

Ю. А. Дьячков, В. В. Келасьев, А. Н. Щербаков

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ СВОЙСТВ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСКИ АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Аннотация. Рассмотрена проблема автоматизации поиска оптимальных параметров упругих элементов подвески автотранспортного средства в условиях многих критериев и высокой размерности пространства поиска. Сформирован инструментальный поиск, включающий: аппарат автоматизированного формирования планов численного эксперимента, построения полиномиальной модели исследуемого процесса, параметрической оптимизации варьируемых параметров; генетический алгоритм изолированного развития популяций; генетический алгоритм на основе островной модели развития популяций; общую структуру поиска оптимального по Парето решения с учетом значимости частных критериев качества проекта. Приведены результаты решения двух примеров определения массово-габаритных и установочных параметров ресурс транспортных средств.

Ключевые слова: автоматизация поиска, размерность поиска, многокритериальность, автотранспортное средство, упругие элементы подвески, планирование эксперимента, полиномиальная модель, генетический алгоритм, островная модель, оптимальность по Парето.

Abstract. The article considers a problem of automation of optimal parameters search for elastic spring units of a vehicle influenced by multiple criteria and high dimensionality of search space. The authors have generated the tooling for the search: the apparatus of automatic formation of plans of numerical experiments, creation of polynomial model of researched processes, parameter optimization of varied parameters; the genetic algorithm of insulated development of populations; the genetic algorithm on the basis of island model of development of populations; the common structure to search the Pareto optimal solution taking into account significance of private criteria of the project performance. The article adduces the solution results for two problems - determination of mass-dimensional and setup parameters of transport springs.

Key words: search automation, dimensionality of searching, multicriteria, vehicle, elastic spring units, plan of experiment, polynomial model, genetic algorithm, island model, pareto optimality.

Введение

В практике проектирования автотранспортных средств (АТС) одной из проблем является определение способов автоматизированного решения задач высокой размерности при наличии комплекса противоречивых требований к качеству объекта проектирования. Подобные задачи могут быть решены на основе комплексного инструмента, включающего взаимодополняющие алгоритмы поиска решений. В состав такого инструмента могут входить методы эволюционного подхода, классические методы параметрической оптимизации на основе как исходной, так и регрессионной модели процесса. Совокупное использование нескольких взаимодополняющих методов обеспечивает гарантированное нахождение варианта технического решения в условиях высокой размерности и многокритериальности поиска в автоматизированном

режиме. Приведены результаты задач оптимизационного синтеза свойств упругих элементов подвесок АТС.

1. Формирование комплексного поискового инструмента

Эволюционный подход обеспечивает организацию адаптивного случайного поиска инженерного решения в течение нескольких поколений (эпох) на основе «естественного отбора». Популярным инструментом в эволюционном подходе является генетический алгоритм. Это обусловлено определенным изяществом самой идеи, относительной простотой реализации и, основное, возможностью получения практически значимого решения в случаях, когда другие алгоритмы требуют существенных затрат ресурсов на их реализацию.

Множественность реализации генетических алгоритмов в идеале приводит к формированию популяции – «клонов» лучшего решения. Остальные – не «выживают» или теряют возможность попадания в популяцию по причине своей технической неотличимости, так как в процессе вычислений объем популяции является постоянной величиной.

В работе использован сценарий поиска «оптимального» технического решения, основанный на простейших непротиворечивых рассуждениях.

1. Начальную популяцию формируем на основе планов математической теории планирования экспериментов. Это обеспечивает получение набора особей-решений, который при минимальном числе вариантов гарантированно содержит «оптимальное» решение в границах используемого перечня свойств. Сами границы свойств задаются двумя векторами – сочетаниями верхних и нижних уровней варьирования факторов-свойств. Использование такого подхода обеспечивает возможность «попутной» оптимизации «попутно» формируемой регрессионной модели процесса.

