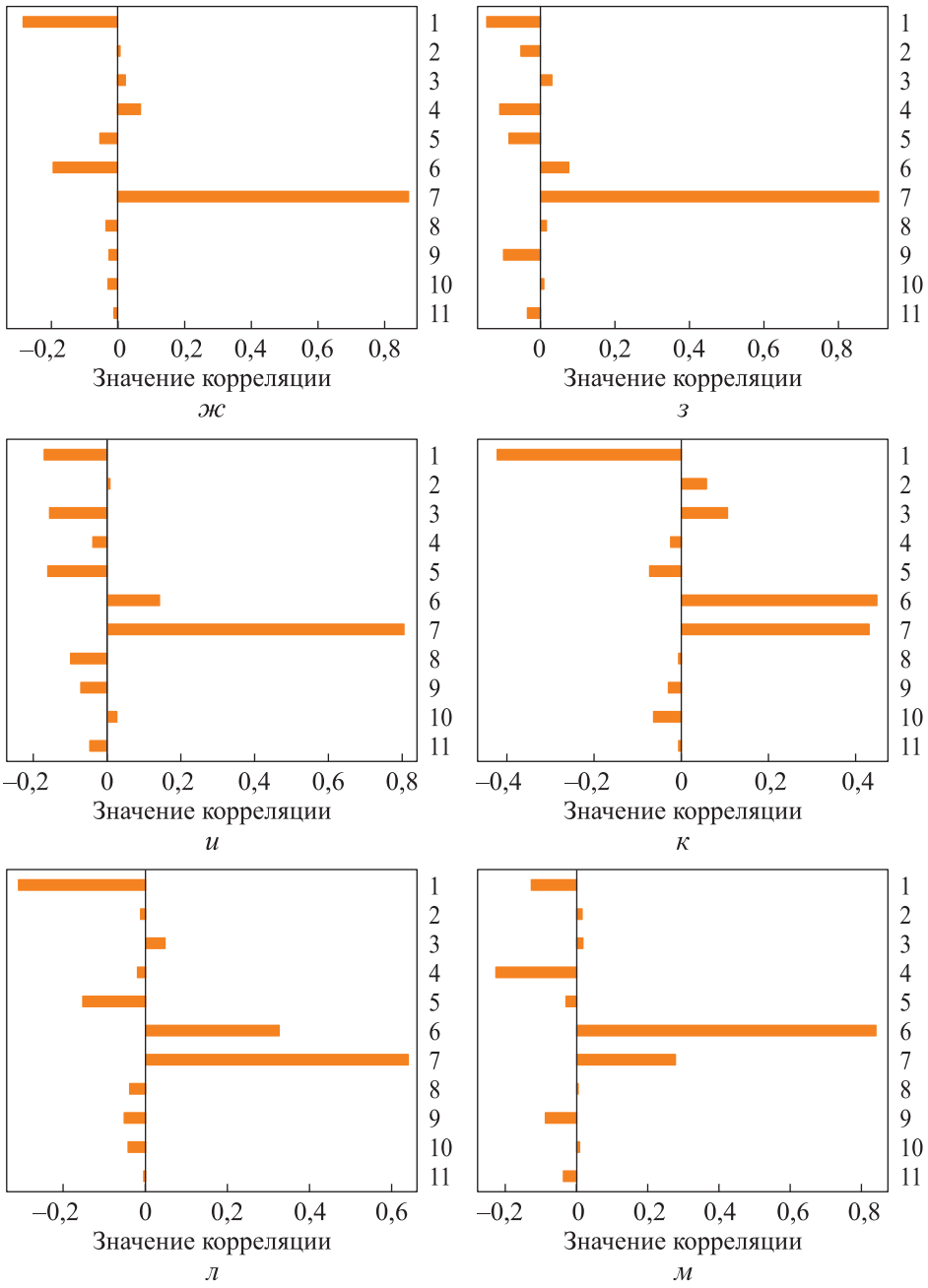


Рис. 6 (окончание). Результаты анализа чувствительности критериев травмирования, рассчитанные на основе нелинейного корреляционного метода Спирмена:

сжатие левой (*ж*) и правой (*з*) голени; верхней (*и*) и нижней (*к*) точки левой голени; верхней (*л*) и нижней (*м*) точки правой голени

Машинное время расчета является одним из существенных ограничений при выполнении параметрической оптимизации применительно к задачам, связанным с пассивной безопасностью автомобиля. Расчет 500 виртуальных экспериментов в программном комплексе LS-DYNA выполнен на 120 ядрах за 21 день. При этом дальнейшее формирование метамодели на основе ИНС и оптимизация существенно менее трудозатратны и занимают всего несколько дней.

