

Коррекция параметров ракеты пакетной схемы с использованием гибридных алгоритмов глобальной оптимизации

© П.М. Шкапов¹, А.В. Сулимов^{1,2}, В.Д. Сулимов¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова в Севастополе,
Севастополь, 299001, Россия

Прямое моделирование сложных систем не обеспечивает требуемое качество разрабатываемых аналитических моделей. Рассмотрены обратные задачи коррекции конечно-элементной модели ракеты пакетной схемы по модальным данным, полученным при измерениях. Критериальные функции в общем случае предполагаются многомерными, непрерывными, многоэкстремальными, не всюду дифференцируемыми. Реализован подход с использованием новых гибридных алгоритмов глобальной недифференцируемой оптимизации. Предложенные гибридные алгоритмы объединяют эффективный стохастический алгоритм QRM-PCA, сканирующий пространство переменных, и детерминированные методы локального поиска. С использованием гибридного алгоритма проведена модельная коррекция жесткостных характеристик узлов связи между центральным блоком и ускорителями. Приведены численные примеры решения обратных задач коррекции конечно-элементной модели ракеты пакетной схемы.

Ключевые слова: ракета пакетной схемы, конечно-элементная модель, коррекция параметров, обратная задача, метод регуляризации, глобальная оптимизация, гибридный алгоритм

Введение. Современные подходы к разработке и исследованию сложных аэрокосмических систем основаны на применении методов математического моделирования и компьютерных технологий [1, 2]. Накопленный опыт показывает, что прямое моделирование реальных систем не обеспечивает требуемое качество соответствующих аналитических моделей. Актуальным направлением является разработка численных методов коррекции моделей систем с использованием модальных данных, полученных экспериментально [3, 4]. Реализация численных процедур коррекции связана с формулировкой и решением соответствующей обратной задачи на собственные значения [5, 6]. Обратные задачи относятся к классу некорректно поставленных, что предполагает применение специальных методов регуляризации [7, 8]. В общем случае вследствие неполноты измеряемых данных и наличия в спектрах кратных собственных значений многомерные критериальные функции обратных задач являются многоэкстремальными и не всюду дифференцируемыми [9]. При вычислении текущих значений минимизируемых критериальных функций в допустимой обла-

сти могут потребоваться значительные вычислительные ресурсы. Этим обусловлена актуальность разработки эффективных методов коррекции моделей систем с использованием алгоритмов глобальной недифференцируемой оптимизации.

Постановка задачи. Рассмотрена обратная задача коррекции аналитической конечно-элементной модели ракеты-носителя (РН) пакетной схемы компоновки, основные характеристики которой близки к характеристикам ракеты тяжелого класса «Ариан-5». Аналитическая модель РН разработана с учетом подвижности жидкости в топливных баках [10, 11]. В результате анализа численного решения обобщенной задачи на собственные значения (прямой задачи), в частности, установлено наличие кратных и почти кратных частот в спектре исследуемой модели [12]. Указанные особенности являются характерными для сложных систем и существенно определяют свойства критериальных функций обратных задач коррекции аналитических моделей. В практических приложениях необходимость учета зашумленности измеряемых данных обычно приводит к существенным затруднениям [13]. Возможные подходы к решению задачи коррекции параметров объекта основаны на минимизации квадратичной функции рассогласования или минимизации максимальной из функций рассогласования составляющих сравниваемых собственных спектров — текущего, определяемого переменными модели, и заданного. Необходимо найти такой вектор переменных модели, который приводит к наименьшим отличиям между сравниваемыми спектрами, т. е. следует провести настройку исследуемой модели на заданный спектр. Для обобщения постановок обратных задач коррекции параметров РН рассматривается задача глобальной недифференцируемой оптимизации.

Методы решения. К настоящему времени достаточно хорошо разработаны и находят широкое применение методы решения задач глобальной минимизации многоэкстремальных функций. Эффективность детерминированных алгоритмов существенно ограничена их зависимостью от размерности задачи [14]. Более мощные стохастические алгоритмы глобальной оптимизации также имеют ряд недостатков. Так, чувствительность к выбору параметров эволюционных алгоритмов, устанавливаемых пользователем или определяемых содержанием задачи, во многом определяет скорость сходимости итерационного процесса [15]. К числу наиболее мощных современных стохастических алгоритмов глобальной оптимизации относится кратный алгоритм столкновения частиц (с квазиотражениями) QRM-PCA [16]. Работа современного алгоритма QRM-PCA основана на использовании аналогии с физическими процессами абсорбции и рассеяния частиц при ядерных реакциях. На начальном шаге выбирается пробное решение, которое затем модифицируется посредством стохастического