2. Для каждой строки плана (кодированные в интервале $+1..-1$ значения свойств решений) определяется приспособленность-качество, после чего осуществляется ранжирование вариантов по величине критерия качества. При этом первым родителем будет «оптимальное» решение, найденное в процессе оптимизации регрессионной модели исследуемого процесса. Вторым вариант-родитель следует выбирать случайным образом на основе равномерного распределения, так как поверхность поля решений исследователю недоступна.

3. По той же причине недоступности поля решений исследователю выбирается место разделения особей-вариантов на основе случайного равномерного распределения. Используем одну точку кроссинговера, получаем две новые особи.

4. На основе равномерно распределенной случайной величины выбираем для каждой из двух новых особей отдельно подлежащее стороннему воздействию свойство, изменяя его значение на $\pm\delta\%$. Знак изменения выбирается из условия невыхода за границы интервала изменения свойств.

5. После определения критерия качества для обоих полученных таким образом решений определяем их место в ранжированной популяции. Последние образующиеся при этом две «лишние» особи с низкими значениями критерия качества (приспособленностью) выводим из исследуемой популяции.

6. «Лишние особи» можно поместить в «резервную» популяцию для последующего использования.

7. Момент окончания поиска (число эпох-итераций) отслеживается исследователем-наблюдателем или автоматически по одному из специфичных условий поиска.

Инструменты математической теории планирования эксперимента позволяют существенно повысить поисковый потенциал генетического алгоритма при использовании планов стабильной структуры независимо от числа варьируемых параметров. Такие планы можно формировать в автоматизированном режиме по заданному числу исследуемых свойств технического решения.

Наличие стабильного числа блоков таких планов позволяет организовать параллельные исследования популяций – блоков плана в «изолированном» варианте, а также «островную» модель популяций и их параллельное исследование с обменом родительских особей между популяциями-островами через определенное число эпох-итераций. Таким образом, у исследователя появляются три (с учетом «попутной» оптимизации регрессионной модели процесса) самостоятельных инструмента поиска оптимального технического решения.

В качестве рабочих использованы насыщенные D -оптимальные планы Рехтшафнера [1], структура блоков которых показана в табл. 1. При этом «попутная» регрессионная модель строится в виде полинома второго порядка, «достаточно точно» аппроксимирующего реальные модели исследуемых технических процессов.

Таблица 1
Уровни варьирования оптимизируемых параметров

Параметры	Уровни варьирования	
	верхний	нижний
Длина трубы, м	1,200	0,800
Наружный диаметр трубы, м	0,250	0,100
Толщина трубы, м	0,015	0,008
Угол β , град.	45,000	35,000
Диаметр торсиона, м	0,040	0,080
Длина торсиона, м	0,600	0,400

Многорежимность функционирования изделия приводит к необходимости формирования компромиссного варианта решения, в наибольшей степени удовлетворяющего всей совокупности предъявляемых к нему противоречивых требований. По этой причине использован интегральный критерий качества процесса, исключающий возможность компенсации потери качества одних показателей высоким качеством других показателей. Его использование основывается на принципе Парето. Задача с множеством частных критериев (φ_i) сведена к задаче с одним интегральным критерием качества (K). При этом значения весовых коэффициентов (ω_i) частных критериев определялись и уточнялись автоматически в ходе решения задачи. Такой подход обеспечил получение оптимального компромиссного варианта, сбалансированного по противоречивости частных критериев. При этом интегральный показатель качества может представляться следующим образом [2]:

– если $\varphi_i \gg \min$, то

$$K = (\omega_i^2 (\varphi_i / \varphi_{i\min} - 1)^2)^{0,5};$$

– если $\varphi_i \gg \max$, то

$$K = (\omega_i^2 (\varphi_{i \max} / \varphi_i - 1)^2)^{0,5},$$

здесь φ и ω – частные критерии качества и их «весовые» значения.

