

Семейство гибридных алгоритмов оптимизации и диагностирования гидромеханических систем

© В.Д. Сулимов, П.М. Шкапов

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

Рассмотрены задачи параметрической оптимизации гидромеханических систем с непрерывными не всюду дифференцируемыми многоэкстремальными критериями в скалярной и векторной постановке. При определении глобальных решений для частных критериев были использованы новые гибридные алгоритмы, объединяющие стохастические алгоритмы сканирования пространства переменных и детерминированные методы локального поиска. Алгоритмы векторной оптимизации генерируют множество недоминируемых решений, аппроксимирующих фронт Парето. Предложенные гибридные алгоритмы ориентированы на применение в системах оптимального проектирования и вычислительной диагностики исследуемых объектов.

Ключевые слова: *глобальная оптимизация, критериальная функция, условие Липшица, сглаживающая аппроксимация, алгоритм Метрополиса, многокритериальная оптимизация, фронт Парето, гибридный алгоритм.*

Введение. В состав современных изделий области высоких технологий, таких как летательные аппараты, реакторные установки АЭС, подводные аппараты и другие устройства, входят гидромеханические системы различного назначения. Реальные системы являются сложными объектами, поэтому при исследовании их динамики используют методы математического моделирования [1–5]. Создание, отработка и последующая эксплуатация гидромеханических систем связаны с поиском решения двух типов экстремальных задач — оптимизации и диагностики. Задачи первого типа возникают при выборе оптимальных параметров систем, а также при реализации оптимального управления системой. Обеспечение безопасной и эффективной эксплуатации требует решения задач второго типа: идентификации и коррекции математических моделей, включая рациональную редукцию моделей, и диагностирования систем по результатам косвенных измерений. Входными данными для диагностирования являются результаты экспериментального определения некоторых следственных характеристик системы или процесса, например регистрируемые параметры колебательных и ударных процессов. Искомыми являются причинные характеристики, к которым относятся коэффициенты уравнений расчетной динамической модели, граничные условия, геометрические и другие характеристики. В задачах этого типа необходимо учитывать недифференцируемость и многоэкстремальность критериальных функций ввиду наличия кратных частот

и неполноты информации, полученной при измерениях. Значительная трудоемкость решения обратных спектральных задач обусловлена их некорректностью, следствием чего является неустойчивость численного решения относительно погрешностей входных данных.

Оптимизационное исследование сложных объектов основано на разработке и последующем уточнении их математических моделей, в том числе при наличии неопределенностей [6, 7]. Усложнение модели объекта, в свою очередь, вызывает необходимость создания новых, более эффективных методов оптимизации. Отметим, что в аспекте динамики спектры колебаний содержат существенную информацию об исследуемом объекте. Это позволяет решать задачи определения оптимальных собственных характеристик системы или процесса, а также использования собственных характеристик для коррекции моделей и диагностирования систем [8–10]. В случаях, когда используемая модель имеет большое число степеней свободы (является дорогостоящей в вычислительном отношении), требуется ее редукция. При этом редуцированная модель должна корректно отображать основные динамические характеристики моделируемого объекта [11–13]. Так, при моделировании активной зоны реакторных установок вводят редуцированные модели топливных сборок, что существенно уменьшает размерность модели активной зоны в целом (без заметной потери точности) и значительно сокращает компьютерное время [14, 15]. Редукцию динамических моделей проводят также при оптимальном синтезе систем управления, моделировании потоков жидкости и в других задачах [16, 17]. В современной литературе значительное внимание уделяется проблеме моделирования взаимодействия конструкций с жидкостью и соответствующему модальному анализу [18–21]. Разработаны методики восстановления физических характеристик систем, а также поиска аномалий в системах по известным собственным характеристикам (модальным данным) с использованием методов модальной чувствительности и алгоритмов глобальной оптимизации [22–24]. Отметим, что в спектрах исследуемых систем могут присутствовать кратные собственные значения [25]. Актуальным направлением являются теоретическое и экспериментальное исследования двухфазных газожидкостных потоков, в том числе в контурах реакторных установок [26–29]. Реализация процедур коррекции модели и вычислительной диагностики системы с использованием модальных данных связана с решением обобщенной задачи на собственные значения [30, 31]. В общем случае в экстремальных задачах для гидромеханических систем используются как скалярные, так и векторные критерии [32]. При этом частными критериями в многокритериальных задачах вычислительной диагностики могут быть, вообще говоря, многоэкстремальные функции [33]. Корректная формулировка рассматриваемых задач предполагает применение методов ре-

гуляризации [34–36]. Используемый далее подход основан на разработке и применении математических моделей систем, математических методов расчета основных динамических характеристик систем, методов теории обратных задач, глобальной оптимизации, векторной оптимизации.

