

УДК 629.7.01

Метод оптимизации упруго-демпферных подвесок

В.А. Павлюченко¹, Е.А. Стрельникова², С.В. Филипковский³¹Государственное предприятие «Антонов»²Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины,
ул. Пожарского, 2/10, г. Харьков, 61046, Украина³Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
elena15@gmx.com

Целью данного исследования является усовершенствование методов оптимального поиска для определения параметров амортизаторов, которые обеспечивают защиту от вибраций и ударных эксплуатационных нагрузок. В предлагаемом подходе использован ряд методов, которые названы гибридами. Предлагаемый метод оптимизации является аналогом генетического алгоритма. Задан критерий, по которому выбирают наиболее эффективные в текущей ситуации методы. В указанный критерий входит информация, характеризующая признаки конструкции и метрические параметры пространства, где осуществляется поиск; предысторию вычислительного процесса, по которой устанавливается возможное продолжение; природу системы функций, определяющих решаемую задачу. Введено адаптивное управление, которое осуществляет получение векторов решений, направлений поиска и поисковых шагов, соответственно изменяющейся ситуации. Поскольку эффективно минимизировать массу удается только при совместной минимизации перегрузки – параметра, на границу которого выходит процесс поиска решения задачи, и массы системы, то наиболее логично использовать многокритериальную оптимизацию. В данном случае это означает одновременную оптимизацию массы и перегрузки. Ограничения накладываются на конструктивные размеры и прочность элементов оборудования. В результате проведенной оптимизации уменьшена масса элементов подвески и воздействующая на защищаемый элемент конструкции перегрузка. Определены пределы, до которых могут быть уменьшены масса и перегрузка.

Ключевые слова: амортизационная подвеска, масса, перегрузка, оптимизация, гибридный адаптивный метод.

The design of equipment at overloads in aircrafts requires effective methods for analyzing the vibration characteristics of suspensions, as well as the developing the synthesis methods to solve the topical problems. For these purposes the adaptive hybrid optimization method is developed. The objects of optimization are different suspensions of space-crafts and aircrafts units with asymmetrical distribution of masses and different arrangement of joints. Joints are the attachment points in the form of shock absorbers and bellows for joining with pipes. Blocks are considered as solid bodies. The links are highlighted as optimized elements. The main objective of the research is to improve the method of optimizing the parameters of shock absorbers that have to provide protection from vibrations and operating shock loads. The proposed optimization method uses a number of different methods that are operated together. Different criteria and their combination are chosen. These criteria include and overwork information that characterizes the changing situations; namely, mechanical and geometric information about structures, metric parameters of the space where the search is carried out, the prehistory of the computational process by which the possible continuation is established, and nature of the functions system that determine the problem under consideration. Adaptive control is introduced, and it obtains decision vectors, search directions and search steps, respectively to the changing situations. It is possible to effectively minimize the mass of system only with minimization of overload which is the variable parameter. Its boundary determines the domain where the search process of solution is accomplished. So, it is natural to use multi-criteria optimization. In this case, at the same time the optimization of masses and overloads is in progress. Restrictions are imposed on the structural dimensions and strength characteristics of the shock absorbers. As a result of the optimization, the weight of the suspension elements and the overload acting on the suspended block are reduced. The limits are determined of mass and overload diminishing.

Keywords: shock-proof suspension, mass, g-load, optimization, hybrid adaptive method.

Метою роботи є удосконалення методу оптимального пошуку для визначення параметрів амортизаторів, які забезпечують захист від вібрацій та ударних експлуатаційних навантажень. У запропонованій процедурі оптимізації використано ряд методів, які названо гібридами. Цей метод оптимального пошуку є аналогом генетичного алгоритму. Задается критерій, за яким вибирають найбільш ефективні в обчислювальній ситуації пошуку гібриди. В цей критерій входить інформація, яка характеризує ознаки структури і метричних властивостей простору, де здійснюється пошук; враховує передісторію обчислювального процесу. Це дає змогу встановити найбільш ефективне можливе продовження, знайти характеристики системи функцій, які визначають задачу, що розглядається. Введено адаптивне керування, яке здійснює отримання векторів розв'язків, напрямків пошуку і пошукових кроків відповідно ситуації, що змінюється. Встановлено, що ефективно мінімізувати масу вдається лише при спільній мінімізації перевантаження – параметра, на граничні характеристики якого виходить процес пошуку розв'язку задачі. Тому найбільш логічно використовувати багатокритеріальну оптимізацію. В даному випадку це означає одночасно мінімізувати масу і перевантаження. Обмеження накладають на конструктивні розміри і міцність елементів обладнання. У результаті проведеної оптимізації зменшено масу елементів підвіски і перевантаження, що діє на систему. Визначено межі, до яких може бути зменшено масу і перевантаження.