Искомый вектор частных критериев Ω является нормалью к поверхности Парето. Его поиск и определение оптимального решения проводились в следующей последовательности:

– проводилась минимизация отдельно по каждому критерию качества (например, $\varphi_{1 \min}$), остальные частные критерии вычислялись с учетом полученных таким образом параметров модели (φ_i при $\varphi_{1 \min}$);

– по результатам частных оптимизаций формировалась матрица Φ .

Это позволило определить область изменений частных критериев.

Матрица Φ связана с вектором весов Ω соотношением

$$\Phi \Omega = e,$$

где $e^T = [1, 1, \dots, 1]$ – единичный вектор.

Значения весов частных критериев:

$$\Omega = \Phi^{-1} e.$$

С найденным вектором Ω проводилась минимизация интегрального критерия качества.

На основе рассмотренного подхода реализован программный модуль, обеспечивающий возможность автоматизированного решения задач оптимизации упругих элементов АТС. Практика его применения свидетельствует о высокой эффективности «тройной» оптимизации, возможности обнаружения требуемых результатов различными составляющими инструмента в разных условиях поиска.

2. Оптимизация подвески самоходного шасси

Одной из задач, реализованных в проектной разработке самоходного шасси, являлась задача оптимизации массово-габаритных и установочных параметров его подвески торсионного типа.

Постановка задачи. Определить набор оптимальных значений параметров торсионной подвески самоходного разрыхлителя почвы для следующих условий:

1) общий вид изделия показан на рис. 1;

2) упругие элементы подвески (торсион, труба) изготовлены из легированной стали 45ХНМФА и подвергнуты заневоливанию и поверхностному упрочнению, что обеспечивает предельное касательное напряжение $[\tau_k] = 1100$ МПа;

3) изменяемые параметры и границы их изменения приведены в табл. 1.

Частными критериями качества проекта являются: клиренс ($\varphi_1 = H \gg \max$); масса торсиона ($\varphi_2 = M_t \gg \min$); масса трубы ($\varphi_3 = M_{tr} \gg \min$); касательные напряжения торсиона при статической нагрузке ($\varphi_4 = [\tau_{kt}] \gg \min$); касательные напряжения трубы при статической нагрузке ($\varphi_5 = [\tau_{ktr}] \gg \min$);

4) интегральный критерий качества ($K \gg \min$) для указанных частных критериев имеет вид