Постановка задач. Задачи оптимизации и диагностики гидромеханических систем рассмотрены в постановке, принятой в работе [37]. Далее сформируем задачу глобальной оптимизации в следующем виде:

$$f(x^*) = \min_{x \in X \subset \mathbb{R}^n} f(x), \quad (1)$$

где

$$X = \{x \in D : g_i(x) \leq 0, i \in I\}; \quad (2)$$

$$D = \{x \in \mathbb{R}^n : a_j \leq x_j \leq b_j, j \in J\}. \quad (3)$$

Здесь x^* — глобальное решение; n — размерность задачи; $f(x)$ — целевая функция; x — вектор переменных управления; $g_i(x)$ — функции ограничений задачи, $i \in I$; $I = \{1, \dots, m\}$ — конечное множество индексов; X — допустимая область; D — область поиска; $J = \{1, \dots, n\}$; \mathbb{R}^n — n -мерное вещественное линейное пространство. Предполагается, что функции $f(x)$, $g_i(x)$, $i \in I$, (1)–(3) непрерывные липшицевы. Кроме того, действительная функция $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ является многоэкстремальной не всюду дифференцируемой и для нее задана вычислительная процедура, позволяющая определять значения функции в точках допустимой области. Необходимо также учесть возможную высокую трудоемкость вычисления критериальных функций, что может потребовать значительных вычислительных ресурсов.

Задача коррекции модели и диагностирования системы может быть сформулирована в векторной постановке при наличии частных критериев. Пусть заданы функции $f_i(x)$, $i = 1, 2, \dots, m$, $x \in \mathbb{R}^n$, образующие векторный критерий $f(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))$ некоторой многокритериальной задачи оптимизации. Требуется найти

$$\min f(x) \quad (4)$$

при ограничениях

$$x \in X = \{x \in \mathbb{R}^n \mid g_j(x) \leq 0, j \in J\}, \quad (5)$$

где $J = \{j \mid j = 1, \dots, k\}$. Задача векторной оптимизации (4), (5) рассмотрена в предположении, что частные критерии и функции ограничений являются непрерывными не всюду дифференцируемыми функциями. Будем полагать, что в общем случае критериальные функции $f_i(x)$, $i = 1, 2, \dots, m$, векторной задачи оптимизации являются многоэкстремальными.

Методы локальной минимизации. Обзор современных методов локальной недифференцируемой оптимизации и соответствующего программного обеспечения приведен в работе [38]. Вариант bundle-метода с ограниченной памятью для негладкой оптимизации без использования производных описан в [39]. Версия субградиентного метода представлена в [40]. Значительное число работ посвящено методам решения задач недифференцируемой оптимизации с использованием сглаживающих аппроксимаций [41–43]. В работе [44] представлен двухпараметрический метод построения сглаживающих аппроксимаций, предназначенный для решения задач глобальной оптимизации с не всюду дифференцируемыми критериальными функциями.

Методы глобальной оптимизации. Детерминированные методы решения задач глобальной оптимизации многоэкстремальных функций к настоящему времени достаточно хорошо разработаны и находят широкое применение [45]. Отметим, что эффективность детерминированных алгоритмов существенно ограничена их зависимостью от размерности задачи. В случае большого числа переменных применяют алгоритмы стохастической глобальной оптимизации. К ним относятся алгоритмы моделируемого отжига, генетические, управляемого случайного поиска и др. [46, 47]. Вместе с тем чувствительность к выбору параметров алгоритмов этого типа, устанавливаемых пользователем или определяемых содержанием задачи, во многом определяет скорость сходимости итерационного процесса. В целом применение стохастических алгоритмов глобальной оптимизации требует значительных вычислительных ресурсов. Одним из путей повышения эффективности таких алгоритмов является совершенствование процедуры локального поиска. Некоторые подходы к построению гибридных алгоритмов глобальной оптимизации представлены в работах [47, 48]. Гибридный алгоритм обычно объединяет некоторый стохастический алгоритм, сканирующий пространство поиска, и детерминированный алгоритм локального поиска. Так, на основе стохастического алгоритма РСА (алгоритма Метрополиса) [49] в работе [50] представлен гибридный алгоритм NMRSA, объединяющий стохастический алгоритм и детерминированный симплекс-метод Нелдера — Мида. Общий поиск в допустимой области проводится стохастическим алгоритмом, а при локальном поиске в перспективной на глобальный экстремум об-

ласти используется симплекс-метод. При этом не возникает необходимости вычисления производных критериальных функций. Другой подход к решению задач глобальной недифференцируемой оптимизации описан в работе [51].

