

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИЛЬФОННОЙ ТЕХНИКИ НА ПЛАТФОРМЕ SOLIDWORKS

М. В. Чугунов, И. Н. Полунина*

ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

**my_pk@mail.ru*

Введение. Металлические сильфоны широко применяются в различных технических системах в качестве чувствительных, компенсирующих и разделяющих элементов. Разнообразие возможных конструктивных решений с применением сильфонов обуславливает широкий диапазон типоразмеров, указанных в ГОСТ. В связи с этим актуальной является задача проектирования сильфонной техники, которая в рассматриваемом случае сводится к выбору сильфона, соответствующего заданным техническим условиям. Целью исследования является разработка методики и программного обеспечения для решения задач автоматизации оптимального проектирования конструкций рассматриваемого класса.

Материалы и методы. Система автоматизированного проектирования SolidWorks используется в данной работе как платформа для разработки Stand-Alone приложения, позволяющего автоматически формировать 3D-модель сильфона по заданным параметрам, извлекаемым из базы данных и отвечающим заданным техническим условиям. Доступ к функционалу SolidWorks, средствам анализа SolidWorks Simulation и соответствующей базе данных обеспечивался посредством COM-технологии. Для решения оптимизационной задачи использовался функционал, разработанный авторами данной статьи Add-In приложения SolidWorks; средой разработки послужила MS Visual Studio C++ (2015). Работа проводилась на основе объектно-ориентированного программирования с использованием API SolidWorks.

Результаты исследования. Была разработана методика оптимального проектирования сильфонной техники. Программное обеспечение представляет собой готовое для практического использования приложение SolidWorks, формирующее проектное решение в виде 3D-моделей (деталей и сборок), которое соответствует заданным техническим условиям.

Обсуждение и заключения. Разработанная методика и программное обеспечение значительно (на порядок и выше) сокращает время, затрачиваемое на разработку проектных решений для конструкций рассматриваемого класса.

Ключевые слова: сильфонная техника, оптимальное проектирование, SolidWorks, база данных, объектно-ориентированное программирование, параметрическая модель, COM-технология, API, OLE DB

Для цитирования: Чугунов М. В., Полунина И. Н. Оптимальное проектирование сильфонной техники на платформе SolidWorks // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 2. С. 169–177. DOI: 10.15507/0236-2910.027.201702.169-177

OPTIMUM DESIGN OF THE METAL BELLOWS ON THE SOLIDWORKS PLATFORM

M. V. Chugunov, I. N. Polunina*

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

**my_pk@mail.ru*

Introduction. The metal bellows are widely used in various technical systems as the sensitive, compensating and separating elements. A variety of possible constructive solutions using bellows causes a broad range of standard sizes specified in GOST. In this regard the problem of the metal bellows design, which in the present case resolves itself to the choice of the bellow corresponding to the set specifications optimum, is important. Thus, the purpose of the research is the development of technique and software for the optimum design automation of the considered class structures.

Materials and Methods. SolidWorks is the world leader in the area of CAD/CAE computer aided design-engineering system and possesses not only a developed standard functionality, but also opportunities of extension of this functionality by the user. In this article SolidWorks is used as a platform for the development of Add-In application to create automatically the metal bellow 3D model for the given parameters from the database corresponding to the given specifications. At the same time access to SolidWorks simulation functionality, through the analysis of SolidWorks Simulation, and to the appropriate database is provided by COM technology. For the solution of the optimization problem, the functionality of the Add-In-application developed by authors of this article is used. A development environment is MS Visual Studio C ++ (2015). The basis for work is object-oriented programming with API SolidWorks use.

Results. The technique of optimum design of the metal bellows is developed. The software represents the SolidWorks application for practical use creating the project solution in the form of 3D models (parts and assemblies) corresponding to the given specifications.

Discussion and Conclusions. The developed technique and software reduce considerably time for the development of the project for structures of the considered class.

Keywords: metal bellows, optimum design, SolidWorks, databases, object-oriented programming, parametric models, COM technologies and API, OLE DB

For citation: Chugunov M. V., Polunina I. N. Optimum design of the metal bellows on the SolidWorks platform. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2017; 27(2):169-177. DOI: 10.15507/0236-2910.027.201702.169-177

Введение

Задача автоматизированного проектирования предполагает создание интегрированных междисциплинарных моделей, соответствующих различным аспектам описания объекта проектирования (конструкторским и функциональным), а также различным видам обеспечения (математического, программного, информационного). В числе данных моделей выделяются 3D-модели (детали и сборки), математические (аналитические и численные), инфор-

мационные (базы данных), алгоритмические и программные.