$$K = (\omega_i^2 (\varphi_i / \varphi_{i \min} - 1)^2)^{0,5}.$$

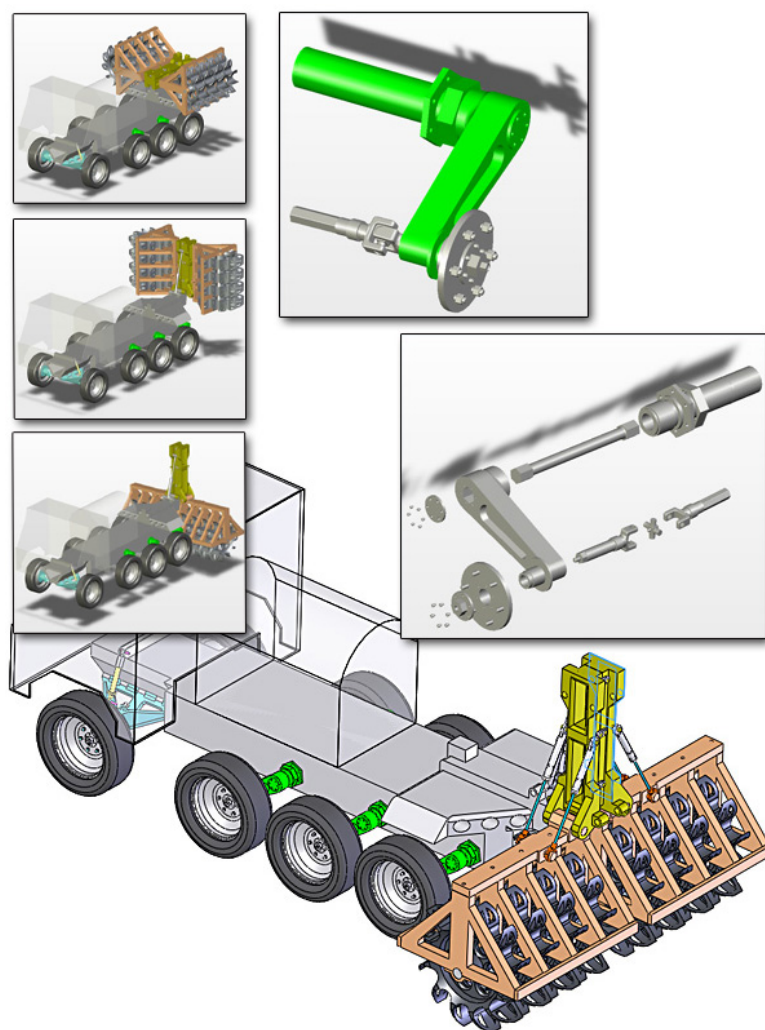


Рис. 1. Общий вид самоходного шасси

Для формирования исходных популяций и проведения исследования в разработанном программном модуле задавались: число варьируемых параметров, вектор значений верхних и нижних уровней варьирования.

В ходе решения автоматически: формировались план численного эксперимента и расширенная матрица планирования; проводился численный эксперимент с использованием математической модели, описывающей существо исследуемой задачи; строилось уравнение регрессии в виде полинома второго порядка – определялись коэффициенты уравнения регрессии; определялся минимум интегрального критерия качества на основе метода покоординатного спуска с обучением с использованием регрессионной модели процесса; формировались 10 исходных популяций (5 – для исследования в изолированном варианте развития, 5 – для исследования островной модели); с использованием двух моделей эволюционного развития определялись наборы параметров, соответствующие оптимумам частных критериев качества; определялись «веса» частных критериев качества и наборы параметров, соответствующие оптимумам интегрального критерия качества.

В интерактивном режиме осуществлялась вариация общего числа эпох исследования TG (от 50 до 300) и числа эпох, через которые осуществлялся обмен родительскими особями для островной модели исследования opt (от 2 до 70). Конечные результаты оптимизации для $TG = 300$ и $opt = 22$ показаны в табл. 2.

Таблица 2

Свойства подвески по результатам оптимизации

Свойства	Варианты решений				
	1	2	3	4	Регрес.
Варьируемые параметры					
Длина трубы, м	0,800	0,800	0,800	0,800	0,836
Наружный диаметр трубы, м	0,225	0,225	0,225	0,221	0,197
Толщина трубы, м	0,0080	0,0088	0,0088	0,0088	0,012
Угол β , град.	45,0	45,0	45,0	45,0	40,9
Диаметр торсиона, м	0,058	0,058	0,058	0,058	0,064
Длина торсиона, м	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Вычисляемые параметры					
Клиренс, м	0,433	0,433	0,433	0,433	0,437
Масса торсиона, кг	21,003	21,003	21,003	21,003	27,134
Масса трубы, м	20,740	22,854	22,854	22,408	9,761
Максимальные касательные напряжения в торсионе, МПа	199,7	199,7	199,7	199,7	167,6
Максимальные касательные напряжения в трубе, МПа	26,7	24,5	24,5	25,5	177,4
Угол статической деформации подвески, град.	4,56	4,55	4,55	4,56	5,20
Угол максимальной деформации подвески, град.	29,68	29,68	29,68	29,80	33,434
Интегральный критерий	3,157	3,172	3,172	3,182	3,944

Так как сутью генетического алгоритма является формирование наиболее приспособленной к существованию популяции, то в результате решения задачи оптимизации пользователь получает не один оптимальный вариант проекта, а целый их набор. Это дает проектировщику возможность выбора окончательного варианта исходя из наличных ресурсов. В табл. 2 приведены первые четыре варианта, удовлетворяющие совокупности требований к проекту. В последнем столбце представлены результаты оптимизации проекта по регрессионной модели исследуемого процесса статического нагружения подвески самоходного основания.