Предложена балльно-рейтинговая система, основанная на мировом опыте, международных и национальных требованиях, предъявляемых к пассивной безопасности легковых автомобилей, которая дополняет Правила ООН № 94 в части введения нижних границ в критерии травмирования и подход к оценке пассивной безопасности автомобиля.

Найденные по результатам оптимизации параметры расположения и функционирования активных элементов системы пассивной безопасности водителя легкового автомобиля позволили получить 12,3 балла по предлагаемой балльно-рейтинговой системе, что в 2,2 раза лучше, чем у базового варианта (5,5 балла). Наибольшего улучшения удалось достичь за счет уменьшения изгибающего момента на шее (от 0,5 до 4 баллов) и прогиба грудной клетки (от 0,2 до 2,5 баллов).

В результате анализа чувствительности выявлено, что наибольшее влияние на критерии травмирования грудной клетки оказывают объем, газоприход и газорасход ПБ в рулевом колесе. Увеличение объема ПБ приводит к более равномерному прилеганию мешка ПБ к грудной клетке манекена. Повышение газоприхода позволяет ПБ быстрее раскрыться до оптимального состояния, в свою очередь увеличение газорасхода делает ПБ мягче в процессе контактирования с манекеном.

Положение точек крепления РБ оптимизировано относительно исходной конфигурации. Верхняя точка крепления и нижнее крепление РБ смещены вперед, а замок РБ назад и вниз. Данная корректировка изменила геометрию натяжения ленты РБ, что обеспечило более активное вовлечение грудной клетки и плечевого пояса в процесс поглощения энергии при столкновении. В отличие от [17, 28] вертикальное перемещение верхнего кольца РБ не рассматривалось, поскольку современные конструкции позволяют водителю самостоятельно регулировать его положение для обеспечения надежного прилегания ленты РБ к телу.

Наибольшее влияние на снижение травматизма нижних конечностей оказывает коленная ПБ, которая предотвращает удар ног об элементы интерьера автомобиля. Установлено, что ее положение и газоприход зна-

чительно сильнее влияют на травмобезопасность нижних конечностей, чем расположение точек крепления РБ [17].

Заключение. Оптимизировать параметры функционирования активных элементов системы пассивной безопасности водителя легкового автомобиля и их расположение можно с помощью машинного обучения на базе ИНС.

Предложена балльно-рейтинговая система, дающая возможность количественно оценить критерии травмирования, что дополняет Правила ООН № 94 в части расширения и детализации методов оценки пассивной безопасности легкового автомобиля.

Проведенный анализ чувствительности на основе корреляционного метода Спирмена позволяет количественно оценивать степень влияния проектных переменных на отдельные критерии травмирования. Полученные данные имеют важное значение на стадии проектирования, поскольку их невозможно получить в ходе натурных экспериментов.

В результате параметрической оптимизации повышен уровень пассивной безопасности водителя легкового автомобиля: суммарный балл увеличен в 2,2 раза (от 5,5 до 12,3), улучшение индивидуальных критериев травмирования достигло 80 %.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Зузов И.В., Зузов В.Н. Совершенствование конструкции корпуса кузова легкового автомобиля на стадии проектирования для обеспечения требований пассивной безопасности при кософронтальном ударе. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2013, № 1 (90), с. 57–68. EDN: PYCDZZ

[2] Ван Ч., Зузов В.Н., Солопов Д.Ю. Обоснование нагрузочных режимов испытаний на пассивную безопасность грузопассажирских автомобилей. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2024, № 1, с. 70–82. EDN: VXQOAI