Предложен новый гибридный алгоритм PCASFC, построенный на основе алгоритма Метрополиса в сочетании с детерминированным методом кривой, заполняющей пространство [51], при локальном поиске, а также реализован гибридный алгоритм в виде программного комплекса [52]. Другой гибридный алгоритм PCALM, построенный на основе алгоритма Метрополиса в сочетании с детерминированным методом линеаризации при локальном поиске, также реализован в виде программного комплекса [53]. Градиентная информация, используемая в гибридном алгоритме, позволяет получить локально оптимальное, а следовательно, и глобальное решение задачи (если оно существует) при меньших вычислительных затратах по сравнению со стохастическим алгоритмом PCA.

Методы многокритериальной оптимизации. Решение многих современных практических задач, связанных с идентификацией и диагностированием сложных систем, обеспечением безопасности, оптимальным проектированием, управлением, предполагает применение методов многокритериальной оптимизации. При наличии нескольких критериев целью оптимизации является поиск множества недоминируемых решений, образующих оптимальный фронт Парето. В настоящее время значительное внимание уделяется разработке и реализации гибридных алгоритмов. В работе [54] рассмотрен подход на основе одного из эффективных методов численного решения многокритериальных задач — векторного варианта метода линеаризации. Существенно, что отдельные критерии могут представлять собой многоэкстремальные не всюду дифференцируемые функции.

Версии гибридных алгоритмов многокритериальной оптимизации реализованы в виде прикладных программ [54–56]. Программная реализация каждого алгоритма включает в себя: модули ввода исходной информации; модуль, реализующий основной цикл алгоритма, в том числе фазу случайных возмущений для перехода в новую область поглощения частицы, фазу исследования области поглощения, фазу возмущений в области рассеяния, фазу исследования решения в области рассеяния; модуль локального поиска методом редукции размерности; модуль вычисления текущего значения частного минимизируемого критерия; модуль формирования фронта Парето; модуль вывода результатов решения. Для определения параметров возмущения на соответствующих шагах гибридных алгоритмов используются стандартные встроенные генераторы случайных чисел. С целью получения оценки вычислительных затрат в программном обеспечении во всех случаях предусмотрены счетчики числа обращений к подпрограммам

вычисления текущих значений критериальной функции. Проведено тестирование разработанного программного обеспечения и получены оценки вычислительной эффективности гибридных алгоритмов многокритериальной оптимизации.

Гибридные методы с использованием алгоритма М-РСА. В последнее десятилетие наблюдается значительный рост сложности практических задач глобальной оптимизации, включая приложения к динамике систем. Как следствие, время решения экстремальных задач (вычислительная стоимость) также существенно возросло [57]. Одним из путей преодоления возникших затруднений является разработка параллельных методов решения как прямых, так и оптимизационных задач, и их эффективная реализация в среде параллельных вычислений. В работе [58] представлен кратный алгоритм столкновения частиц М-РСА, непосредственно ориентированный на среду параллельных вычислений. На его основе предложен новый гибридный алгоритм М-PCALMS, который объединяет стохастический алгоритм М-РСА, используемый при сканировании области поиска, и детерминированный метод линеаризации для локального поиска, а также разработано соответствующее программное обеспечение [59]. Кроме того, предложен гибридный алгоритм М-PCASFC, который объединяет стохастический алгоритм М-РСА и детерминированный метод кривой, заполняющей пространство, при локальном поиске; разработана также его программная реализация [60]. Отметим, что построенная численными методами кривая аппроксимирует теоретическую кривую Пеано — Гильберта с точностью, определяемой заданной плотностью развертки. Метод редукции многомерных задач обладает рядом важных свойств, таких как непрерывность и сохранение равномерной ограниченности разностей функций при ограниченной вариации аргумента. К недостаткам следует отнести потерю части информации о близости точек в исходном многомерном пространстве. Предложенный подход не требует вычисления производных критериальных функций по переменным модели, что позволяет расширить применение гибридного алгоритма на класс задач глобальной недифференцируемой оптимизации.

