

УДК 539.3

С. А. НАЗАРЕНКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТЕЛ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ

Проанализированы этапы оптимизации многокомпонентных тел неоднородной структуры: выбор моделей динамического анализа, варьируемых переменных, функционалов цели и ограничений. Методы оптимизации классифицированы, как прямые; первого и второго порядка; стохастические; линейного и нелинейного программирования. Рассмотрено применение разных видов оптимизации Super Computer Simulation and Optimization Based Design / Engineering (многомерной, структурной, топологической, параметрической, многокритериальной и т. д.).

Ключевые слова: оптимизация, механика, неоднородные структуры, метод, CAE, SPDM.

Актуальность задачи оптимизации многокомпонентных тел неоднородной структуры обусловлена многочисленными важными научными и практическими проблемами, появляющимися при исследовании жизненного цикла новой техники в аэрокосмической, энергетической, транспортной и других отраслях промышленности [1-20 и др.].

Анализ исследований показал, что оптимальное проектирование начинают с процесса формулировки задачи. Вначале необходимо определить объект оптимизации и выбрать математические модели его анали-

за, описываемые уравнениями состояния. Многокомпонентные тела функционируют в условиях тепловых, механических, электромагнитных, аэро- и гидродинамических, акустических и радиационных нагрузений с учетом факторов контактных взаимодействий и разрушений, мало- и многоциклового усталости, концентрации напряжений, многообразных разновидностей изнашивания. При решении задач оптимизации многокомпонентных тел необходимо теоретическое исследование проблем динамического контактного взаимодействия, повреждения и разрушения; трения, износа и смазки, надежности (долговечности, безот-

казности, сохраняемости, ремонтпригодности, устойчивости, износостойкости и коррозии) машин, их деталей, узлов триботехнических систем [1-20].

При анализе и синтезе многокомпонентных тел проводится предварительная декомпозиция процесса функционирования на составляющие подпроцессы, для описания которых используются аналитические или имитационные модели. Структуру уравнений, характеризующих математические связи между заданными параметрами проектирования h и искомыми переменными состояния u , обуславливает состав многокомпонентных тел, граничные условия, нагрузки, тип исследуемого процесса и условия сопряжения [1-20].

Варьируемыми переменными h при решении задач оптимизации многокомпонентных тел могут являться физико-механические свойства материалов (углы ориентации армирования отдельных волокон, число слоев и т. д.); геометрические параметры (распределения толщины; конфигурация граничной контура, вырезов, срединной поверхности и т. д.); сосредоточенные массы и жесткости (стрингеры, шпангоуты); численность, величина и область приложения управляющих нагрузок и т. д. [1-20]. На проектные переменные могут накладываться как функциональные ограничения типа равенств и неравенств, неявным образом сужающие область варьирования, так и явные двусторонние ограничения, задаваемые из конструктивно-технологических соображений.

Создание новых конструкций и материалов с оптимальными служебными характеристиками прочности, долговечности, износостойкости, деформирования, трещиностойкости часто производят синхронно. Для орбитальных пилотируемых станций созданы трансформируемые конструкции с оптимальными жесткостно-весовыми характеристиками; базирующиеся на свойстве сплавов, испытывающих термоупругий переход, позволяющий обратимо пластически деформироваться и восстанавливать исходную (до деформирования) конфигурацию [16].

В наше время особенный интерес представляют искусственно созданные материалы с иерархической или многоуровневой (нано-микро-мезо-макро) структурой (керамические, пористые и порошковые; композиционные материалы, в т. ч. волокнистые, слоистые, гранулированные и текстильные композиты с регулярной и хаотической микроструктурой, нанокompозиты) [7, 13, 15]. Нанотехнологии изготовления защитных покрытий различных конструкций привели к формированию структурированных материалов с градиентным и объемным упрочнением. При создании техники нового поколения отметим большие перспективы многофункциональных и «интеллектуальных» (SmartMat) материалов.