Исходная модель процесса сформирована на основе зависимостей, приведенных в [3, 4]. Реализованный в программном модуле алгоритм оптимизации базируется на методах, описанных в [5, 6].

3. Оптимизационный синтез свойств листовой рессоры

Листовая рессора как объект синтеза находится в сложной взаимосвязи с элементами системы «дорога – автомобиль – водитель – груз», противоречиво влияя на показатели качества этой системы: плавность хода; управляемость; устойчивость; комфортность; сохранность свойств груза; степень воздействия на покрытие дороги.

Дополнительная сложность учета взаимодействия обусловлена еще и тем, что количественные и качественные характеристики такого влияния могут кардинально изменяться в зависимости от габаритов и массы автомобиля, величины перевозимого груза и распределения нагрузки по осям автомобиля, упругих и демпфирующих свойств элементов подвески. При этом упругие свойства рессоры определяются конкретным набором ее конструктивных параметров и остаются практически неизменными в процессе ее эксплуатации.

Показателями, характеризующими оптимальность конструкции рессоры, принимались: L – длина коренного листа рессоры ($L \rightarrow \max$); M – масса рессоры ($M \rightarrow \min$); S – суммарная боковая поверхность сборки рессоры ($S \rightarrow \min$); $K_{ст}$ – коэффициент запаса прочности при разовом нагружении ($K_{ст} \rightarrow \max$); K_d – коэффициент запаса прочности по долговечности ($K_d \rightarrow \max$); σ_d – среднеквадратическое напряжение при динамическом воздействии профиля дороги для заданной скорости движения автомобиля ($\sigma_d \rightarrow \min$); a_d – среднеквадратическое ускорение при динамическом воздействии профиля дороги для заданной скорости движения автомобиля ($a_d \rightarrow \min$).

Расчеты проведены для дорог двух типов (автомагистрали и шоссе в плохом состоянии), для которых пробег автомобилей общего назначения для различных регионов РФ составляет 90 % и более.

Применительно к этим типам дорог использованы зависимости для определения спектральных плотностей микропрофиля от скорости движения автомобиля (v) и частоты колебаний (ω): $S(\omega) = q^2 S^*(\omega)$ – общий вид спектральной плотности; $S^*(\omega) = 0,05v/(\omega^2 + 0,0225v^2)$ – нормированная спектральная плотность для дороги первого типа; $S^*(\omega) = 0,54v/(\omega^2 + 0,04v^2) + 0,0024v(\omega^2 + 0,36v^2)/((\omega^2 - 0,36v^2) + 0,0036v^4)$ – нормированная спектральная плотность для дороги второго типа; q – среднеквадратическое значение ординаты микропрофиля (0,45–1,4 см для цементобетонного и асфальтового покрытия).

В ходе решения оптимизировались девять переменных: L – длина рессоры (коренного листа); h , R – толщина и кривизна листов; a – ширина листа в центре; a/b – трапецевидность листа (b – ширина листа у ушка); L_{i-1}/L_i – соотношения длин листов рессоры; $L_{ст}$ – длина накладок крепления рессоры с мостом; α_c – угол установки серьги; L_c – длина серьги.

Особенностью данной задачи является распределенная система свойств рессоры, представленная ее 3D-моделью. С целью сокращения затрат на формирование исходных моделей листовой рессоры проведена выборка десяти строк плана ($k + 1$) на основе равномерного распределения случайной величины в диапазоне 1...55. Полученная таким образом выборка (табл. 3) использована для построения промежуточной модели в мультипликативной форме.