[3] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н., Чайко Д.Н. Моделирование поведения тонкостенных труб с разными наполнителями при предельном нагружении применительно к решению проблем пассивной безопасности автомобилей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, № 3. DOI: https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-3-1856

[4] Ван И., Зузов В.Н. Методика нахождения оптимальной топологии каркаса кузова амфибийных машин на основе взвешенного метода TOPSIS. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, № 12.
URL: https://engjournal.bmstu.ru/catalog/arse/gttmc/2323.html

[5] Сулегин Д.А., Зузов В.Н. Исследование влияния усиливающих элементов двери автомобиля на пассивную безопасность при боковом ударе. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева,* 2021, № 1, с. 86–97.
DOI: https://doi.org/10.46960/1816-210X_2021_1_86

[6] Fang J., Sun G., Qiu N., et al. On design optimization for structural crashworthiness and its state of the art. *Struct. Multidiscip. Optim.*, 2017, vol. 55, no. 3, pp. 1091–1119. DOI: https://doi.org/10.1007/s00158-016-1579-y

[7] Гонсалес Астуа А.В. Структурно-функциональный анализ натяжителей ремней безопасности автомобиля. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 3 (150), с. 41–56. EDN: XSCHNN

[8] Кутищев Д.С., Быков В.С., Сипко В.В. и др. Роль конструкции ремней безопасности в современных дорожных условиях. *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2015, т. 3, № 4-1, с. 67–71. EDN: UYRJPJ

[9] Гонсалес Астуа А.В., Гончаров Р.Б., Малищук Т.С. Экспериментальный анализ элементного состава материалов для изготовления газогенераторов модулей подушек безопасности автомобиля. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 2 (141), с. 75–88.
DOI: https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-75-88

[10] Гонсалес Астуа А.В., Малищук Т.С. Структурно-функциональный анализ модулей фронтальных двухступенчатых подушек безопасности автомобиля. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2023, № 2 (145), с. 29–46.
DOI: https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-29-46

[11] Котиев Г.О., Петюков А.В., Гонсалес Астуа А.В. Экспериментально-теоретический метод исследования особенностей функционирования модулей подушек безопасности автомобиля. *Труды НАМИ*, 2021, № 2, с. 15–24.
DOI: https://doi.org/10.51187/0135-3152-2021-2-15-24

[12] Radu A.I., Cofaru C., Tolea B., et al. Study regarding the influence of airbag deployment time on the occupant injury level during a frontal vehicle collision. *MATEC Web Conf.,* 2018, vol. 184, art. 01007. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201818401007

[13] Najmon J.C., Tovar A. Multiscale topology optimization using machine learning and displacement-driven microstructures. *Struct. Multidiscip. Optim.*, 2025, vol. 68, no. 9, art. 172. DOI: https://doi.org/10.1007/s00158-025-04115-7

[14] Гончаров Р.Б. Исследование эффективности алгоритмов параметрической оптимизации применительно к процессам ударного воздействия на примере бампера и кабины автомобиля. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 4, с. 28–40. DOI: http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2019-4-28-40

[15] Helton J.C., Davis F.J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2003, vol. 81, no. 1, pp. 23–69. DOI: https://doi.org/10.1016/S0951-8320(03)00058-9

[16] Гонсалес Астуа А.В., Гончаров Р.Б., Петюков А.В. Физико-математическое моделирование процесса взаимодействия подушки безопасности легкового автомобиля с антропоморфным манекеном. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 4 (143), с. 4–21.
DOI: https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-4-4-21

[17] Heo J., Cho M.G., Kim T. Optimization of occupant restraint system using machine learning for THOR-M50 and Euro NCAP. *Machines*, 2024, vol. 12, no. 1, art. 74. DOI: https://doi.org/10.3390/machines12010074

[18] Liufu K., Liu Q., Lu Y., et al. Multiobjective optimization on cooperative control of autonomous emergency steering and occupant restraint system for enhancing occupant safety. *Accid. Anal. Prev*., 2021, vol. 159, no. 4, art. 106302.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106302