Заключение. Представлены основные методы и новые алгоритмы решения задач скалярной и векторной оптимизации с многоэкстремальными негладкими критериями для механических и гидромеханических систем. При определении глобальных оптимумов частных критериев были использованы гибридные методы, объединяющие алгоритм Метрополиса и детерминированные методы локального поиска. Предложенный параллельный алгоритм М-PCASFC может иметь преимущества при решении задач минимизации критериальных функций, в которых использование градиентной информации неэффективно или требует значительных вычислительных затрат.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (грант Президента РФ по поддержке научных исследований ведущих научных школ РФ, код НШ-4748.2012.8).

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] Viana F.A., Steffen J.V., Butkewitsch S., de Freitas L.M. Optimization of aircraft structural components by using nature-inspired algorithms and multi-fidelity approximations. *Journal of Global Optimization*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 427–449.
- [3] Avramova M.N., Ivanov K.N. Verification, validation and uncertainty quantification in multi-physics modeling for nuclear reactor design and safety analysis. *Progress in Nuclear Energy*, 2008, vol. 52, no. 4, pp. 861–867.
- [4] Valeriano-Medina Y., Martínez A., Hernández L., Sahli H., Rodríguez Y., Cañizares J.R. Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2013, vol. 19, no. 2, pp. 175–200.
- [5] Faßbender H., Soppa A. Machine tool simulation based on reduced order FE models. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2011, vol. 82, no. 2, pp. 404–413.
- [6] Antoulas A.C., Sorensen D.C. Approximation of large scale dynamic systems: an overview. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2001, vol. 11, no. 5, pp. 1093–1121.
- [7] Lopez I., Sarigul-Klijn N. A review of uncertainty in flight vehicle structural damage monitoring, diagnosis and control: Challenges and opportunities. *Progress in Aerospace Sciences*, 2010, vol. 46, no. 7, pp. 247–273.
- [8] Kinelev V.G., Shkapov P.M., Sulimov V.D. Application of global optimization to VVER-1000 reactor diagnostics. *Progress in Nuclear Energy*, 2003, vol. 43, no. 1–4, pp. 51–56.
- [9] De Oliveira M.V., de Almeida J.C.S. Applications of artificial intelligence techniques in modeling and control of a nuclear power plant pressurizer system. *Progress in Nuclear Energy*, 2013, vol. 63, pp. 71–85.
- [10] Murray-Smith D.J. The application of parameter sensitivity analysis methods to inverse simulation models. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 67–90.
- [11] Gugercin S., Antoulas A.C. Model reduction of large-scale systems by least square. *Linear Algebra and its Applications*, 2006, vol. 415, no. 2–3, pp. 290–321.
- [12] Koutsovasilis P., Beitelschmidt M. Model order reduction of finite element models: improved component mode synthesis. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2010, vol. 16, no. 1, pp. 57–73.
- [13] Jirásek A., Cummings R.M. Reduced order modeling of X-31 wind tunnel model aerodynamic loads. *Aerospace Science and Technology*, 2012, vol. 20, no. 1, pp. 52–60.
- [14] Park N.-G., Kim K.-J., Kim K.-H., Suh J.-M. A computational technique to identify the optimal stiffness matrix for a discrete nuclear fuel assembly model. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, vol. 255, pp. 51–58.