Проведена оценка статического коэффициента запаса прочности $K_{ст}$ и коэффициента запаса по долговечности K_d . Для получения значения последнего коэффициента принимались допущения:

- нагрузка симметричная знакопеременная;
- модель поведения материала подчиняется схеме Goodman и составляет 65 % от максимальной для статического нагружения (75000 N);
- минимальное значение числа циклов равно 1000000.

По результатам моделирования получены значения коэффициента K_d и предельно возможное число циклов до разрушения (прогнозная кривая усталости).

Выборка из матрицы D -оптимального плана Рехтшафнера

№ опыта	Факторы								
	L , мм	R , м	b , мм	a/b	$(a + b)/2h$	L_{i-1}/L_i	$L_c/L_1 \cdot 100$, %	α_c , рад.	$L_{ст}$, мм
1	900	1800	70	1,00	6	0,75	5	5,498	160
4	1300	6666	70	1,50	10	0,95	10	7,069	240
17	1300	1800	70	1,00	6	0,75	5	7,069	160
18	1300	1800	70	1,00	6	0,75	5	5,498	240
22	900	6666	70	1,00	6	0,95	5	5,498	160
31	900	6666	90	1,00	6	0,75	5	5,498	240
41	900	1800	70	1,00	6	0,95	10	5,498	160
44	900	1800	70	1,00	6	0,75	10	7,069	160
47	1300	4233	80	1,25	8	0,95	7,5	6,283	200
50	1100	4233	80	1,50	8	0,95	7,5	6,283	200

Далее определялись характеристики воздействия микропрофиля дороги как случайного силового фактора на рессору. По заданным значениям спектральной плотности перемещения для двух типов дорог и двух скоростей движения автомобиля определялись: σ_d – среднееквадратическое напряжение при динамическом воздействии профиля дороги для заданной скорости движения автомобиля; a_d – среднееквадратическое ускорение при динамическом воздействии профиля дороги для заданной скорости движения автомобиля. По результатам численного эксперимента определялись парные коэффициенты корреляции частных критериев.

На основе анализа данных из дальнейшего использования исключены частные критерии S и $K_{ст}$. Критерии σ_d и a_d оставлены как имеющие разные степени корреляции с другими частными критериями качества.

Точность предсказания результатов построенными мультипликативными моделями оценивалась коэффициентом парной корреляции $r(T, P)$ значений исходных данных (T – табличные) и полученных расчетом по модели (P – расчетные). Меньшая точность аппроксимации характерна для критериев σ_d и a_d .

Для варианта дороги третьей категории и скорости движения 25 км/ч получены аналогичные данные, обеспечивающие удовлетворительное прогнозирование значений частных критериев качества по всем строкам плана эксперимента.

Следует отметить, что поиск оптимальных наборов параметров и характеристик технических объектов имеет итерационную структуру, предполагающую многократное уточнение данных по результатам промежуточных исследований. По этой причине нет необходимости в попытках получения конечного решения единственным «разовым» расчетом.

Вариация общего числа эпох исследования TG (от 50 до 5000) и числа эпох обмена родительскими особями для островной модели исследования opt (от 2 до 70) осуществлялась в интерактивном режиме. Результаты оптимизации для $TG = 300$ и $opt = 7$ для двух частных критериев качества приведены в табл. 4. Приведенные параметры рессоры обеспечивают удовлетворение комплекса противоречивых требований для автомобилей общего назначения с учетом диапазона изменения ее свойств, микропрофиля двух типов дорог и типовых скоростей движения автомобиля по ним.