В статье реализовано комплексное решение задачи автоматизированного оптимального проектирования сильфонов на основе использования моделей всех указанных типов в интегрированной форме.

Обзор литературы

В научной литературе имеется значительное количество примеров решения частных задач подобного рода, которые основаны на отдельно взятых



моделях аналитического или численного типа. Например, в фундаментальной работе¹ представлены аналитические методы расчета и проектирования сильфонов, основанные на теории пластин и оболочек и адаптированные к инженерной расчетной практике. В статье [1] рассматриваются варианты применения сильфонов и соответствующие процедуры с использованием средств автоматизации расчетов, также основанных на аналитических методах. В работе [2] приводится аналитическое описание деформаций сильфона как объемного твердого тела, ограниченного заданными поверхностями. Такое описание позволяет изучить поля деформаций и напряжений, возникающих в толще реальных оболочек.

В настоящее время для анализа состояния и поведения сильфонной техники используются в основном численные методы. В частности, в работах [3–4] приводятся и анализируются конечно-элементные модели сильфонов в среде системы ANSYS; в статье [3] исследуется циклическая прочность сильфона при вынужденных осевых колебаниях; в работе [4] дается оценка долговечности сильфона при малоциклового усталости в случае циклического нагружения, сжатия, растяжения и изгиба.

Основой для комплексного решения послужила разработанная авторами статьи параметрическая библиотека для моделирования сильфонов в среде SolidWorks [5], позволяющая осуществлять автоматическое построение 3D-модели сильфона на основе паттерна проектирования с заданными типоразмерами. Недостатком данной библиотеки является то, что параме-

тры сильфона представляют собой глобальные переменные или определяются с помощью уравнений, однако исходные значения необходимо вводить вручную.

В данной работе параметрическая библиотека в контексте конструкторского аспекта описания объекта проектирования интегрируется с соответствующей базой данных в единой среде оптимального автоматизированного проектирования (САПР) «Сильфоны».

Материалы и методы

В процессе исследования использовались следующие методы, технологии, среды моделирования и разработки.

1. CAD/CAE-система SolidWorks (Simulation) как среда 3D-моделирования, проектирования, анализа и оптимизации проектных решений.

2. Объектная модель компонентов COM (Component Object Model)²⁻³, позволяющая получить доступ к моделям и функционалу приложения, в данном случае SolidWorks.

3. Среда разработки MS Visual Studio C++ широкого спектра назначения².

4. Технология OLE DB (Object Linking and Embedding, Database), реализующая поддержку со стороны MS Visual Studio C++ и позволяющая осуществить прямой доступ к данным. По существу, OLE DB представляет собой набор COM-интерфейсов. При этом интегрируются не только системы автоматизированного управления, но и системы управления данными [6]. Редактирование базы данных может осуществляться как в среде MS Access, так и в программе пользователя, организуемой доступ к данным средствами OLE DB.

¹ Сильфоны: расчет и проектирование / Под ред. Л. Е. Андреевой. М. : Машиностроение, 1975. 156 с.

² Шеферд Д. Программирование на Microsoft Visual C++.NET: мастер-класс. М. : Русская редакция ; СПб. : Питер, 2007. 928 с.

³ Роджерсон Д. Основы COM. М. : Русская редакция, 2000. 400 с.