[19] Xiang Z., Xiang F. Multi-parameter and multi-objective optimization of occupant restraint system in frontal collision. *Wuhan Univ. J. Nat. Sc*., 2023, vol. 28, no. 4, pp. 324–332. DOI: https://doi.org/10.1051/wujns/2023284324

[20] Gu X., Lu J. Reliability-based robust assessment for multiobjective optimization design of improving occupant restraint system performance. *Comput. Ind*., 2014, vol. 65, no. 8, pp. 1169–1180. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2014.07.003

[21] Vogl T.P., Mangis J.K., Rigler A.K., et al. Accelerating the convergence of the back-propagation method. *Biol. Cybern.*, 1988, vol. 59, no. 4-5, pp. 257–263.
DOI: https://doi.org/10.1007/BF00332914

[22] MacKay David J.C. Bayesian interpolation. *Neural Comput.,* 1992, vol. 4, no. 3, pp. 415–447. DOI: https://doi.org/10.1162/neco.1992.4.3.415

[23] Gao D., Yao B., Chang G., et al. Multi-objective optimization design of vehicle side crashworthiness based on machine learning point-adding method. *Appl. Sc*., 2022, vol. 12, no. 20, art. 10320. DOI: https://doi.org/10.3390/app122010320

[24] Fang J., Sun G., Qiu N., et al. On design optimization for structural crashworthiness and its state of the art. *Struct. Multidisc. Optim.*, 2017, vol. 55, no. 3, pp. 1091–1119. DOI: https://doi.org/10.1007/s00158-016-1579-y

[25] Joodaki H., Gepner B., Kerrigan J. Leveraging machine learning for predicting human body model response in restraint design simulations. *Comput. Methods Biomech. Biomed. Eng.*, 2021, vol. 24, no. 6, pp. 597–611.
DOI: https://doi.org/10.1080/10255842.2020.1841754

[26] Horii H. Advancement of vehicle occupant restraint system design by integration of artificial intelligence technologies. *Int. J. Transp. Dev. Integr*., 2021, vol. 5, no. 3, pp. 242–253. DOI: https://doi.org/10.2495/TDI-V5-N3-242-253

[27] Kurtaran H., Eskandarian A., Marzougui D., et al. Crashworthiness design optimization using successive response surface approximations. *Comput. Mech*., 2002, vol. 29, no. 4, pp. 409–421. DOI: https://doi.org/10.1007/s00466-002-0351-x

[28] Eggers A., Eickhoff B., Dobberstein J., et al. Effects of variations in belt geometry, double pretensioning and adaptive load limiting on advanced chest measurements of THOR and Hybrid III. *Proc. IRCOBI Conf.*, 2014, pp. 347–358.

Гончаров Роман Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Зузов Валерий Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Косицын Борис Борисович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Падалкин Борис Васильевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гончаров Р.Б., Зузов В.Н., Косицын Б.Б. и др. Проблемы поиска рациональных параметров активных элементов системы пассивной безопасности водителя легкового автомобиля. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2026, № 3 (158), с. 54–80. EDN: ILKVZS

PROBLEMS OF SEARCHING FOR RATIONAL PARAMETERS OF ACTIVE COMPONENT PARAMETERS IN A CAR'S PASSIVE SAFETY SYSTEM

R.B. Goncharov goncharov.roman@bmstu.ru
V.N. Zuzov zuzov@bmstu.ru
B.B. Kositsyn kositsyn_b@bmstu.ru
B.V. Padalkin padalkin@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

Improving the passive safety of passenger cars to reduce driver and passenger injuries is a critically important task. Active components of passive safety systems, such as airbags and seat belts, are key to reducing the probability of fatal outcomes and severe injuries in traffic accidents. This article aimed to determine the optimal configuration and operational parameters for the driver's passive safety system components, using a 40 % overlap oblique frontal impact according to UN Regulation No. 94 as a case study. To solve this task, a metamodel based on an artificial neural network was developed to predict injury criteria based on the design parameters of the safety components. A multi-objective optimization method, a genetic algorithm, was then applied to find the optimal solution. The simulation results demonstrated a 2.2-fold increase in the overall safety score, with improvements in individual injury criteria reaching up to 80 %. The primary progress was