Ключові слова: амортизаційна підвіска, маса, перевантаження, оптимізація, гібридний адаптивний метод

1 Введение

Оборудование различного функционального назначения в летательных аппаратах требует тщательного исследования прочностных и динамических характеристик. Это приводит к необходимости разработки эффективных методов анализа вибрационных характеристик и напряженно-деформированного состояния подвески, а также соответствующего специфике задачи метода оптимального синтеза. Целью работы является усовершенствование метода оптимизации параметров амортизаторов, которые обеспечивают защиту от вибрации и ударных эксплуатационных нагрузок. Задача синтеза реальных конструкций моделируется сложными многомерными и нелинейными системами дифференциальных уравнений в частных производных со многими функциональными связями и ограничениями [1, 2]. В статье [3] предложены математические формулировки основных проблем оптимизации, дано описание и сравнение различных методов решения поставленных задач. В работе [4] рассмотрены задачи об определении оптимальных параметров, определяющих динамику полета. В [5] получены оптимальные параметры крупногабаритных ветроустановок. Практика решения оптимизационных задач такого уровня сложности показывает, что гарантированное достижение результата возможно лишь при последовательном и совместном использовании нескольких методов прямого поиска экстремума [6, 7]; это является более гибким и надежным подходом по сравнению с дифференциальными методами высокого порядка. В работе [8] проведен анализ предлагаемых в конечноэлементных комплексах методов оптимизации и показано, что они малоэффективны в задачах, в которых области изменения варьируемых параметров имеют сложную форму. Гибридный адаптивный метод оптимизации позволяет эффективно решать задачи оптимального синтеза упругих подвесок с нелинейным демпфированием.

2 Постановка задачи оптимизации

Оптимальное проектирование конструкций проводят путем минимизации (максимизации) некоторой функции цели путем надлежащего выбора варьируемых параметров при заданных ограничениях, которые в свою очередь, являются заданными функциями варьируемых исходных параметров. Рассматриваемая экстремальная задача, по сути, представляет собой задачу нелинейного программирования [6], когда требуется найти вектор варьируемых параметров

$$X^* = \arg \operatorname{extr}_{X \in G} F(X) \quad (2.1)$$

в допустимой области

$$G = \{X : G_i(X) \geq 0, i = \overline{1, m}\} \neq \emptyset \quad (2.2)$$

конечномерного параметрического пространства E_n , доставляющий экстремум заданной функции цели $F(X)$.

3 Гибридный адаптивный метод оптимизации

Предлагаемая схема гибридной оптимизации для решения задачи вида (2.1) – (2.2) построена таким образом, что обходится без каких-либо предварительных преобразований решаемой задачи и не предъявляет никаких специальных требований к функциям цели $F(X)$ и

ограничениям $G^i(X) \geq 0, i = \overline{1, m}$. Учитывается только используемая коалиция гибридиентов (см. п. 4.1.2) и заранее описывается ограниченный набор наиболее характерных ситуаций $\{\sigma_i\}$, могущих возникнуть в реальной задаче оптимизации.

Суть предлагаемого метода оптимизации заключается в том, что выбран ряд методов-гибридиентов $\{M_i\}$, ($i = 1, 2, \dots, N$). Задан критерий $Q(\sigma)$, который выясняет в процессе решения, какой из гибридиентов в данной ситуации σ наиболее эффективно может использоваться для достижения поставленной цели. В критерий ситуации Q входит независимая от методов информация, которая характеризует собственно меняющуюся ситуацию; а именно признаки структуры и метрические параметры пространства, где осуществляется поиск; предысторию вычислительного процесса, по которой устанавливается возможное продолжение; природу системы функций, определяющих решаемую задачу; и т. п.