- [15] Schettino C.F.M., Gouvêa J.P., Medeiros N. Analyses of spacer grids compression strength and fuel assemblies structural behavior. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, vol. 260, pp. 93–103.
- [16] Donida F., Casella F., Ferretti G. Model order reduction for object-oriented models: a control systems perspective. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 269–284.
- [17] Leblond C., Allery C., Inard C. An optimal projection method for the reduced-order modeling of incompressible flows. *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2011, vol. 200, no. 33–36, pp. 2507–2527.
- [18] Hou G., Wang J., Layton A. Numerical methods for fluid-structure interaction — a review. *Communications in Computational Physics*, 2012, vol. 12, no. 2, pp. 337–377.
- [19] Pochlyly F., Malenovsky E., Pohanka L. New approach for solving fluid-structure interaction eigenvalue problem by modal analysis and the calculation of steady-state or unsteady responses. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, vol. 37, pp. 171–184.
- [20] Xu M.-R., Xu S.-P., Guo H.-Y. Determination of natural frequencies of fluid-conveying pipes using homotopy perturbation method. *Computers and Mathematics with Applications*, 2010, vol. 60, no. 3, pp. 520–527.
- [21] Chang T.-P. On the natural frequency of transversely isotropic magneto-electro-elastic plates in contact with fluid. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, vol. 37, no. 4, pp. 2503–2515.
- [22] Bai Z.-J. Constructing of physical parameters of a damped vibrating system from eigendata. *Linear Algebra and its Applications*, 2008, vol. 428, no. 2–3, pp. 625–656.
- [23] Gomes H.M., Silva N.R.S. Some comparisons for damage detection on structures using genetic algorithms and modal sensitivity method. *Applied Mathematical Modelling*, 2008, vol. 32, no. 11, pp. 2216–2232.
- [24] Kang F., Li J.-J., Xu Q. Damage detection based on improved particle swarm optimization using vibration data. *Applied Soft Computing*, 2012, vol. 12, no. 8, pp. 2329–2335.
- [25] Li L., Hu Y., Wang X., Ling L. Eigensensitivity analysis of damped systems with distinct and repeated eigenvalues. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2013, vol. 72, pp. 21–34.
- [26] Christafakis A., Alexopoulos J., Tsangaris S. Modelling of two-phase flows in ducts. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, vol. 33, no. 3, pp. 1201–1212.
- [27] Böttcher M., Krüßmann R. Primary loop study of a VVER-1000 reactor with special focus on coolant mixing. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, vol. 240, no. 9, pp. 2244–2253.
- [28] Pang S., Chen L., Zhang M., Yin Y., Chen T., Zhou J., Liao D. Numerical simulation two phase flows of casting filling process using SOLA particle level set method. *Applied Mathematical Modelling*, 2010, vol. 34, no. 12, pp. 4106–4122.
- [29] Yang X., Schlegel J.P., Liu Y., Paranjape S., Hibiki T., Ishii M. Experimental study of interfacial area transport in air-water two-phase flow in a scaled 8×8 BWR rod bundle. *International Journal of Multiphase Flow*, 2013, vol. 50, pp. 16–32.
- [30] Yuan Y.-X., Dai H. A generalized inverse eigenvalue problem in structural dynamic model updating. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2009, vol. 226, no. 1, pp. 42–49.

- [31] Liu X.-X., Li J.-F., Hu X.-Y. Generalized inverse problems for part symmetric matrices on a subspace in structural dynamic model updating. *Mathematical and Computer Modelling*, 2011, vol. 53, no. 1–2, pp. 110–121.
- [32] Christodoulou K., Ntotsios E., Papadimitriou C., Panetsos P. Structural model updating and prediction variability using Pareto optimal models. *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2008, vol. 198, no. 1, pp. 138–149.
- [33] Zio E., Bazzo R. Multiobjective optimization of the inspection intervals of a nuclear safety system: a clustering-based framework for reducing the Pareto front. *Annals of Nuclear Energy*, 2010, vol. 37, no. 1, pp. 798–812.
- [34] Li X.Y., Law S.S. Adaptive Tikhonov regularization for damage detection based on nonlinear model updating. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, vol. 24, no. 2, pp. 1646–1664.
- [35] Chu D., Lin L., Tan R.C.E., Wei Y. Condition numbers and perturbation analysis for the Tikhonov regularization of discrete ill-posed problems. *Numerical Linear Algebra with Applications*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 87–103.
- [36] Kaltenbacher B., Kirchner A., Vexler B. Adaptive discretizations for the choice of a Tikhonov regularization parameter in nonlinear inverse problems. *Inverse Problems*, 2011, vol. 27, no. 12, pp. 1–28.
- [37] Сулимов В.Д., Шкапов П.М. Методология решения экстремальных задач для механических и гидромеханических систем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. Спец. вып. 2012, № 8, с. 17–34.
- [38] Karmitsa N., Bagirov A., Mäkelä M.M. Comparing different nonsmooth minimization methods and software. *Optimization Methods & Software*, 2012, vol. 27, no. 1, pp. 131–153.
- [39] Karmitsa N., Bagirov A. Limited memory discrete gradient bundle method for nonsmooth derivative-free optimization. *Optimization*, 2012, vol. 61, no. 12, pp. 1491–1509.
- [40] Bagirov A.M., Jin L., Karmitsa N., Al Nuaimat A., Sultanova N. Subgradient method for nonconvex nonsmooth optimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2013, vol. 157, no. 2, pp. 416–435.
- [41] Astorino A., Frangioni A., Gaudioso M., Gorgone E. Piecewise quadratic approximations in convex numerical optimization. *SIAM Journal on Optimization*, 2011, vol. 21, no. 4, pp. 1418–1438.
- [42] Chen X. Smoothing methods for nonsmooth, nonconvex minimization. *Mathematical Programming. Ser B*, 2012, vol. 134, no. 1, pp. 71–99.
- [43] Bot R.I., Hendrich C. A double smoothing technique for solving unconstrained nondifferentiable convex optimization problems. *Computational Optimization and Applications*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 239–262.
- [44] Сулимов В.Д. Локальная сглаживающая аппроксимация в гибридном алгоритме оптимизации гидромеханических систем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки»*, 2010, № 3, с. 3–14.
- [45] 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.
- [46] Bertsimas D., Nohadami O. Robust optimization with simulated annealing. *Journal of Global Optimization*, 2010, vol. 48, no. 3, pp. 323–334.
- [47] Thangaraj R., Pant M., Abraham A., Bouvry P. Particle swarm optimization: hybridization perspectives and experimental illustrations. *Applied Mathematics and Computation*, 2011, vol. 217, no. 7(6), pp. 5208–5226.