Результаты исследования
Информационное обеспечение

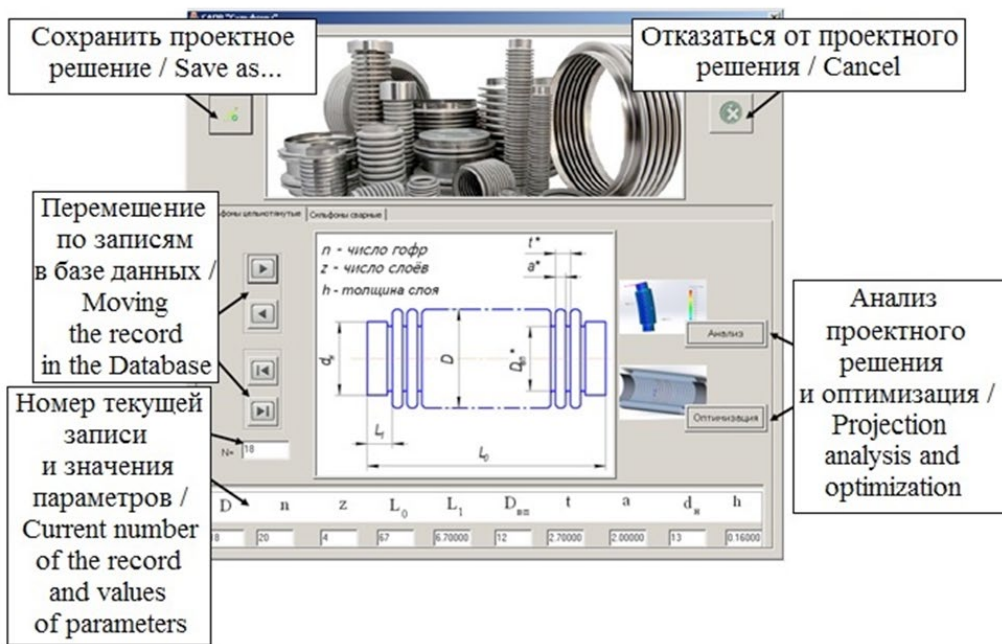
Основу информационного обеспечения САПР «Сильфоны» составляют файлы ACCDB (MDB) базы данных Access. Для двух наиболее распространенных типов металлических сильфонов (цельнотянутых и сварных) геометрические параметры (ГОСТ 21744-83, ГОСТ 21754-81) хранятся в соответствующих файлах базы данных.

На рис. 1 показано окно разработанного нами приложения САПР «Сильфоны», которое организует доступ к данным, просмотр и редактирование записей. Окно содержит две вкладки, соответствующие двум типам

сильфонов. На каждой вкладке расположены следующие элементы:

- эскиз сильфона с указанием его геометрических параметров;
- поля для вывода и редактирования параметров, извлекаемых из базы данных;
- элементы управления, позволяющие перемещаться по записям.

Кнопка «Сохранить проектное решение» позволяет сохранить все текущие документы. На начальной стадии проектирования происходит формирование и сохранение документа параметрической 3D-модели сильфона SolidWorks, параметры которой соответствуют выбранной записи из базы данных.



Р и с. 1. Окно приложения САПР «Сильфоны»
F i g. 1. CAD application window Sylphons

Математическое обеспечение

Математическое обеспечение представляет собой метод конечных элементов, реализованный в виде конечноэлементного процессора как штатного компонента SolidWorks

Simulation. В качестве оптимизационной модели используется метод Хана и Пауэлла [7] для решения задачи нелинейного математического программирования (НМП) в следующем виде:



найти

$$\min_{\mathbf{x} \in R} C(\mathbf{x}) \quad (1)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} A_j \leq x_j \leq B_j, \quad j = \overline{1, n}, \\ \phi_k(\mathbf{x}) \leq 1, \quad k = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (2)$$

где \mathbf{x} – вектор управляемых параметров; $C(\mathbf{x})$ – целевая функция, выражающая собой критерий качества объекта проектирования (массу сильфона); $n = 2$ – количество управляемых параметров и, соответственно, количество геометрических ограничений (размерность пространства оптимизации); A_j и B_j – геометрические ограничения на управляемые параметры снизу и сверху соответственно; $m = 1$

$$\phi_1(\mathbf{x}) = \frac{\sigma_{\max}^{\text{экв. vM}}}{[\sigma]} (\sigma_{\max}^{\text{экв. vM}} - \text{максимальное}$$

для конструкции эквивалентное напряжение по Мизесу, $[\sigma]$ – допустимое напряжение) – функциональное ограничение по прочности.

$$\begin{aligned} x^{(j)}(x_{i-1}^{(j)}, x_i^{(j)}, x_{i+1}^{(j)}) &= x_i^{(j)} \frac{x_{i-1}^{(j)} + x_i^{(j)}}{2} \leq x_i^{(j)} \leq \frac{x_{i+1}^{(j)} + x_i^{(j)}}{2}, \\ x_0^{(j)} &= x_1^{(j)} - \frac{x_2^{(j)} - x_1^{(j)}}{2}, \quad x_{N+1}^{(j)} = x_N^{(j)} + \frac{x_N^{(j)} - x_{N-1}^{(j)}}{2}, \end{aligned}$$

где N_j – количество дискретных значений j -той переменной.