Далее вводится функция управления, на основе которой устанавливают адаптивную стратегию введения в действие конкретного гибридиента или группы гибридиентов. Для того, чтобы общее действие гибридиентов обеспечивало более эффективное достижение цели, нежели каждый из них в отдельности, вводят специальное адаптивное управление, которое осуществляет получение минимизирующей последовательности векторов $\{X_k^r\}$, направлений поиска $\text{Dir } X_k^r$ и поисковых шагов h_k^r , адаптируемых соответственно изменяющейся ситуации σ .

Операцию гибридизации или получение гибридной точки на k -м шаге процесса можно определить в виде матрично-векторного «произведения»

$$X_k^r = (U_j^{(i)})(X_j^{(i)} V(r)),$$

$$\sum_{i=1}^N U_j^{(i)} = \sum_{j=k-r+1}^N V_j(r) = 1, \quad j = \overline{k-r+1, k}, \quad k \geq r,$$

где $(U_j^{(i)})$ и $(X_j^{(i)})$ – матрицы (размерности $r \times N$) управления и состояния, элементами которых являются управления (скаляры) $U_j^{(i)}$ и приближения (векторы размерности n) гибридиентов на данном шаге j ; $V(r)$ – r -мерный «сжимающий» вектор со скалярными компонентами; r – глубина памяти гибридиентов; N – их количество.

Специальное произведение скалярной $(U_j^{(i)})$ и векторной $(X_j^{(i)})$ матриц дает вектор Z , компонентами которого являются векторы в виде

$$Z_j = \sum_{i=1}^m U_j^{(i)} X_j^{(i)}, \quad j = \overline{k-r+1, k}, \quad k \geq r,$$

а результатом произведения этого вектора на вектор $V(r)$ является n -мерный вектор

$$X_k^r = \sum_{j=k-r+1}^N V_j(r) \sum_{i=1}^N U_j^{(i)} X_j^{(i)}, \quad k \geq r.$$

На каждом шаге процесса $k \geq r$ проводится изъятие верхней и присоединение нижней строк матриц $(U_j^{(i)})$ и $(X_j^{(i)})$ так, что общее количество строк остается неизменным. Принятая глубина памяти r гибридного метода требует некоторого знания предыстории процесса, в котором учитывается r предыдущих приближений, а сжимающий вектор $V(r)$ играет роль механизма последовательного забывания старой информации. Компоненты $V_j(r)$ вектора $V(r)$ изменяются согласно некоторым законам от предыдущих к текущим. В [9, 10] доказано, что гибридный метод может решать широкий круг задач более эффективно, чем каждый из упомянутых гибридиентов.

Предлагаемая схема *гибридной оптимизации* для решения задачи нелинейного программирования (2.1) – (2.2) построена таким образом, что обходится без каких-либо предварительных преобразований решаемой задачи и не предъявляет никаких специальных требований к функциям цели $F(X)$ и ограничениям $G^i(X) \geq 0, i = \overline{1, m}$. Рассматривается только используемая коалиция гибридиентов и заранее описывается ограниченный набор наиболее характерных ситуаций $\{\sigma_i\}$, могущих возникнуть в реальной задаче оптимизации.

Будем различать следующие ситуации и их признаки.

1. *Стационарные ситуации*: а) размерность задачи; б) уровень трудновычислимости системы функций $F(X)$ задачи нелинейного программирования; в) ограничения в виде равенств; г) ограничения в виде неравенств; д) общее количество ограничений; е) выпуклость (вогнутость) функции цели и ограничений; ж) характерные особенности допустимой области; з) дискретность или непрерывность функций задачи и т.п. Названные конкретные ситуации достаточно устойчивы в пределах отдельно взятой задачи.

2. *Динамические ситуации*: а) пологий спуск с плавным изменением направления; б) крутой спуск; в) прямолинейный овраг с пологим спуском; г) изогнутый овраг; д)

спиралеобразный овраг; е) эллипсоидальная яма; ж) изменяющееся количество нарушенных ограничений и т.д. Эти ситуации отнесены к числу динамических, поскольку они лишь локально стационарны, т.е. по мере продвижения к экстремуму степень их проявления постоянно изменяется в одной и той же задаче.