возмущения, что позволяет найти новое решение. С помощью функции $Fitness()$ дается сравнительная оценка нового и предыдущего решений, на основании которой новое решение может быть принято или отвергнуто. Если новое решение отвергнуто, то происходит переход к функции $Scattering()$, реализующей схему Метрополиса. Новое решение принимается, если оно лучше предыдущего (абсорбция); если найденное решение хуже предыдущего, то происходит переход в отдаленную область пространства поиска (рассеяние), что позволяет преодолевать локальные минимумы. Одним из путей повышения эффективности стохастических алгоритмов оптимизации является совершенствование процедуры локального поиска. Предложены гибридные алгоритмы, объединяющие эффективный стохастический алгоритм QRM-PCA, сканирующий пространство переменных, и детерминированные методы локального поиска. Процедура локального поиска реализуется итеративно, пока не будет достигнуто заданное количество вычислений критериальной функции. Подход на основе гибридизации является перспективным для разработки эффективных алгоритмов глобальной оптимизации [17, 18]. В состав первого гибридного алгоритма QRM-PCANJ дополнительно входят стандартные процедуры $Perturbation()$ и $Small_Perturbation()$ сканирования пространства переменных, а также процедуры локального поиска методом Хука — Дживса [19].

Второй гибридный алгоритм QRM-PCALMSI интегрирует стохастический алгоритм QRM-PCA и детерминированный метод линеаризации для сглаживающих аппроксимаций критериальных функций LMSI [20]. Гибридный алгоритм CBM-PCALMSI объединяет стохастический кратный алгоритм столкновения частиц CBM-PCA и детерминированный алгоритм LMSI [16, 21]. В этой новой версии гибридного алгоритма процедура локального поиска представляет собой стандартный детерминированный метод линеаризации. Дополнительно вводятся двухпараметрические сглаживающие аппроксимации с итерационным уточнением, что позволяет расширить подход на класс задач недифференцируемой оптимизации. Разработано программное обеспечение, реализующее гибридные алгоритмы QRM-PCANJ и QRM-PCALMSI.

Приведены численные примеры коррекции параметров аналитической модели РН по измеряемым модальным данным. Предполагается, что экспериментальное определение собственных форм не обеспечивает требуемой точности, поэтому регистрируемые модальные данные представлены только ограниченным собственным спектром, соответствующим низшим собственным частотам объекта. Входная информация моделируется решением прямой задачи для объекта при некоторых фиксированных значениях коэффициентов жесткости узлов межблочных связей. Предполагается также, что

относительная погрешность входных данных не превышает 0,01 %, шумы отсутствуют. Численное решение обратной задачи коррекции конечно-элементной модели получено с использованием гибридного алгоритма QRM-PCANJ. В результате проведено уточнение значений жесткостных характеристик верхнего и нижнего поясов межблочных связей РН. Точность полученного приближенного решения согласована с точностью задания входной информации.

Аналитические модели и численные методы. Рассматривается обратная задача коррекции конечно-элементной модели РН пакетной схемы. В состав РН входят центральный блок с кислородно-водородным двигателем и двумя одинаковыми тердотопливными ускорителями (первая ступень), а также вторая ступень с двигателем, работающим на компонентах топлива длительного хранения. Вторая ступень несет отсек системы управления, переходник и закрытые обтекателем модули полезного груза, установленные на адаптерах. Стартовая масса РН составляет 738 000 кг, высота с головным обтекателем — 51,6 м. Длина центрального блока от среза сопла двигателя до плоскости шпангоута, к которому пристыкована вторая ступень, равна 30,5 м, диаметр блока — 5,4 м. Сухая масса блока составляет 12 200 кг, масса компонентов топлива — 150 617 кг. Каждый ускоритель имеет длину 31,7 м и диаметр 3,05 м. Масса ускорителя равна 277 500 кг, в том числе масса компонентов топлива — 237 800 кг. На второй ступени ракеты установлены два одинаковых модуля полезного груза, масса каждого модуля 6000 кг. Связи между центральным блоком и ускорителями моделируются упругими элементами.

Аналитическая модель РН разработана с учетом подвижности жидкости в топливных баках [10]. В целях исследования собственных колебаний модели РН сформулирована обобщенная задача на собственные значения (прямая задача). Численное решение прямой задачи получено с использованием варианта метода итераций подпространства [12]. Модальный анализ показал наличие кратных и почти кратных собственных частот в спектрах объекта. Это является характерной особенностью подобных сложных конструкций и существенно определяет свойства критериальных функций соответствующих обратных задач на собственные значения.