Программное обеспечение

Для реализации СОМ используется класс интерфейсных смарт-указателей CComPtr.

На рис. 2 проиллюстрирован механизм функционирования СОМ. Интерфейсы используются Stand-Alone приложением; при этом доступ к SolidWorks и MS Access реализуется посредством смарт-указателей, которые осуществляют связь приложения с документом

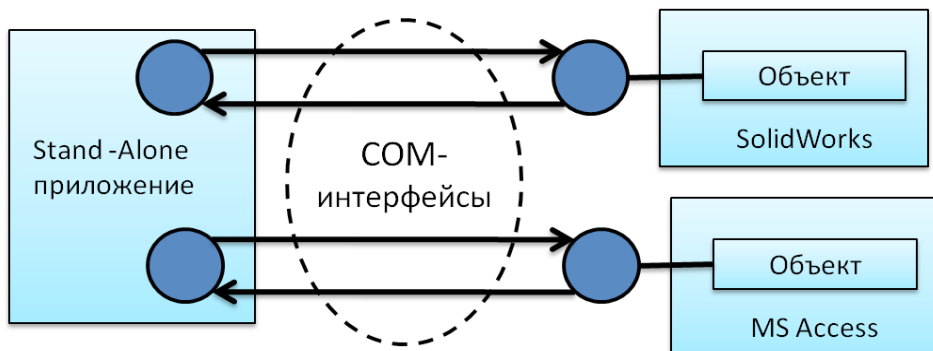
Основу программного обеспечения в части решения задачи НМП составляет набор подпрограмм [8], конвертированных нами в среду разработки MS Visual Studio C++.

В качестве управляемых параметров рассматриваются количество гофр и количество слоев оболочки. Вследствие трудоемкости оптимизационных процедур с алгоритмически заданными функциями оптимизации задача (1–2) решается с использованием многоточечных аппроксимаций⁴. Алгоритм в данном случае сводится к поэтапной замене функций оптимизации упрощенными аналитическими моделями (метамоделями), сформированными на основе анализа результатов экспериментов с исходной конечноэлементной моделью [9]. В завершение каждого этапа оптимизационного процесса, согласно [10], производится замена непрерывных значений дискретными. В данной работе для такой замены была использована функция принадлежности:

и уравнениями SolidWorks, конечноэлементным процессором (исследования Simulation), оболочками SolidWorks, результатами анализа Simulation и данными MS Access. Детали решения оптимизационной задачи на платформе SolidWorks с использованием СОМ и API SolidWorks подробно изложены в работе [11]. Программный модуль оптимального проектирования и имитационного моделирования на базе API SolidWorks зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности⁵.

⁴ **Торопов В. В.** Multipoint approximation method in optimization problems with expensive function values / Ed. by A. Sydow // Computational Systems Analysis. Elsevier, 1992. P. 207–212.

⁵ **Небайкина Ю. А., Чугунов М. В., Щекин А. В.** Модуль оптимального проектирования и имитационного моделирования на базе API SolidWorks // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611492 от 16 февраля 2011 г.



```

CComPtr<IModelDoc2> doc;
CComPtr<IEquationMgr> swEqnMgr;
CComPtr<ICWStudy> Study;
CComPtr<ICWShell> Shell;
CComPtr<ICWResults> Results;
CComPtr<IAccessor> spAccessor;
    
```

```

Документ SolidWorks
Уравнения SolidWorks
Исследования Simulation
Оболочки
Результаты
Данные
    
```

Р и с. 2. Реализация COM-технологии

F i g. 2. COM-technology realization

Из приведенных на рис. 2 указателей дополнительных комментариев требует только указатель на оболочки `CComPtr<ICWShell> Shell`. Создание данного указателя обусловлено необходимостью автоматического формирования граничных условий при изменении параметрической модели, связанном, например, с увеличением количества гофр сальфона. При создании дополнительных гофр распределенная нагрузка не переносится автоматически на вновь созданные оболочки; таким образом, эту проблему необходимо решить программно при помощи указателей Shell.