По описанному набору ситуаций $\{\sigma_i\}$ может быть выбрано некоторое число соответствующих гибридных методов $\{M_i\}$, не обязательно равное количеству ситуаций. Следовательно, выбор гибридных методов как бы предрешен самим существом задачи оптимизации, связанной с предполагаемым набором возможных ситуаций. Естественно, в данном случае гибридными методами должны быть, по возможности простые, но достаточно эффективные поисковые методы.

Для построенного здесь варианта гибридного метода оптимизации в качестве гибридных методов приняты следующие методы (или их модификации): а) пошаговый адаптивный спуск [10]; б) схема Абрамова [10]; в) овражная модификация [9]; г) метод параллельных касательных ПАРТАН [11]; д) модификация метода скользящего допущения [10]; е) секущее движение вдоль границы [12] и ряд приемов, учитывающих те или иные проявления описанного набора ситуаций. Среди них отметим метод мультистарта [13]. При его использовании из множества допустимых значений параметров случайно или детерминировано выбирается некоторое подмножество из L точек. На каждом i -том подмножестве из случайной начальной точки делается локальный спуск в ближайший минимум любым локальным методом поиска.

В рассматриваемом гибридном адаптивном методе использование мультистарта осуществляется при переходе на новую гиперплоскость, рис. 3.1.

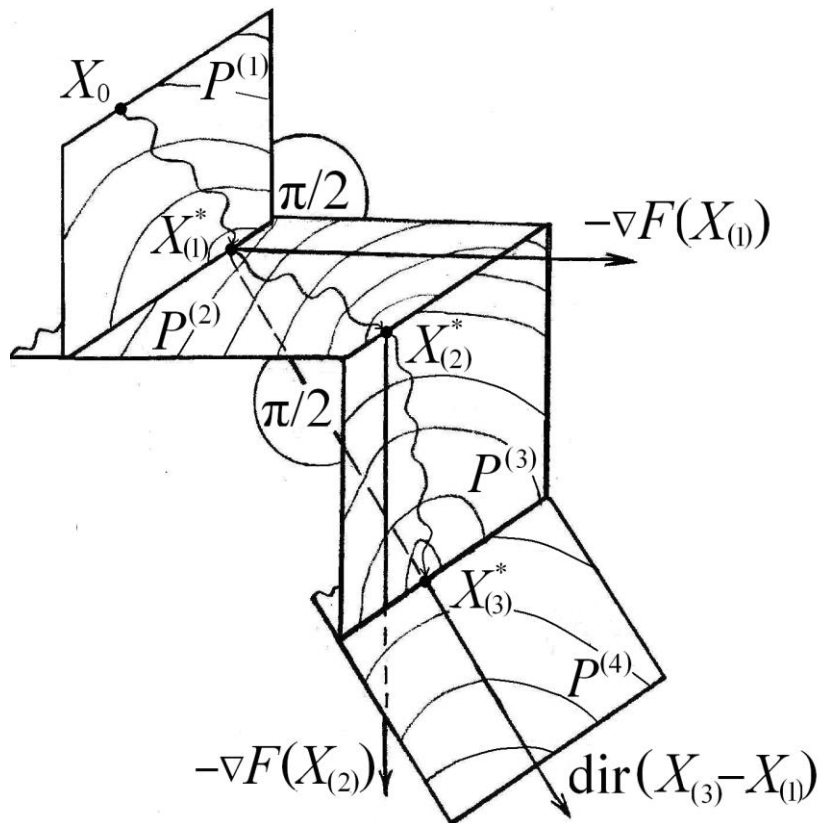


Рис. 3.1 Вариант поиска экстремума функции $F(X)$ в гиперплоскостном подпространстве $\{P^{(i)} \subset E_n\}$

Переход от точки $X_{(r-1)}^*$ к точке $X_{(r)}^*$ в $P^{(r)}$ происходит по ломаной траектории, определяющей гиперплоскость $P^{(r)}$, звеньями которой служат отрезки $\overline{X_{k0} X_{k+1,0}}$, а спуск по направлению $Y_k = \overline{\text{dir} X_{k0} X_{k+1,0}}$ осуществляется шагом $h_{kl}^{(r)}$ (k, l – номера направлений и шагов соответственно).