Функционалы качества (критерий цели и ограничения) многокомпонентных тел представляют математическую формулировку целей оптимизации, зависят от назначения и условий эксплуатации; характеризуются нелинейными зависимостями от переменных состояния и варьируемых параметров $J = J(h, u)$

[1-20]. Большинство описанных в литературе постановок решенных задач оптимизации связано с проблемой предельного снижения веса или его аналогов при обеспечении статической прочности (несущей способности). Реже в качестве критерия цели используются функционалы динамических и диссипативных характеристик, критические параметры устойчивости, характеристики флаттера и дивергенции, комплексные характеристики стоимости и надежности и т. д..

Наличие большого числа критериев качества приводит к противоречивым требованиям на этапе проектирования. В зависимости от типа требований, предъявляемых к оптимизируемому объекту, задачи подразделяются на два типа: скалярной и векторной оптимизации. При рассмотрении многокритериальных задач наиболее распространенным является нахождение множества Парето компромиссных решений в допустимой области (или переговорного множества) [8, 13, 15].

Выбор эффективного метода решения задач оптимизации многокомпонентных тел является завершающей ступенью исследования [1-19]. При формулировке и решении динамических контактных задач оптимального проектирования многокомпонентных тел неоднородной структуры применяются два основных подхода: дискретный и континуальный. Метод оптимизации и оптимальное решение во многом определяется выбором класса варьируемых параметров (непрерывные функции, кусочно-непрерывные функции, вектор дискретных переменных).

Методы оптимизации многокомпонентных тел неоднородной структуры можно классифицировать следующим образом: прямые; первого и второго порядка; стохастические; линейного и нелинейного программирования [1-19]. Среди прямых выделим методы: Гаусса; Нелдера – Мида; Хука – Дживса; конфигураций; Розенброка.

Методы первого порядка (градиентный спуск; Зойтендейка; покоординатный спуск; сопряженных градиентов; квазиньютоновские; Левенберга – Марквардта, их модификации и многие другие) используют информацию о градиенте функционалов качества [8-11]. В этих методах, базируясь на локальных свойствах функций, описывающих критерий качества и ограничения, реализуется численный поиск улучшающего направления. Проект в данном направлении модифицируется на подходящую величину шага. Конструктивная форма условий оптимальности первого порядка имеет вид

$$\min \delta \bar{h}^T \bar{\nabla}_h J_0; \quad J_j + \delta \bar{h}^T \bar{\nabla}_h J_j = 0; \quad \bar{h} + \delta \bar{h} \in \delta U \cap U.$$

Область линеаризации формируется пересечением области δU , базирующейся на характере изменения производных целевой функции J_0 и функционалов – ограничений J_j , и допустимой области U в виде гиперпараллелепипеда

$$h_i^- \leq h_i \leq h_i^+, \quad i = \overline{1, n}.$$

Среди технологий линейного программирования выделим: симплекс-метод; алгоритм Гомори; методы эллипсоидов и потенциалов. Реализация методов вто-

рого порядка (Ньютона; Ньютона – Рафсона; алгоритм Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно (BFGS) и т. д.) связана как с трудностями вычисления второй производной критерия качества и функциональных ограничений, так и возможностью быстрой сходимости оптимизационного процесса.

Следующий класс методов оптимизации приводит решение задачи оптимизации к удовлетворению соответствующих условий оптимальности. При использовании непрямых методов (например, вариационного исчисления и теории оптимального управления) на каждой итерации проектирования удовлетворяются условия оптимальности без применения локальных свойств функционалов качества и ограничений. Методы неприменимы при наличии ограничений типа неравенств и в случае негладких или разрывных варьируемых функций. Условия оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина функционируют с ограничениями типа неравенств. Кроме непрерывной постановки разрабатывают дискретный принцип максимума для конечноэлементных моделей [4, 8].

Среди популярных технологий стохастического поиска отметим метод Монте-Карло; «имитацию отжига»; генетические алгоритмы; «дифференциальную эволюцию»; «муравьиный» алгоритм; методы «роя частиц разума» и «искусственных иммунных систем» [17, 19].

Эволюционные технологии, реализующие случайный поиск с централизованным управлением и использованием отбора и генетических механизмов воспроизводства, часто применяют в качестве метода глобальной нелинейной оптимизации. Оперирова совокупностью потенциальных решений, обрабатывается комплект параметров, структурированный в виде цепочки конечной длины, а последующие поколения популяции решений генерируются с содействием генетических операторов отбора, кроссовера и мутации [17, 19]. При этом необходимо найти баланс между рекогносцировкой и разработкой пространства поиска, который зависит от характеристик конкретной проблемы и должен изменяться динамически в зависимости от состояния процесса эволюции.