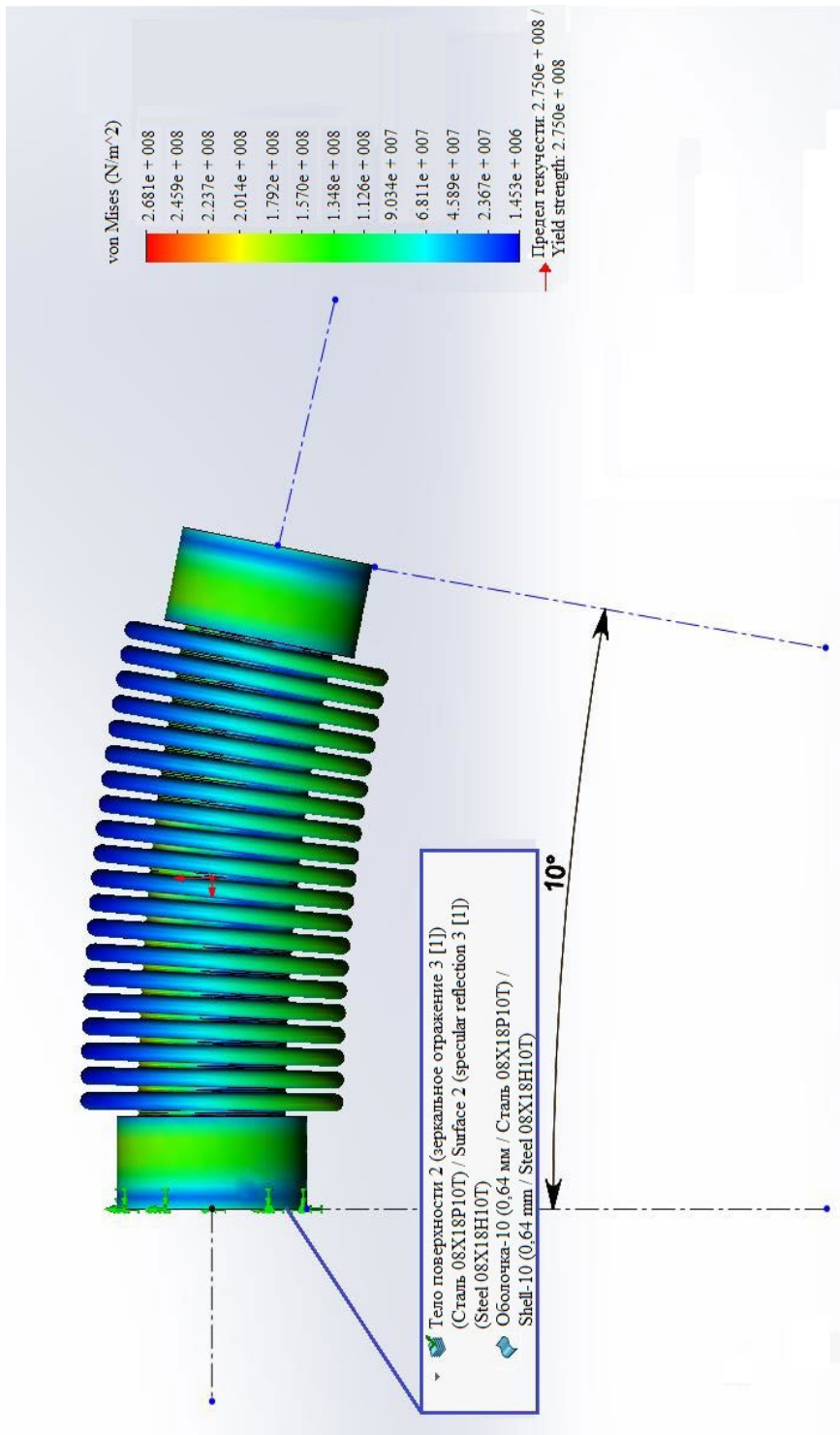
Пример

Решена задача оптимального выбора цельнотянутого многослойного сальфона, используемого в качестве компенсатора для соединения труб с нарушением соосности в 10° . Внешнее давление $p = 16$ Мпа, количество