Keywords

Passive safety, passenger car, optimization, machine learning, airbag, seat belt

achieved by reducing the neck bending moment and chest deflection. This was made possible by optimizing the volume, gas inflow, and gas outflow parameters of the steering wheel airbag. The optimized parameters of the knee airbag contributed to a reduction in lower limb injuries. A sensitivity analysis conducted using Spearman's correlation method provided a quantitative assessment of the influence of each design variable on the injury criteria. It was established that the volume and gas outflow of the steering wheel airbag, along with the position and gas inflow of the knee airbag, had the most significant impact

Received 01.11.2025
Accepted 10.07.2026
© Author(s), 2026

REFERENCES

[1] Zuzov I.V., Zuzov V.N. Improvement of construction of motor car body at the designing stage to satisfy passive safety requirements at offset frontal impact. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2013, no. 1 (90), pp. 57–68 (in Russ.). EDN: PYCDZZ

[2] Van Ch., Zuzov V.N., Solopov D.Yu. Justification of load conditions of passive safety tests for cargo-passenger cars. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2024, no. 1, pp. 70–82 (in Russ.). EDN: VXQOAI

[3] Goncharov R.B., Zuzov V.N., Chayko D.N. Modeling the behavior of thin-walled tubes with different fillers at the maximum load in solving the problems of crashworthiness. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2019, no. 3 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-3-1856

[4] Van I., Zuzov V.N. Methodology for determining the optimal topology of amphibious vehicle framework based on the weighted TOPSIS method. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2023, no. 12 (in Russ.). Available at: https://engjournal.bmstu.ru/catalog/arse/gttmc/2323.html

[5] Sulegin D.A., Zuzov V.N. An investigation of the effect of a car door reinforcements on passive safety in a side impact. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2021, no. 1, pp. 86–97 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.46960/1816-210X_2021_1_86

[6] Fang J., Sun G., Qiu N., et al. On design optimization for structural crashworthiness and its state of the art. *Struct. Multidiscip. Optim.*, 2017, vol. 55, no. 3, pp. 1091–1119. DOI: https://doi.org/10.1007/s00158-016-1579-y

[7] Gonsales Astua A.V. Structural and functional analysis of the vehicle seat belt tensioners. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 3 (150), pp. 41–56 (in Russ.). EDN: XSCHNN

[8] Kutishchev D.S., Bykov V.S., Sipko V.V., et al. The role of the design of seat belts in the current road. *Aktualnye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2015, vol. 3, no. 4-1, pp. 67–71 (in Russ.). EDN: UYRJPJ

[9] Gonsales Astua A.V., Goncharov R.B., Malishchuk T.S. Experimental analysis of elemental composition of materials used to manufacture gas generators for vehicle airbag modules. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 2 (141), pp. 75–88 (in Russ.).
DOI: https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-75-88

[10] Gonsales Astua A.V., Malishchuk T.S. Structural and functional analysis of the automobile frontal two-stage airbag modules. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2023, no. 2 (145), pp. 29–46 (in Russ.).
DOI: https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-29-46

[11] Kotiev G.O., Petyukov A.V., Gonsales Astua A.V. Experimental-theoretical method for studying the vehicle airbag modules functioning. *Trudy NAMI*, 2021, no. 2, pp. 15–24 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.51187/0135-3152-2021-2-15-24

[12] Radu A.I., Cofaru C., Tolea B., et al. Study regarding the influence of airbag deployment time on the occupant injury level during a frontal vehicle collision. *MATEC Web Conf*., 2018, vol. 184, art. 01007. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201818401007

[13] Najmon J.C., Tovar A. Multiscale topology optimization using machine learning and displacement-driven microstructures. *Struct. Multidiscip. Optim*., 2025, vol. 68, no. 9, art. 172. DOI: https://doi.org/10.1007/s00158-025-04115-7

[14] Goncharov R.B. A study of the effectiveness of parametric optimization algorithms: collision impact processes in bumper beams and truck cabins. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2019, no. 4, pp. 28–40 (in Russ.). DOI: http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2019-4-28-40