Обратная задача коррекции конечно-элементной модели РН формулируется следующим образом. Требуется изменить свободные переменные модели так, чтобы провести настройку ее текущего собственного спектра на заданный спектр, полученный при измерениях. Текущий спектр определяется значениями свободных параметров конечно-элементной модели. Необходимо найти вектор переменных, минимизирующий отличия между сравниваемыми спектрами. Свободными переменными модели являются жесткостные характеристики

узлов связи между центральным блоком и ускорителями. Для обобщения постановок обратных задач коррекции формулируется задача минимизации критериальной функции как функции рассогласования между составляющими сравниваемых спектров. Входные данные моделируются приближенным решением прямой задачи, полученным при следующих значениях жесткостных характеристик узлов связи между центральным блоком и ускорителями: $c_1 = 0,8 \cdot 10^8$ Н/м; $c_2 = 0,45 \cdot 10^8$ Н/м; $c_3 = 0,55 \cdot 10^8$ Н/м; $c_4 = 0,0$; $c_5 = 0,25 \cdot 10^8$ Н/м; $c_6 = 0,3 \cdot 10^8$ Н/м. Первые три коэффициента жесткости относятся к нижнему поясу связей, остальные — к их верхнему поясу. Свободные переменные модели представлены в нормированной форме: $x_i = c_i / 10^7$; $i = \overline{1, 3}$; $x_j = c_{j+1} / 10^7$; $j = \overline{4, 5}$. Входные модальные данные представлены ограниченным спектром, соответствующим низшим собственным значениям (множеством низших собственных частот). Далее учитываются собственные частоты из ограниченного интервала до 85 Гц. Также предполагается, что относительная погрешность входных данных не превышает 0,01 %, шумы отсутствуют.

Критериальная функция обратной задачи определяется в виде

$$F(x) = \sum_{j=1}^{n_p} \gamma_j f_j^2(x) + \alpha \|x\|^2,$$

где $\gamma_j, f_j(x)$ — весовой коэффициент и частный критерий, соответствующие j -му собственному значению; $f_j(x) = (\lambda_j^* - \lambda_j(x))$; λ_j^* — j -я составляющая заданного спектра; $\lambda_j(x)$ — соответствующая составляющая текущего спектра, определяемого текущим вектором свободных переменных, $x \in \mathbb{R}^5$, $j = \overline{1, n_p}$; n_p — число учитываемых собственных значений; α — параметр регуляризации; $\alpha \|x\|^2$ — стабилизирующий функционал.

Численные решения обратной задачи получены с использованием гибридного алгоритма глобальной недифференцируемой оптимизации QRM-PCAHJ. После определения допустимой области, перспективной в качестве глобального минимума, реализуется локальный поиск прямым методом Хука — Дживса. На рис. 1 представлено изменение переменных модели при возрастании числа итераций в заключительной фазе локального поиска. Приближенное решение обратной задачи получено после завершения 18 итераций. Изменение значений критериальной функции при возрастании числа итераций приведено на рис. 2.

