

Сравнительная оценка методов определения направления прихода сигналов на основе выборочной корреляционной матрицы/ Н. В. Москалец // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.53–61. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Comparative methods of direction of arrival estimation based on a sample correlation matrix/ M. Moskalets // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P. 53–61. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Москалец Микола Вадимович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166; е-пошта: moskalets1@yandex.ua.

Москалец Николай Вадимович – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры инфокоммуникационной инженерии, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: moskalets1@yandex.ua.

Moskalets Mykola – PhD, Kharkov National University of Radioelectronics, associate professor of the department of infocommunication engineering, ave. Nauky, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166.

УДК 004.942:62-272.6

**О. Л. СТАНОВСЬКИЙ, ВАЛІД ШЕР ХУССАІН, О. Ю. ЛЕБЕДЕВА, Т. П. СТАНОВСЬКА,
А. В. ТОРОПЕНКО, П. С. ШВЕЦЬ**

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПОЛІМАТЕРІАЛЬНИХ ОБ’ЄКТІВ В САПР ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДА ВІРТУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ

Полімеріальні об’єкти створюються для отримання синергетичного ефекту від поєднання різних властивостей матеріалів. Це породжує багатопільові задачі оптимізації щодо вибору цих матеріалів та автоматизованого проектування структури та параметрів самих об’єктів. Звичайні методи розв’язання таких задач, – чисельні, аналітичні, – не підходять для складних об’єктів із нелінійними властивостями. Запропоновано метод віртуальних моделей в САПР полімеріальних об’єктів.

Ключові слова: полімеріальні об’єкти, САПР, оптимізація структури та параметрів, метод віртуальної моделі.

Полимеріальні об’єкти створюються для отримання синергетичного ефекту від поєднання різних властивостей матеріалів. Це породжує багатопільові задачі оптимізації вибору цих матеріалів та автоматизованого проектування структури та параметрів самих об’єктів. Обычные методы решения таких задач, – численные, аналитические, – не подходят для сложных объектов с нелинейными свойствами. Предложен метод виртуальных моделей в САПР полимеріальних об’єктів.

Ключевые слова: полимеріальні об’єкти, САПР, оптимізація структури та параметрів, метод віртуальної моделі.

Polymaterial objects are created to achieve a synergetic effect from combination of various properties of materials. This creates a multipurpose optimization problem for choosing these materials and computer-aided design of the structure and parameters of the objects. Conventional methods of solving such problems, – numerical, analytical, – not suitable for complex objects with nonlinear properties. The proposed method of virtual models in CAD palmately objects. The aim of this work is to improve the quality of the automated designing of objects of transport, engineering, instrumentation, chemical and food industries, which consist of substantially different properties of the elements, by creating a method of optimizing the structure and parameters of such polymaterialy parts and assemblies. To achieve this goal in the work was proposed and solved the following tasks: existing methods of optimization of structure and parameters of multilayer objects in the CAD system is analyzed; method of virtual models for use in optimization of structure and parameters of multilayer objects in the CAD system is improved; testing of the proposed method in the design of rubber products with positive technical and economic effect is performed.

Keywords: polymaterial objects, CAD systems, structure and parameters optimization, the virtual model method.

Вступ. В сучасній промисловості широко використовуються деталі та вузли, які або складені із різних за властивостями матеріалів, або, навіть із матеріалів, що нелінійно змінюють свої властивості в просторі або часі (анізотропні та такі, що регулюються) [1, 2]. Зрозуміло, що до проектування таких елементів, особливо автоматизованого, пред’являються значно суворіші умови з точки зору використання сучасних методів та адекватності оптимізаційних моделей. Адаптація в одній деталі багатьох різних за властивостями матеріалів потребує нових підходів до розв’язання задачі оптимізації в САПР, безумовно, оптимізація багатопільової, багатовимірної та багатоекстремальної.

В той же час деякі існуючі методи такої оптимізації не отримали достатнього розвитку, що суттєво звужує можливості виробництва та негативно впливає

на конкурентоспроможність його продукції. Зокрема, в статті йдеться про вдосконалення методу віртуальної моделі для оптимізації полімеріальних виробів.