Обсуждение и заключения

Разработанная методика и программное обеспечение позволяет эффективно решать задачи проектирования сальфонной техники в CAD/CAE среде, отвечающей техническим усло-

слов $Z = 3$, диаметр $d_n = 13$ мм, число гофр $n = 16$ (рис. 3). Материал сальфона – коррозионно- и жаростойкая сталь 08X18H10T, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 275$ МПа. Физико-механические параметры назначались в момент выбора материала из соответствующей базы данных SolidWorks. Левое торцевое сечение рассматривалось как жестко заделанное; на правое торцевое сечение наложено ограничение, соответствующее заданному положению относительно левого. Оптимизационная задача (1–2) решалась при условии $[\sigma] = \sigma_{0,2}$. На рис. 3 показан результат анализа напряженно-деформированного состояния, соответствующего оптимальному выбору из ряда параметров, согласно ГОСТ: $n^* = 20$, $z^* = 4$. Разработанное нами программное обеспечение готовится к регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности как программа для ЭВМ. виям и государственным стандартам в удобной для инженера форме. По нашим оценкам экономия времени для решения задач проектирования конструкций рассматриваемого класса может быть снижена минимум на порядок.



Р и с. 3. Напряженно-деформированное состояние оптимального проектного решения
 Fig. 3. Stress-deformed behavior of optimal design solution

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Басыров В. С.** Сильфоны – применение и расчет // Датчики и системы. 2006. № 7. С. 18–21. URL: <http://naukarus.com/silfony-primenenie-i-raschet>
2. **Гвоздев С. С., Кудрявцева И. М., Мануйлов К. В.** Аналитическое описание изгибаний сильфона с помощью абелевых функций // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17, № 1. С. 140–143. URL: http://ntv.ifmo.ru/ru/article/2431/article_2431.htm
3. **Хлопенко Н. Я., Гаврилов С. А.** Циклическая прочность и жесткость сильфонов выравнивающего устройства упорного подшипника // Проблемы трибологии. 2009. № 2. С. 58–61. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=19139107>
4. **Аистов А. И., Скворцов Ю. В., Перов С. Н.** Расчет сильфонного компенсатора на малоцикловую прочность // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17, № 2. С. 158–163. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2015/2015_2_158_163.pdf
5. Параметрическая библиотека для металлических сильфонов в среде SolidWorks / М. В. Чугунов [и др.] // Наукоедение : интернет-журнал. 2016. Т. 8, № 4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN416.pdf>
6. **Вичугова А. А., Вичугов В. Н., Цапко Г. П.** Особенности интеграции информационных систем автоматизированного проектирования и систем управления данными // Вестник науки Сибири. 2012. № 5 (6). С. 113–117. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17646631>
7. **Powell M.** On the quadratic programming algorithm of Goldfarb and Idnani // Mathematical Programming Studies. 1985. Vol. 25. P. 46–61. URL: <http://link.springer.com/chapter/10.1007%2FBFB0121074#page-1>
8. **Madsen K., Nielsen H. B., Søndergaard J.** Robust subroutines for non-linear optimization // IMM DTU, Report IMM-REP-2002-02. 2002. URL: <http://www.imm.dtu.dk/~km/Fpackage/robust.pdf>
9. **Polynkin A., Toropov V. V.** Mid-range metamodel assembly building based on linear regression for large scale optimization problems // Struct Multidiscip Optim. 2012. Vol. 45 (4). P. 515–527. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00158-011-0692-1>
10. **Liu D., Toropov V. V.** Multipoint approximation method for design optimization with discrete variables // 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization (MAO) Conf. (Indianapolis, 17–19 September, 2012). URL: <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2012-5578>
11. **Чугунов М. В., Небайкина Ю. А.** Программный модуль для решения задач оптимального проектирования в среде SolidWorks на базе API // Наука и образование : электронное науч.-техн. издание. 2011. № 9. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/206217.html>

Поступила 07.03.2017; принята к публикации 12.04.2017; опубликована онлайн 14.06.2017

Об авторах:

Чугунов Михаил Владимирович, заведующий кафедрой конструкторско-технологической информатики, Рузаевский институт машиностроения, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (431440, Россия, г. Рузаевка, ул. Ленина, д. 93), кандидат технических наук, доцент, **ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5318-5684>**, m.v.chugunov@mail.ru