4 Оптимизация параметров подвески

Задача анализа – установить зависимости между параметрами объекта для задачи синтеза, решение которой даёт наиболее рациональные соотношения этих параметров, обеспечивающих выполнение необходимых критериев. В данном случае для определения перегрузок амортизатора и усилий в связях необходимо проинтегрировать уравнения движения.

Так как при колебаниях амортизатора на опорах угловые перемещения малы, используем уравнения движения, не учитывающие повороты тела [8]. Правая часть этой системы уравнений может быть вектором, состоящим из синусоидальных составляющих с одинаковой частотой в случае установившейся вибрации планера, ограниченной во времени функцией при внезапных и ударных воздействиях или произвольной функцией при переходных процессах нагружения.

В результате решения задачи анализа находим перегрузки G в каждой из опасных точек и сравниваем их с допустимым значением $[G]$. Остальные ограничения назначаем из конструктивных соображений и условий стандарта.

Перемещения амортизатора при колебательном движении ограничены размерами ниши, в которой он установлен, максимальным ходом штока амортизатора и допустимыми перемещениями фланцев компенсаторов, соединяющих агрегат с трубопроводами.

В наших расчетах принято такое ограничение перемещений вдоль продольной оси самолета: $[s_x] = 8 \text{ мм}$, допустимые перемещения вдоль вертикальной и поперечной осей равнялись $[s_y] = [s_z] = 5 \text{ мм}$, допустимые углы поворота вокруг этих осей выбраны равными $[\varphi] = 0,02 \text{ рад}$, $[\psi] = [\theta] = 0,04 \text{ рад}$.

Начальный вектор параметров X_0 состоит из величин коэффициентов жесткости k_x, k_y, k_z , отношения коэффициента демпфирования к коэффициенту жесткости β , относительных величин a_1, a_2, a_3, a_4 , характеризующих структурный состав подвески блока. Предполагается, что в зависимости от распределения масс в объекте, усилия и соответственно параметры амортизаторов в каждом узле могут быть различными. Эти величины есть отношения коэффициента жесткости амортизатора в соответствующем узле к некоторому его фиксированному значению.

Вибрация планера самолета, от которой следует защитить агрегат, задана в виде спектра перегрузок. На интервале частот от 1 Гц до 22 Гц виброперегрузки постоянны и равны 1, на интервале от 22 Гц до 60 Гц они линейно возрастают от 1 до 7 и далее, до наибольшей частоты, равной 2000 Гц, они остаются равными 7.ции

Процесс оптимизации в целом построен как поочередная последовательность решений задач минимизации массы m и перегрузки G . Для начального вектора X_0 первый этап оптимизации осуществлялся без учета перегрузки G и приводит к вектору X_1 . Следующий этап оптимизации проводится с минимизацией перегрузки G , но без ограничения массы m , в результате чего получен вектор X_2 . Процесс оптимизации повторяют дальше, чередуя функции цели m и G на каждом новом этапе. Отметим, что процесс оптимизации на этапах, где функцией цели была масса, ограничивался такой допустимой перегрузкой, которая достигалась как ее минимум на предыдущих этапах, когда функцией цели была перегрузка.

Примененный гибридный метод оптимизации относится к локальным поисковым. Поэтому для поиска глобального минимума использован метод мультистарта. При этом проводится серия спусков из заранее определенного множества начальных точек, равномерно распределенных по области допустимых значений варьируемых параметров. Точки локальных экстремумов принадлежат разным окрестностям области решений. Однако значения экстремумов в этих точках являются близкими. Указанное обстоятельство дает возможность выбора оптимального проекта, используя конструктивные соображения.

В результате проведенной оптимизации с помощью разработанного гибридного поискового метода уменьшены масса элементов подвески и воздействующие на подвешенный агрегат перегрузки. Определены пределы, до которых может быть уменьшена масса и перегрузка. В рассматриваемой конструкции при снятии ограничений на перегрузку суммарную массу можно довести до 3,96 кг.