Таблица 4

Свойства рессоры по результатам оптимизации

Свойства	Варианты решений			
	дорога I типа		дорога II типа	
	ГО	Регрес.	ГО	Регрес.
Варьируемые параметры				
L , мм	1300	1023	1300	970
R , м	1800	1842	1800	2123
b , мм	70,00	74,00	70,00	70,27
a/b	1,50	1,47	1,5	1,48
$(a + b)/2h$	6,00	6,16	6,00	6,04
L_{i-1}/L_i	0,75	0,77	0,75	0,78
$L_c/L_1 \cdot 100$, %	5,00	5,34	5,00	5,40
α_c , рад.	5,498	5,635	5,498	5,641
$L_{сг}$, мм	196	182	160	187

По результатам моделирования установлена возможность использования единой конструкции листовой рессоры с вариацией длин накладок для крепления рессоры в зависимости от региона эксплуатации автомобиля (196 и 160 мм, табл. 4). Полученные результаты обеспечивают использование предложенного в работе метода в качестве специфичного модуля перспективных систем автоматизированного синтеза узлов и агрегатов автомобиля с учетом скоростей их движения, микропрофиля дорог и упругих свойств элементов подвески.

Заключение

Сформированный инструментарий оптимизации свойств АТС обеспечивает реализацию в автоматизированном режиме гибкой технологии обнаружения допустимых вариантов, сбалансированных по противоречивости частных критериев качества.

Использование возможностей математической теории планирования эксперимента обеспечивает автоматизированное построение необходимого числа популяций для двух разновидностей генетического алгоритма, формирование регрессионной модели исследуемого процесса. Встроенный алгоритм оптимизации регрессионной модели дает возможность определить первый «лучший» вариант, используемый в качестве начальной родительской особи, что стратегически гарантирует приближение последующих вариантов к некоторой области оптимальных решений.

Парное использование генетических алгоритмов с моделью изолированного развития популяций и островной моделью гарантирует схождение поиска к глобальному оптимуму

Сведение многокритериальной задачи к задаче с одним интегральным критерием позволяет в автоматическом режиме учесть «веса» этих частных критериев сначала для всего интервала изменения варьируемых параметров, а затем и в области глобального оптимума.

Полученные результаты обеспечивают использование предложенного в работе метода в качестве специфичного модуля перспективных систем автоматизированного синтеза узлов и агрегатов автомобиля с учетом скоростей их движения, микропрофиля дорог и упругих свойств элементов подвески.

Список литературы

1. **Новик, Ф. С.** Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение ; София : Техника, 1980. – 304 с.
2. **Петренко, А. И.** Основы автоматизации проектирования / А. И. Петренко. – Киев : Техника, 1982. – 295 с.
3. **Орлов, П. И.** Основы конструирования : справочно-методическое пособие : в 2-х кн. Кн. 2 / П. И. Орлов ; под ред. П. Н. Учаева. – 3-е изд., исправл. – М. : Машиностроение, 1988. – 544 с.
4. **Носов, Н. А.** Расчет и конструирование гусеничных машин / Н. А. Носов, В. Д. Галышев, Ю. П. Волков, А. П. Харченко. – Л. : Машиностроение, 1972. – 560 с.
5. **Геминтерн, В. И.** Методы оптимального проектирования / В. И. Геминтерн, Б. М. Каган. – М. : Энергия, 1980. – 160 с.
6. **Химмельблау, Д.** Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1975. – 534 с.

Дьячков Юрий Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой транспортных
машин, Пензенский государственный
университет

E-mail: pnz-transmash@yandex.ru

Dyachkov Yury Alekseevich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of transport
machines, Penza State University

Келасьев Василий Владимирович

старший преподаватель, кафедра
транспортных машин, Пензенский
государственный университет

E-mail: pnz-transmash@yandex.ru

Kelasyev Vasily Vladimirovich

Senior lecturer, sub-department
of transport machines,
Penza State University

Щербаков Андрей Николаевич

аспирант, Пензенский
государственный университет

E-mail: pnz-transmash@yandex.ru

Shcherbakov Andrey Nikolaevich

Postgraduate student,
Penza State University

УДК 681.5; 629.33

Дьячков, Ю. А.

Автоматизированный синтез оптимальных свойств упругих элементов подвески автотранспортного средства / Ю. А. Дьячков, В. В. Келасьев, А. Н. Щербаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 2 (22). – С. 157–166.