Аналітичний огляд. Існує клас деталей та вузлів машин, приладів, апаратів, тощо, в яких полімеріальність створюється навмисне при проектуванні або отримується мимовільно – як продукт оптимізації за зовсім іншими цільовими функціями виробу в цілому. До першого типу можна віднести електромеханічні фільтри та гумометалеві амортизатори, в яких на етапі проектування закладається максимальна спроможність поглинати ударні хвилі певних частот [3–5], а до другого – «штучний» механічний фільтр, який виникає поза спеціальними розрахунками та діє в транспортному засобі між дорогою та тілом людини [6–8].

© О. Л. Становський, Валід Шер Хуссаїн, О. Ю. Лебедева, Т. П. Становська, А. В. Торопенко, П. С. Швець. 2017

Оскільки усі розрахункові задачі в САПР, як правило, обернені, – в них по заданих наслідках розраховують причини їхнього виникнення, – вони відрізняються некоректністю: прийнятного рішення може не бути взагалі, або таких рішень може бути кілька [9]. Ще одним недоліком методів оптимізації полі матеріальних об'єктів є те, що такі задачі не можна розв'язувати аналітичним або чисельним методами, оскільки вони, як правило, мають велику комп'ютерну складність. В той же час існують сучасні методи розв'язання подібних задач, в яких проєктувальники вдаються до створення проміжних моделей об'єкта проєктування із нездійсненними властивостями, – віртуальних об'єктів [10]. Віртуальність моделей таких об'єктів може торкатися конфігурації моделюємого об'єкта, нездійсненної в реальному житті [11], виконання об'єкта або його окремих частин із неіснуючих матеріалів [12], одночасного прикладання до об'єкта зовнішніх сил, які мають різне значення [10], тощо.

Але, на жаль, для багат шарових об'єктів методи віртуального моделювання не існують і потребують додаткової розробки.

Мета роботи. Метою роботи є підвищення якості автоматизованого проєктування об'єктів транспорту, машинобудування, приладобудування, хімічної та харчової промисловості, які складаються із суттєво різних за властивостями елементів, за рахунок створення методу оптимізації структури та параметрів таких поліматеріальних деталей та вузлів.

Для досягнення цієї мети в роботі були висунуті та розв'язані такі задачі:

- критично проаналізовані існуючі методи розв'язання задач оптимізації структури та параметрів багат шарових об'єктів в САПР;

- удосконалено метод віртуальної моделі для використання в задачах оптимізації структури та параметрів багат шарових об'єктів в САПР;

- виконані випробування запропонованого методу при проєктуванні гумометалевих виробів з позитивним техніко-економічним ефектом.

Аналітичний метод розв'язання задач оптимізації поліматеріальних об'єктів. Розглянемо відносно просту задачу. Хай деякому впливу треба розповсюдитися від точки $(0; 0)$ (рис. 1) до точки із координатами $(x_A; L)$, долаючи при цьому шлях між цими точками крізь дві зони (I та II) двома відрізками прямих ОХ та ХА.

Точка Х завжди розташована на границі між зонами I та II, ширина яких, відповідно, l_I та l_{II} :

$$l_I + l_{II} = L, \quad (1)$$

Якщо властивості (наприклад, швидкість) перенесення впливу однакові ($v_I = v_{II} = v$) для обох зон, найшвидшим шляхом між О і А буде відрізок ОА, а час його подолання, відповідно:

$$\tau = \frac{l_{OA}}{v}. \quad (2)$$

Якщо швидкості v_I та v_{II} нерівні, «прямий» шлях ОА, з точки зору мінімуму часу, стає неоптимальним, і задача оптимізації зводиться до пошуку такої точки «перелому» шляху $X(l_I; x)$ при якій