При исследовании влияния на процесс поиска экстремума различных ограничений (геометрических параметров, усилий в амортизаторах и т.д.) установлено, что активным ограничением является перемещение агрегата s_x . По этому критерию процесс оптимизации

приходит на границу области допустимых решений, и далее процесс поиска происходит вдоль этой границы. По остальным параметрам процесс оптимизации не выходит на границу области допустимых параметров.

5 Выводы и перспективы дальнейших исследований

Гибридный метод оптимизации модифицирован применительно к оптимальному проектированию упруго-демпферных подвесок. Показано, что эффективность процесса минимизации какого-либо критерия, например, массы, увеличивается, если в качестве критерия оптимальности поочередно использовать те параметры, на границы которых выходит процесс поиска минимума. Тот факт, что при различных записях функции цели получаются близкие результаты, позволяет сделать вывод, о том, что в области решений имеется единственный минимум, которому соответствует вычисленный оптимальный вектор. Результаты работы найдут применение при проектировании таких элементов летательных аппаратов, на которые процесс эксплуатации накладывает разнообразные ограничения (перегрузки, допустимые перемещения, геометрические размеры и массы амортизаторов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Динамика конструкций при воздействии кратковременных нагрузок / С. С. Кохманюк, А. С. Дмитриев, Г. А. Шелудько и др. К. : Наук. думка, 1989. 304 с.
2. Elliott J. and Peraire J. Practical three-dimensional aerodynamic design and optimization using unstructured meshes. *AIAA journal*. 1997. 35(9): P. 1479–1485.
3. Баландин, Д. В. Математическое моделирование и оптимизация противоударных систем. *Вестн. Нижнегород. ун-та. Сер.: Механика*. 2001. № 1. С. 52–54.
4. Makeev V. I., Strelnikova E. A., Trofimenko P. E., Bondar A. V. On Choice of Design Parameters for an Aircraft. *Int. Appl. Mech.* 2013. 49, N 5. P. 588 – 596.
5. Дегтярев К. Г., Стрельникова Е. А., Шелудько Г. А. Компьютерное моделирование лопастей ветроустановок с оптимальными параметрами. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. № 19. 2012. С. 81-86.
6. Васильев, Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. М. : Наука, 1980. 520 с.
7. Батищев, Д. Е. Поисковые методы оптимального проектирования. М. : Сов. радио, 1975. 216 с.
8. Филипповский, С. В. Эффективность некоторых методов оптимизации упруго-демпферных подвесок агрегатов. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*. 2007. №. 38. С. 159–168.
9. Стрельникова Е. А. Гибридизация вычислительных процессов: в 2-х ч. Ч. 2. / Е. А. Стрельникова, Г. А. Шелудько. Харьков : Новое слово, 2007. 130 с.
10. Г. А. Шелудько, Е. А. Стрельникова, Б. Я. Кантор Гибридные методы в задачах оптимального проектирования. 1. Поисковые методы. Харьков : Новое слово, 2008. – 188 с.
11. Arezki Y. and Van Vliet D. A full analytical implementation of the PARTAN. Frank-Wolfe algorithm for equilibrium assignment. *Transportation Science*. 1990. Vol. 24, no. 1. P. 58–62.
12. Многокритериальная оптимизация. Математические аспекты / Б. А. Березовский, Ю. М. Барышников, В. И. Борзенко и др. М. : Наука, 1989. 128 с.
13. Mezma M., Melab N. and Talbi E. G. Using the multi-start and island models for parallel multi-objective optimization on the computational grid. In *Second IEEE International Conference on e-Science and Grid Computing*. 2006. P. 28-34.