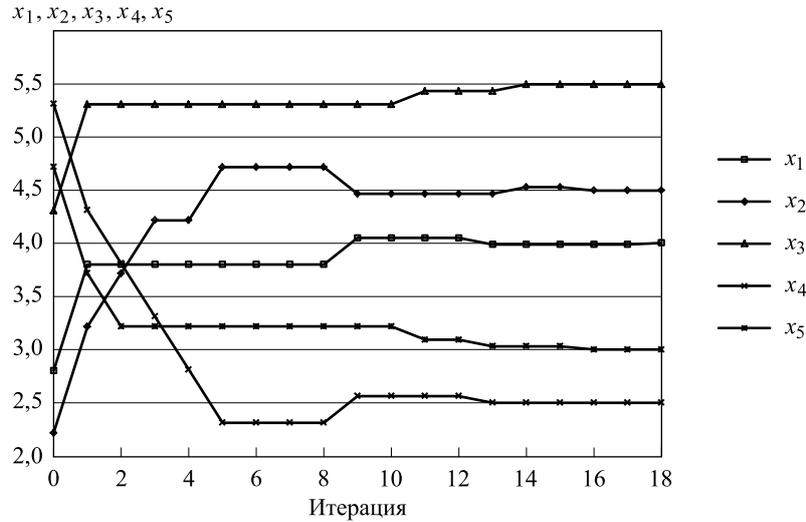


Рис. 1. Изменение значений переменных модели при возрастании числа итераций

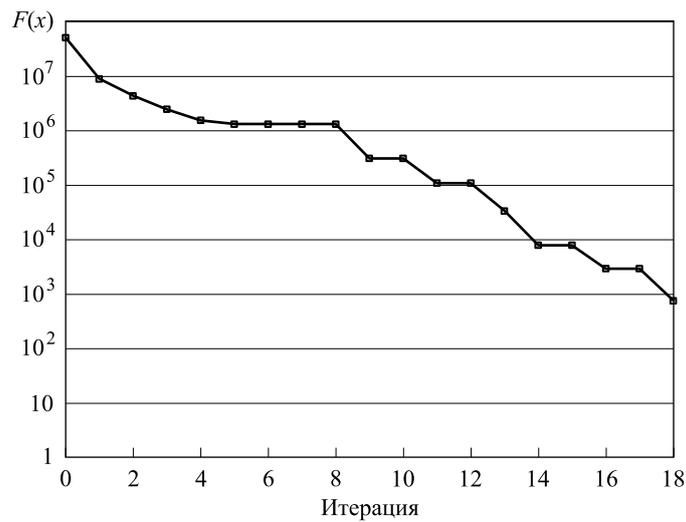


Рис. 2. Изменение значений критериальной функции при возрастании числа итераций

Определены следующие приближенные значения свободных переменных: $x_1^{18} \approx 4,005$; $x_2^{18} \approx 4,497$; $x_3^{18} \approx 5,496$; $x_4^{18} \approx 2,5004$; $x_5^{18} \approx 3,0001$. Значения жесткостных характеристик узлов межблочных связей восстановлены по приближенным значениям переменных модели: $\tilde{c}_i = x_i^{18} \cdot 10^7$ Н/м; $i = \overline{1, 3}$; $\tilde{c}_{j+1} = x_j^{18} \cdot 10^7$ Н/м; $j = \overline{4, 5}$. Максимальная относительная погрешность решения не превышает 0,1 %.

Можно отметить достаточную согласованность точности полученного решения и точности заданной приближенно входной информации.

Заключение. Представлен численный метод коррекции параметров конечно-элементной модели ракеты пакетной схемы по косвенным модальным данным. При решении соответствующих обратных задач на собственные значения используется оптимизационный подход. Предложены два оригинальных гибридных алгоритма глобальной недифференцируемой оптимизации, интегрирующих стохастический алгоритм QRM-РСА сканирования пространства переменных, и детерминированные методы локального поиска. Модельная коррекция жесткостных характеристик узлов связи между центральным блоком и ускорителями проведена с использованием гибридного алгоритма QRM-РСАНЛ. Точность полученного приближенного решения согласована с точностью задания входной информации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Pulecchi T., Casella F., Lovera M. Object-oriented modelling for spacecraft dynamics: Tools and applications. *Simulation Modelling and Theory*, 2010, vol. 18, no. 1, pp. 63–86.
- [2] Martins J.R., Lambe A.B. Multidisciplinary design optimization: A survey of architectures. *AIAA Journal*, 2013, vol. 51, no. 9, pp. 2049–2075.
- [3] Lee E.-T., Eun H.-C. Update of corrected stiffness and mass matrices based on measured dynamic modal data. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, vol. 33, no. 5, pp. 2274–2281.
- [4] Бернс В.А., Левин В.Е., Красноруцкий Д.А., Маринин Д.А., Жуков Е.П., Маленкова В.В., Лакиза П.А. Разработка расчетно-экспериментального метода модального анализа крупногабаритных трансформируемых космических конструкций. *Космические аппараты и технологии*, 2018, т. 2, № 3, с. 125–133.
- [5] Cai J., Chen J. Iterative solutions of generalized inverse eigenvalue problem for partially bisymmetric matrices. *Linear and Multilinear Algebra*, 2017, vol. 65, no. 8, pp. 1643–1654.
- [6] Arora V. Comparative study of finite element method model updating methods. *Journal of Vibration and Control*, 2011, vol. 17, no. 13, pp. 2023–2039.
- [7] Benning M., Burger M. Modern regularization methods for inverse problems. *Acta Numerica*, 2018, vol. 27, pp. 1–111.
- [8] Bartilson D.T., Jang J., Smyth A.W. Finite element model updating using objective-consistent sensitivity-based parameter clustering and Bayesian regularization. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 114, pp. 328–345.
- [9] Alkayem N.F., Gao M., Zhang Y., Bayat M., Su Z. Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms: a survey. *Neural Computing and Applications*, 2018, vol. 30, pp. 389–411.
- [10] Колесников К.С. *Динамика ракет*. 2-е изд. Москва, Машиностроение, 2003, 520 с.
- [11] Дьяченко М.И., Павлов А.М., Темнов А.Н. Продольные упругие колебания корпуса многоступенчатой жидкостной ракеты пакетной схемы. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 5, с. 14–24.
- [12] Tang F.T.P., Polizzi E. FEAST as a subspace iteration eigensolver accelerated by approximate spectral projection. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 2014, vol. 35, no. 2, pp. 354–390.