На основе применения модели, учитывающей пространственно-временные поля многообразной природы (механические, электрические, магнитные и тепловые); метода деформируемого многогранника и оптимизационных генетических алгоритмов создан электромеханический преобразователь ударного действия, функционирующий в импульсном режиме и характеризующийся увеличенной эффективностью работы и приемлемыми массогабаритными параметрами [18, 19].

Применение технологии компьютерного проектирования «Simulation-Based Design» базируется на использовании многовариантного конечноэлементного моделирования многообразных характеристик объекта в произвольных условиях эксплуатации. В настоящее время МКЭ может применяться для оптимизации целевой функции в программных ком-

плексах ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, MSC Marc, COSMOS, Designer Star и др. [1-11]. При применении многообразных видов оптимизации Super Computer Simulation and Optimization Based Design / Engineering (многомерной, структурной, топологической, параметрической, многокритериальной и т. д.) необходимо решать обратные задачи для конечно-элементных моделей.

Увеличение производительности компьютеров, основные тренды развития Computational Science, повышение эффективности вычислений (за счет распараллеливания вычислений на высокопроизводительных кластерных системах с применением многообразных модификаций и комбинаций методов декомпозиции с расщеплением и конечных суперэлементов) способствовало интеграции суперкомпьютерных технологий распределенных вычислений для так называемой симуляции и анализа реалистичных виртуальных испытаний конструкций.

Применение многопроцессорных систем способствует решению сложных научно-технических проблем путем управления CAE-процессами и данными (Simulation Process & Data Management, SPDM), суперкомпьютерного моделирования (SuperComputer Simulation); высокопроизводительным вычислениям (High Performance Computing); инновационным сервисам и «облачным» технологиям (Software as a Service, Software on Demand, Cloud Computing) [20].

Выводы. Для оптимального проектирования динамического контактного взаимодействия многокомпонентных тел необходимо разрабатывать усовершенствованные компьютерные системы оптимизации, представляющие сложные «настройки» над конечноэлементными моделями. Необходимо постоянное совершенствование экспериментальных и расчетных моделей на базе опережающего развития теории процессов деформирования и разрушения объектов (материалов, конструкций, систем) с многоуровневой структурой в условиях интенсивного воздействия окружающей среды и физических полей.

Список литературы: 1. *Agate J.* MDO: Assessment and Direction for Advancement – An Opinion of One International Group / *J. Agate, O. de Weck, J. Sobieszczanski-Sobieski, P. Arendson* // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2010. – № 40 (1). – P. 17-33. 2. *Андреев А. Г.* Основные работы ученых ХПИ в области управления механическими системами / *А. Г. Андреев, С. А. Назаренко* // Вісник НТУ «ХПИ». – 2014. – № 57 (1099). – С. 3-14. 3. *Henderson R. P.* Aircraft Conceptual Design for Optimal Environmental Performance / *R. P. Henderson, J. R. R. Martins, R. E. Perez* // The Aeronautical Journal. – 2012. – Vol. 116, № 1175. – P. 1–22. 4. *Симсон Э. А.* Оптимизация элементов конструкций по прочностным и динамическим характеристикам / *Э. А. Симсон, С. А. Назаренко, Ю. П. Анацкий* // Вісник НТУ «ХПИ». – 2004. – № 31. – С. 137-140. 5. *Alonso J. J.* Multidisciplinary Optimization with Applications to Sonic-Boom Minimization / *J. J. Alonso, M. R. Colonno* // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2012. – Vol. 44, № 1. – P. 505-526. 6. *Назаренко С. А.* Ключевые работы ученых НТУ «ХПИ» в области математического моделирования в технике / *С. А. Назаренко, С. И. Марусенко* // Вісник НТУ «ХПИ». – № 18 (1127). – С. 14-19. 7. *Young Y.* Reliability-based design and optimization of adap-