Полунина Ирина Николаевна, доцент кафедры конструкторско-технологической информатики, Рузаевский институт машиностроения, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (431440, Россия, г. Рузаевка, ул. Ленина, д. 93), кандидат педагогических наук, **ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1093-8401>**, my_pk@mail.ru

Вклад соавторов: М. В. Чугунов: разработка методик и программного обеспечения для решения задач автоматизации оптимального проектирования сильфонной техники; И. Н. Полунина: расчетные процедуры, компьютерное редактирование текста и графики.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



REFERENCES

1. Basyrov V. S. [Sylphons – using and computation]. *Datchiki i sistemy* = Sensors and Systems. 2006; 7:18-21. Available at: <http://naukarus.com/silfony-primenenie-i-raschet> (In Russ.)
2. Gvozdev S. S., Kudryavtseva I. M., Manuylov K. V. [Analytic definition of sylphon bending using Abel functions]. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik informacionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* = Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2017; 1(17):140-143. Available at: http://ntv.ifmo.ru/ru/article/2431/article_2431.htm (In Russ.)
3. Khlopenko N. Ya., Gavrilov S. A. Cyclic durability and rigidity of sylphons leveling device of the persistent bearing. *Problemi tribologii* = Problems of Tribology. 2009; 2:58-61. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=19139107> (In Russ.)
4. Aistov A. I., Skvortsov U. V., Perov S. N. Estimation of low-cycle life of the sylphon compensator. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* = Samara Science Center of RAS Bulletin. 2015; 2(17):158-163. Available at: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2015/2015_2_158_163.pdf (In Russ.)
5. Chugunov M. V., Arsentiev E. O., Laymin A. N., Polunina I. N., Basyrov V. S., Makhrov G. A. Parametrical library for metal bellows in SolidWorks software. *Naukovedeniye* = Science Studies. 2016; 4(8). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN416.pdf> (In Russ.)
6. Vichugova A. A., Vichugov V. N., Capko G. P. [Integration feature of computer aided design information systems and control data systems]. *Vestnik nauki Sibiri* = Siberian Science Bulletin. 2012; 5(6):113-117. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17646631> (In Russ.)
7. Powell M. J. D. A fast algorithm for nonlinear constrained optimization calculations. Report DAMTP 77/NA 2, University of Cambridge. 1977; 144-157. Available at: <http://link.springer.com/chapter/10.1007%2FBFB0121074#page-1>
8. Madsen K., Nielsen H. B., Søndergaard J. Robust subroutines for non-linear optimization. IMM DTU, Report IMM-REP-2002-02, 2002. Available at: <http://www.imm.dtu.dk/~km/Fpackage/robust.pdf>
9. Polynkin A., Toropov V. V. Mid-range metamodel assembly building based on linear regression for large scale optimization problems. *Struct Multidiscip Optim.* 2012. 45(4):515-527. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00158-011-0692-1>
10. Liu D., Toropov V. V. Multipoint approximation method for design optimization with discrete variables. 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization (MAO) Conf., Indianapolis, IN, 17-19 September, 2012. Available at: <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2012-5578>
11. Chugunov M. V., Nebaykina Yu. A. [Optimization of designing with a programme unit by means of SolidWorks API]. *Nauka i obrazovaniye: elektronnoye nauchno-tehnicheskoye izdaniye* = Science and Education: Electronic Academic and Technical Publication. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/206217.html> (In Russ.)

Submitted 07.03.2017; revised 12.04.2017; published online 14.06.2017

About the authors:

Mikhail V. Chugunov, Head of Chair of Design and Technology Informatics, Ruzayevka Institute of Engineering, National Research Mordovia State University (93 Lenina St., Ruzayevka 431440, Russia), Ph.D. (Engineering), docent, **ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5318-5684>**, m.v.chugunov@mail.ru

Irina N. Polunina, Associate Professor of Chair of Design and Technology Informatics, Ruzayevka Institute of Engineering, National Research Mordovia State University (93 Lenina St., Ruzayevka 431440, Russia), Ph.D. (Pedagogy), **ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1093-8401>**, my_pk@mail.ru

Contribution of the co-authors: M. Chugunov: development of technique and software for computer aided optimal design of the metal bellows; I. Polunina: computer processing of data, writing the draft, computer drawing.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.