- [13] Bleyer I.R., Ramlau R. A double regularization approach for inverse problems with noisy data and inexact operator. *Inverse Problems*, 2013, vol. 29, 025004 (16 p.).
- [14] Floudas C.A., Gounaris C.E. A review of recent advances in global optimization. *Journal of Global Optimization*, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 3–38.
- [15] Карпенко А.П. *Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 446 с.
- [16] Torres R.H., da Luz E.F.P., de Campos Velho H.F. Multi-particle collision algorithm with reflected points. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics*, 2015, vol. 3, no. 1, 010433 (6 p.).
- [17] Torres R.H., de Campos Velho H.F. Rotation-based multi-particle collision algorithm with Hooke — Jeeves. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, 2017, vol. 5, no. 1, 010433 (6 p.).
- [18] Liu J., Zhang S., Wu C., Liang J., Wang X., Teo K.L. A hybrid approach to constrained global optimization. *Applied Soft Computing*, 2016, vol. 47, pp. 281–294.
- [19] Rios-Coelho A.C., Sacco W.f., Henderson N. A Metropolis algorithm combined with Hooke — Jeeves local search method applied to global optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 2010, vol. 217, no. 2, pp. 843–845.
- [20] Сулимов В.Д., Шкапов П.М., Сулимов А.В. Оптимизация сингулярных чисел матриц, зависящих от параметров, с использованием гибридных алгоритмов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2016, № 5 (68), с. 46–66.
- [21] Sulimov V.D., Shkapov P.M., Sulimov A.V. Jacobi stability and updating parameters of dynamical systems using hybrid algorithms. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, no. 468, 012040 (11 p.).

Статья поступила в редакцию 23.03.2020

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLIV Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, «Королёвские чтения — 2020», Москва, 29–31 января 2020 г.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шкапов П.М., Сулимов А.В., Сулимов В.Д. Коррекция параметров ракеты пакетной схемы с использованием гибридных алгоритмов глобальной оптимизации. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 9.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-9-2012>

Шкапов Павел Михайлович — д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Теоретическая механика» имени профессора Н.Е. Жуковского МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 печатных работ по динамике механических и гидромеханических систем, математическому моделированию и расчету кавитационных и двухфазных течений в трубопроводных системах, вопросам оптимизации и диагностирования динамических систем. e-mail: spm@bmstu.ru

Сулимов Андрей Валерьевич — старший преподаватель кафедры физики и геофизики Филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Севастополе, аспирант кафедры теоретической механики МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Сулимов Валерий Дмитриевич — старший преподаватель кафедры «Теоретическая механика» имени профессора Н.Е. Жуковского. Автор более 50 научных работ в области математического моделирования и оптимизации динамических систем. e-mail: fn3svd24@mail.ru

Clustered rocket parameter updating by hybrid global optimization algorithms

P.M. Shkapov¹, A.V. Sulimov^{1,2}, V.D. Sulimov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Sevastopol branch,
Sevastopol, 299001, Russia

Direct simulation of complex systems does not provide the necessary quality of the required analytical models. The paper considers the inverse problems of the change of the clustered rocket finite element model according to the modal data obtained during the measurements. In general, criterial functions are assumed to be multidimensional, continuous, multiextremal, and not everywhere differentiable. We implemented an approach using new hybrid global nondifferentiable optimization algorithms. The proposed hybrid algorithms combine the efficient stochastic QRM-PCA algorithm, which scans the space of numbers, and deterministic local search methods. Using a hybrid algorithm, we carried out a model change of the stiffness characteristics of communication nodes between the central unit and accelerators. The study gives numerical solutions of the inverse problems of the change of the clustered rocket finite element model.