[15] Helton J.C., Davis F.J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. *Reliab. Eng. Syst. Saf*., 2003, vol. 81, no. 1, pp. 23–69. DOI: https://doi.org/10.1016/S0951-8320(03)00058-9

[16] Gonsales Astua A.V., Goncharov R.B., Petyukov A.V. Numerical simulation of interaction between a passenger car airbag and an anthropomorphic dummy model. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Ntural Sciences*, 2022, no. 4 (143), pp. 4–21 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-4-4-21

[17] Heo J., Cho M.G., Kim T. Optimization of occupant restraint system using machine learning for THOR-M50 and Euro NCAP. *Machines*, 2024, vol. 12, no. 1, art. 74. DOI: https://doi.org/10.3390/machines12010074

[18] Liufu K., Liu Q., Lu Y., et al. Multiobjective optimization on cooperative control of autonomous emergency steering and occupant restraint system for enhancing occupant safety. *Accid. Anal. Prev*., 2021, vol. 159, no. 4, art. 106302.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106302

[19] Xiang Z., Xiang F. Multi-parameter and multi-objective optimization of occupant restraint system in frontal collision. *Wuhan Univ. J. Nat. Sc*., 2023, vol. 28, no. 4, pp. 324–332. DOI: https://doi.org/10.1051/wujns/2023284324

[20] Gu X., Lu J. Reliability-based robust assessment for multiobjective optimization design of improving occupant restraint system performance. *Comput. Ind*., 2014, vol. 65, no. 8, pp. 1169–1180. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2014.07.003

[21] Vogl T.P., Mangis J.K., Rigler A.K., et al. Accelerating the convergence of the back-propagation method. *Biol. Cybern*., 1988, vol. 59, no. 4-5, pp. 257–263.
DOI: https://doi.org/10.1007/BF00332914

[22] MacKay David J.C. Bayesian interpolation. *Neural Comput*., 1992, vol. 4, no. 3, pp. 415–447. DOI: https://doi.org/10.1162/neco.1992.4.3.415

[23] Gao D., Yao B., Chang G., et al. Multi-objective optimization design of vehicle side crashworthiness based on machine learning point-adding method. *Appl. Sc*., 2022, vol. 12, no. 20, art. 10320. DOI: https://doi.org/10.3390/app122010320

[24] Fang J., Sun G., Qiu N., et al. On design optimization for structural crashworthiness and its state of the art. *Struct. Multidisc. Optim*., 2017, vol. 55, no. 3, pp. 1091–1119. DOI: https://doi.org/10.1007/s00158-016-1579-y

[25] Joodaki H., Gepner B., Kerrigan J. Leveraging machine learning for predicting human body model response in restraint design simulations. *Comput. Methods Biomech. Biomed. Eng*., 2021, vol. 24, no. 6, pp. 597–611.
DOI: https://doi.org/10.1080/10255842.2020.1841754

[26] Horii H. Advancement of vehicle occupant restraint system design by integration of artificial intelligence technologies. *Int. J. Transp. Dev. Integr*., 2021, vol. 5, no. 3, pp. 242–253. DOI: https://doi.org/10.2495/TDI-V5-N3-242-253

[27] Kurtaran H., Eskandarian A., Marzougui D., et al. Crashworthiness design optimization using successive response surface approximations. *Comput. Mech*., 2002, vol. 29, no. 4, pp. 409–421. DOI: https://doi.org/10.1007/s00466-002-0351-x

[28] Eggers A., Eickhoff B., Dobberstein J., et al. Effects of variations in belt geometry, double pretensioning and adaptive load limiting on advanced chest measurements of THOR and Hybrid III. *Proc. IRCOBI Conf*., 2014, pp. 347–358.

Goncharov R.B. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Wheeled Vehicles, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Zuzov V.N. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Wheeled Vehicles, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Kositsyn B.B. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Wheeled Vehicles, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Padalkin B.V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Multi-Purpose Tracked Vehicles and Mobile Robots, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Goncharov R.B., Zuzov V.N., Kositsyn B.B., et al. Problems of searching for rational parameters of active component parameters in a car's passive safety system. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2026, no. 3 (158), pp. 54–80 (in Russ.). EDN: ILKVZS