tive marine structures / Y. Young, J. Baker, M. Motley // Composite Structures. – 2010. – Vol. 92. – P. 244-253. **8.** Симсон Э. А. Оптимизация в проектировании: теории и приложения / Э. А. Симсон, С. А. Назаренко // Инфиз: очерки истории творчества. – Х.: ЭнергоКлуб Украины, 2005. – С. 329-345. **9.** Lambe A. B. Extensions to the Design Structure Matrix for the Description of Multidisciplinary Design, Analysis and Optimization Processes / A. B. Lambe, J. R. R. A. Martins // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2012. – Vol. 46. – P. 273-284. doi:10.1007/s00158-012-0763-y. **10.** Назаренко С. А. Многодисциплинарный анализ чувствительности для исследования жизненного цикла изделия / С. А. Назаренко // Труды 11-й Международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии». – Х.: 2005. – С. 29-34. **11.** Tedford N. P. Benchmarking Multidisciplinary Design Optimization Algorithms / N. P. Tedford, J. R. Martins // Optimization and Engineering. – 2010. – Vol. 11. – P. 159-183. **12.** Тимофеев Ю. В. Обобщенная структура жизненного цикла машиностроительного производства и его изделий / Ю. В. Тимофеев, В. А. Фадеев, М. С. Степанов, С. А. Назаренко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2009. – № 1. – С. 86-95. **13.** Зиновьев П. А. Оптимальное проектирование композитных материалов / П. А. Зиновьев, А. А. Смердов / М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 103 с. **14.** Симсон Э. А. Методы анализа и оптимизации нагруженных элементов технологических систем / Э. А. Симсон, С. А. Назаренко, И. Д. Прево // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 42 (1085). – С. 187-192. **15.** Смердов А. А. Основы оптимального проектирования композитных конструкций / А. А. Смердов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 88 с. **16.** Андреев А. Г. Основные работы ученых ХПИ в области анализа термонапряженных конструкций / А. Г. Андреев, С. А. Назаренко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 63 (1036). – С. 3-11. **17.** Bahmani S. Greedy sparsity-constrained optimization / S. Bahmani, B. Raj, P. T. Boufounos // Journal of Machine Learning Research. – 2013. – № 14. – P. 807-841. **18.** Болюх В. Ф. Мультиполевая модель импульсного электромеханического преобразователя / В. Ф. Болюх, С. А. Назаренко, М. А. Рассоха / Интегровані технології та енергозбереження. – 2009. – № 3. – С. 34-40. **19.** Болюх В. Ф. Системный подход к мультидисциплинарной оптимизации электромеханических преобразователей ударного действия / В. Ф. Болюх, С. А. Назаренко / Интегровані технології та енергозбереження. – 2010. – № 2. – С. 36-43. **20.** Global Simulation and Analysis Software Market 2011-2015. Infinity Research Report. March 2012. 34 p. Table of Contents – <http://www.technavio.com/content/Global-Simulation-and-Analysis-Software-Market-2011-2015>.

Bibliography (transliterated): 1. Agate J. MDO: Assessment and Direction for Advancement – An Opinion of One International Group. J. Agate, O. de Weck, J. Sobieszcanski-Sobieski, P. Arendson. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010. No 40 (1). 17-33 Print. 2. Andreev A. G. Osnovnye raboty uchenykh HPI v oblasti analiza termonapryazhennykh konstruktsiy / A. G. Andreev, S. A. Nazarenko. Visnyk NTU "KhPI". 2014. No 57 (1099). 3-14 Print. 3. Henderson R. P. Aircraft Conceptual Design for Optimal Environmental Performance. R. P. Henderson, J. R. R. Martins, R. E. Perez. The Aeronautical Journal.