- [48] Voglis C., Parsopoulos K.E., Papageorgiou D.G., Lagaris I.E., Vrahatis M.N. MEMSODE: A global optimization software based on hybridization of population-based algorithms and local searches. *Computer Physics Communications*, 2012, vol. 183, no. 2, pp. 1139–1154.
- [49] Sacco W.F., de Oliveira C.R.E. A new stochastic optimization algorithm based on particle collisions. *Proceedings of the 2005 ANS Annual Meeting. Transactions of the American Nuclear Society*, 2005, vol. 92, pp. 657–659.
- [50] Sacco W.F., Filho H.A., Henderson N., de Oliveira C.R.E. A Metropolis algorithm combined with Nelder-Mead Simplex applied to nuclear reactor core design. *Annals of Nuclear Energy*, 2008, vol. 35, no. 5, pp. 861–867.
- [51] Lera D., Sergeev Ya. D. Lipschitz and Hölder global optimization using space-filling curves. *Applied Numerical Mathematics*, 2010, vol. 60, no. 1, pp. 115–129.
- [52] Сулимов В.Д., Шкапов П.М. *Глобальная минимизация липшицевой многомерной недифференцируемой функции с использованием гибридного алгоритма PCASFC*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613753. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 июня 2010 г. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2010.
- [53] Сулимов В.Д., Шкапов П.М. *Глобальная минимизация липшицевой многомерной недифференцируемой функции с использованием гибридного алгоритма PCALM*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613754. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 июня 2010 г. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2010.
- [54] Sulimov V.D., Shkapov P.M. Hybrid algorithms for multiobjective optimization of mechanical and hydromechanical systems. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 190–196.
- [55] Сулимов В.Д., Шкапов П.М. *Минимизация векторной многоэкстремальной целевой функции с использованием гибридного алгоритма V-PCALMS*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616657. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25 августа 2011 г. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2011.
- [56] Сулимов В.Д., Шкапов П.М. *Минимизация векторной многоэкстремальной целевой функции с использованием гибридного алгоритма V-PCASFC*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616658. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25 августа 2011 г. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2011.
- [57] Luz E.F.P., Becceneri J.C., de Campos Velho H.F. A new multi-particle collision algorithm for optimization in a high performance environment. *Journal of Computational Interdisciplinary Sciences*, 2008, vol. 1, pp. 3–10.
- [58] Sulimov V.D., Shkapov P.M. Application of hybrid algorithms to computational diagnostic problems for hydromechanical systems. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2012, vol. 2, no. 12, pp. 734–741.
- [59] Сулимов В.Д., Шкапов П.М. *Глобальная минимизация многомерной многоэкстремальной липшицевой целевой функции с использованием гибридного алгоритма M-PCALMS*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616657. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25 августа 2012 г. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2012.

- [60] Сулимов В.Д., Шкапов П.М. *Глобальная минимизация многомерной многоэкстремальной липшицевой целевой функции с использованием гибридного алгоритма M-PCASFC*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616658. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25 августа 2012 г. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2012.

Статья поступила в редакцию 26.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сулимов В.Д., Шкапов П.М. Семейство гибридных алгоритмов оптимизации и диагностирования гидромеханических систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1140.html>

Сулимов В.Д. родился в 1950 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. Старший преподаватель кафедры теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области математического моделирования и оптимизации динамических систем. e-mail: spm@bmstu.ru

Шкапов Павел Михайлович родился в 1954 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1977. Д-р техн. наук, заведующий кафедрой теоретической механики 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