Keywords: clustered rocket, finite element model, parameter change, inverse problem, regularization method, global optimization, hybrid algorithm

REFERENCES

- [1] Pulecchi T., Casella F., Lovera M. Object-oriented modelling for spacecraft dynamics: Tools and applications. *Simulation Modelling and Theory*, 2010, vol. 18, no. 1, pp. 63–86.
- [2] Martins J.R., Lambe A.B. Multidisciplinary design optimization: A survey of architectures. *AIAA Journal*, 2013, vol. 51, no. 9, pp. 2049–2075.
- [3] Lee E.-T., Eun H.-C. Update of corrected stiffness and mass matrices based on measured dynamic modal data. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, vol. 33, no. 5, pp. 2274–2281.
- [4] Berns V.A., Levin V.E., Krasnorutskiy D.A., Marinin D.A., Zhukov E.P., Malenkova V.V., Lakiza P.A. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii — Spacecrafts & Technologies*, 2018, vol. 2, no. 3, pp. 125–133.
- [5] Cai J., Chen J. Iterative solutions of generalized inverse eigenvalue problem for partially bisymmetric matrices. *Linear and Multilinear Algebra*, 2017, vol. 65, no. 8, pp. 1643–1654.
- [6] Arora V. Comparative study of finite element method model updating methods. *Journal of Vibration and Control*, 2011, vol. 17, no. 13, pp. 2023–2039.
- [7] Benning M., Burger M. Modern regularization methods for inverse problems. *Acta Numerica*, 2018, vol. 27, pp. 1–111.
- [8] Bartilson D.T., Jang J., Smyth A.W. Finite element model updating using objective-consistent sensitivity-based parameter clustering and Bayesian regularization. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 114, pp. 328–345.
- [9] Alkayem N.F., Gao M., Zhang Y., Bayat M., Su Z. Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms: a survey. *Neural Computing and Applications*, 2018, vol. 30, pp. 389–411.
- [10] Kolesnikov K.S. *Dinamika raket* [Dynamics of rockets]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 520 p. (in Russ.).

- [11] Dyachenko M.I., Pavlov A.M., Temnov A.N. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2015, no. 5, pp. 14–24.
- [12] Tang F.T.P., Polizzi E. FEAST as a subspace iteration eigensolver accelerated by approximate spectral projection. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 2014, vol. 35, no. 2, pp. 354–390.
- [13] Bleyer I.R., Ramlau R. A double regularization approach for inverse problems with noisy data and inexact operator. *Inverse Problems*, 2013, vol. 29 (025004), p. 16.
- [14] Floudas C.A., Gounaris C.E. A review of recent advances in global optimization. *Journal of Global Optimization*, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 3–38.
- [15] Karpenko A.P. *Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdo-khnovlennyye prirodoy* [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature]. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 446 p.
- [16] Torres R.H., da Luz E.F.P., de Campos Velho H.F. Multi-particle collision algorithm with reflected points. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics*, 2015, vol. 3, no. 1 (010433), 6 p.
- [17] Torres R.H., de Campos Velho H.F. Rotation-based multi-particle collision algorithm with Hooke–Jeeves. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, 2017, vol. 5, no. 1 (010433), 6 p.
- [18] Liu J., Zhang S., Wu C., Liang J., Wang X., Teo K.L. A hybrid approach to constrained global optimization. *Applied Soft Computing*, 2016, vol. 47, pp. 281–294.
- [19] Rios-Coelho A.C., Sacco W.f., Henderson N. A Metropolis algorithm combined with Hooke–Jeeves local search method applied to global optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 2010, vol. 217, no. 2, pp. 843–845.
- [20] Sulimov V.D., Shkapov P.M., Sulimov A.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennyye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2016, no. 5 (68), pp. 46–66.
- [21] Sulimov V.D., Shkapov P.M., Sulimov A.V. Jacobi stability and updating parameters of dynamical systems using hybrid algorithms. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018. no. 468 (012040), 11 p.

Shkapov P.M., Dr. Sc. (Eng.), Department of Theoretical Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 scientific papers on dynamics of mechanical and hydromechanical systems, optimization and diagnostics of dynamic systems. e-mail: spm@bmstu.ru

Sulimov A.V., Senior Teacher, Department of Physics and Geophysics of Lomonosov Moscow State University, Sevastopol branch, post-graduate student of the Department of Theoretical Mechanics of Bauman Moscow State Technical University.

Sulimov V.D., Senior Teacher, Department of Theoretical Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 50 scientific papers on mathematical simulation and optimization of dynamic systems. e-mail: fn3svd24@mail.ru