2012. Vol. 116, No 1175. 1–22 Print. 4. Simson E. A. Optimizaciya elementov konstruktsiy po prochnostnym i dinamicheskim harakteristikam. E. A. Simson, S. A. Nazarenko, Yu. P. Anackij. Visnyk NTU "KhPI". 2004. No 31. 137-140 Print. 5. Alonso J. J. Multidisciplinary Optimization with Applications to Sonic-Boom Minimization. J. J. Alonso, M. R. Colonna. Annual Review of Fluid Mechanics. 2012. Vol. 44, No 1. 505-526. 6. Nazarenko S. A. Klyuchevye raboty uchenykh NTU "HPI" v oblasti matematicheskogo modelirovaniya v tekhnike. S. A. Nazarenko, S. I. Marusenko. Visnyk NTU "KhPI". No 18 (1127). 14-19 Print. 7. Young Y. Reliability-based design and optimization of adaptive marine structures. Y. Young, J. Baker, M. Motley. Composite Structures. 2010. Vol. 92. 244-253 Print. 8. Simson E. A. Optimizaciya v proektirovanii: teorii i prilozheniya / E. A. Simson, S. A. Nazarenko. Infiz: ocherki istorii tvorchestva. Kharkiv: EnergoKlub Ukrainy, 2005. 329-345 Print. 9. Lambe A. B. Extensions to the Design Structure Matrix for the Description of Multidisciplinary Design, Analysis and Optimization Processes. A. B. Lambe, J. R. R. A. Martins. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2012. Vol. 46. 273-284. doi:10.1007/s00158-012-0763-y Print. 10. Nazarenko S. A. Mnogodisciplinarnyj analiz chuvstvitel'nosti dlya issledovaniya zhiznennogo cikla izdeliya. S. A. Nazarenko. Trudy 11-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Fizicheskie i komp'yuternye tekhnologii". Kharkiv: 2005. 29-34 Print. 11. Tedford N. P. Benchmarking Multidisciplinary Design Optimization Algorithms. N. P. Tedford, J. R. Martins. Optimization and Engineering. 2010. Vol. 11. 159-183 Print. 12. Timofeev Yu. V. Obobschennaya struktura zhiznennogo cikla mashinostroitel'nogo proizvodstva i ego izdelij. Yu. V. Timofeev, V. A. Fadeev, M. S. Stepanov, S. A. Nazarenko. Visnyk NTU "KhPI". 2009. No 1. 86-95 Print. 13. Zinov'ev P. A. Optimal'noe proektirovanie kompozitnykh materialov. P. A. Zinov'ev, A. A. Smerdov. Moscow: Izd-vo MG TU im. N. E. Bauman, 2006. 103 Print. 14. Simson E. A. Metody analiza i optimizatsii nagruzhennykh elementov tekhnologicheskikh sistem. E. A. Simson, S. A. Nazarenko, I. D. Prevo. Visnyk NTU "KhPI". 2014. No 42 (1085). 187-192 Print. 15. Smerdov A. A. Osnovy optimal'nogo proektirovaniya kompozitnykh konstruktsiy. A. A. Smerdov. Moscow: Izd-vo MG TU im. N. E. Bauman, 2006. 88 Print. 16. Andreev A. G. Osnovnye raboty uchenykh HPI v oblasti analiza termonapryazhennykh konstruktsiy. A. G. Andreev, S. A. Nazarenko. Visnyk NTU "KhPI". 2013. No 63 (1036). 3-11 Print. 17. Bahmani S. Greedy sparsity-constrained optimization. S. Bahmani, B. Raj, P. T. Boufounos. Journal of Machine Learning Research. 2013. No 14. 807-841 Print. 18. Bolyuh V. F. Multipolevaya model' impul'snogo elektromekhanicheskogo preobrazovatelya. V. F. Bolyuh, S. A. Nazarenko, M. A. Rassoha. Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2009. No 3. 34-40 Print. 19. Bolyuh V. F. Sistemnyj podhod k multidisziplinarnoy optimizatsii elektromekhanicheskikh preobrazovatelej udarnogo dejstviya. V. F. Bolyuh, S. A. Nazarenko. Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2010. No 2. 36-43 Print. 20. Global Simulation and Analysis Software Market 2011-2015. Infinity Research Report. March 2012. 34 p. Table of Contents. <http://www.technavio.com/content/Global-Simulation-and-Analysis-Software-Market-2011-2015>.

Поступила (received) в редколлегию 26.11.15.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Назаренко Сергей Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Сопротивление материалов» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 700-29-72; e-mail: nazarenko_serzh@mail.ua.

Nazarenko Sergej Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Senior Staff Scientist, National Technical University «KhPI», Department of Strength of Materials, tel.: (057) 700-29-72; e-mail: nazarenko_serzh@mail.ua