REFERENCES

1. S. S. Kohmanyuk, A. S. Dmitriev, G. A. Sheludko i dr. *Dinamika konstruksiy pri vozdeystvii kratkovremennyih nagruzok* . K. : Nauk. dumka, 1989, 304 p. [in Russian]
2. Elliott J. and Peraire J. “Practical three-dimensional aerodynamic design and optimization using unstructured meshes”. *AIAA journal*, 35(9). P. 1479–1485, 1997.
3. D. V. Balandin, “Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya protivoudarnyih system”. *Vestn. Nizhegorod. un-ta. Ser.: Mehanika*. N. 1. – S. 52–54. 2001. [in Russian]

4. V. I. Makeev, E. A. Strelnikova, P. E. Trofimenko, A. V. Bondar, "On Choice of Design Parameters for an Aircraft". *Int. Appl. Mech.*, 49, N. 5, P. 588 – 596, 2013.
5. K. G. Degtyarev, E. A. Strelnikova, G. A. Sheludko, "Kompyuternoe modelirovanie lopastey vetroustanovok s optimalnymi parametrami". *Visnik Harkivskogo natsionalnogo unversitetu Imeni V. N. Karazina. Seriya: Matematichne modelyuvannya. Informatsyni tehnologiyi. Avtomatizovanii sistemi upravlinnya*, N 19, P. 81-86, 2012. [in Russian]
6. Vasilev F. P. *Chislennyye metodyi resheniya ekstremalnykh zadach* / F. P. Vasilev. – M. : Nauka, 1980. 520 s. [in Russian]
7. Batischev D. E. *Poiskovyye metodyi optimalnogo proektirovaniya*. M. : Sov. radio, 1975, 216 s. [in Russian]
8. Filipkovskiy S. V., "Effektivnost nekotorykh metodov optimizatsii uprugodempfernykh podvesok agregatov". *Vestnik Nats. tehn. un-ta «HPI»*, № 38. S. 159–168, 2007. [in Russian]
9. Strelnikova E. A., "Gibridizatsiya vychislitelnykh protsessov: v 2-h ch. Ch. 2." / E. A. Strelnikova, G. A. Sheludko. Harkov : Novoe slovo, 2007, 130 s. [in Russian]
10. Sheludko, G. A. *Gibridnyie metodyi v zadachah optimalnogo proektirovaniya*. 1. Poiskovyye metodyi, G. A. Sheludko, E. A. Strelnikova, B. Ya. Kantor. Harkov : Novoe slovo, 2008, 188 s. [in Russian]
11. Arezki Y. and Van Vliet D., "A full analytical implementation of the PARTAN / Frank-Wolfe algorithm for equilibrium assignment". *Transportation Science*, vol. 24, N 1, P. 58–62, 1990.
12. B. A. Berezovskiy, Yu. M. Baryshnikov, V. I. Borzenko i dr., *Mnogokriterialnaya optimizatsiya. Matematicheskie aspektyi*. M. : Nauka, 1989, 128 p. [in Russian]
13. Mezma M., Melab N., and Talbi E. G., "Using the multi-start and island models for parallel multi-objective optimization on the computational grid", *In Second IEEE International Conference on e-Science and Grid Computing*, 2006, P. 28-34.

Павлюченко Виталий Александрович – ведущий конструктор, Государственное предприятие «Антонов», Киев, Украина <https://orcid.org/0000-0001-9304-8465>.

Стрельникова Елена Александровна – д. т. н., проф., вед. науч. сотр., Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, elena15@gmx.com, <http://orcid.org/0000-0003-0707-7214>.

Филиповский Сергей Владимирович – кандидат технических наук, с. н. с., доцент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина, sfilipkovskij@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2861-8032>.

Павлюченко Виталий Александрович – ведущий конструктор, Государственное предприятие «Антонов», Киев, Украина, <https://orcid.org/0000-0001-9304-8465>.

Стрельникова Елена Александровна – д. т. н., проф., вед. науч. сотр., Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, elena15@gmx.com, <http://orcid.org/0000-0003-0707-7214>.

Филиповский Сергей Владимирович – кандидат технических наук, с. н. с., доцент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина, sfilipkovskij@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2861-8032>.

Pavlyuchenko Vitaliy - Lead Designer, State Enterprise "Antonov", Kiev, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-9304-8465>.

Strelnikova Elena - Doctor of Technical Sciences, prof., Ved. scientific al., Institute of Mechanical Engineering. A.N. Podgorny, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine, elena15@gmx.com, <http://orcid.org/0000-0003-0707-7214>.

Filipkovsky Sergey - candidate of technical sciences, p. n S., Associate Professor, Kharkov National Automobile and Highway University, Ukraine, sfilipkovskij@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2861-8032>.