$$\tau_I + \tau_{II} = \tau_{\min}. \quad (3)$$

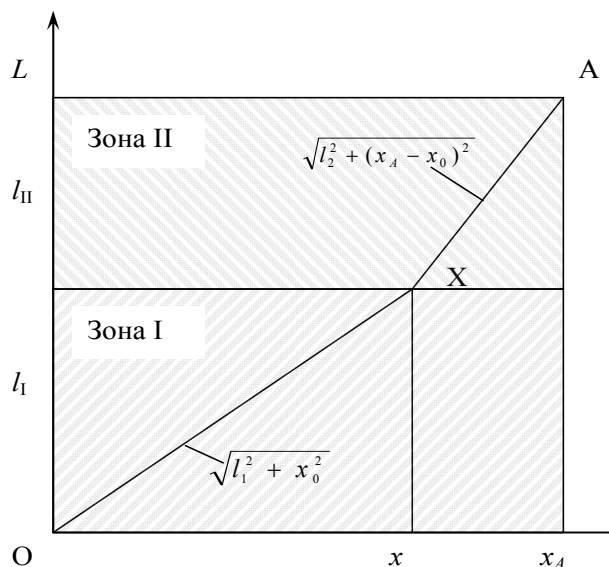


Рис. 1 – Схема до розрахунку оптимального за часом шляху подолання двох зон із різними протяжністю та властивостями

Оскільки l_I – задане число, пошук зводиться до розрахунку $x_{\min} \rightarrow \tau_{\min}(x)$. Тепер сформулюємо задачу оптимізації. В загальному вигляді вона формулюється так:

$$x \in X: f(x) = \min_{x \in X} f(x). \quad (4)$$

Для одновимірному випадку вираз (4) виглядає таким чином:

$$x \in \{0; x_A\}: f(x^*) = \min_{x \in \{0; x_A\}} f(x). \quad (5)$$

Для побудови $f(x)$ згадаємо, що метою оптимізації в задачі (5) в нашому випадку є мінімізація часу перенесення впливу від О до А, а також, що цей час є сумою часу перенесення від точки О до точки Х і від точки Х до точки А із відповідними швидкостями:

$$\tau_I = \frac{l_I}{v_I}; \quad (6)$$

$$\tau_{II} = \frac{l_{II}}{v_{II}}; \quad (7)$$

$$\tau = \tau_I + \tau_{II}. \quad (8)$$

Таким чином, цільовою функцією оптимізації є час τ , а єдиним оптимізуємым аргументом – координата x точки Х. Інші характеристики ($l_I, l_{II}, v_I, v_{II}, x_A$) є в конкретному розрахунку сталими і можуть варіюватися в процесі зміни проєктованих параметрів у дво-матеріальному об'єкті.

З рис. 1 та виразів (6)–(8) отримуємо:

$$\tau_I = \frac{\sqrt{l_I^2 + x^2}}{v_I}; \quad (9)$$

$$\tau_{II} = \frac{\sqrt{l_{II}^2 + (x_A + x)^2}}{v_{II}}; \quad (10)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{l_I^2 + x^2}}{v_I} + \frac{\sqrt{l_{II}^2 + (x_A + x)^2}}{v_{II}}. \quad (11)$$

Для розв'язання конкретної задачі оптимізації, побудованої із (5) та (11):

$$x \in \{0; x_A\};$$

$$f(x^*) = \min_{x \in \{0; x_A\}} \frac{\sqrt{l_I^2 + x^2}}{v_I} + \frac{\sqrt{l_{II}^2 + (x_A + x)^2}}{v_{II}}, \quad (12)$$

призначимо сталі: $l_I = 1$ м, $l_{II} = 2$ м, $v_I = 1$ м/с, $v_{II} = 0,5$ м/с, $x_A = 10$ м.

Тоді вираз (12) перетворюється на:

$$x \in \{0; x_A\};$$

$$f(x^*) = \min_{x \in \{0; x_A\}} (\sqrt{1 + x^2} + \sqrt{64 + 16(10 - x)^2}) \quad (13)$$

Оптимізацію виразу, який в (13) стоїть під знаком \min , можна виконати двома способами.

Перший спосіб – аналітичний. Для цього візьмемо похідну:

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = \frac{x}{v_I \sqrt{l_I^2 + x^2}} + \frac{x_A - x}{v_{II} \sqrt{l_{II}^2 + (x_A - x)^2}} \quad (14)$$

та прирівняємо її до 0:

$$\frac{x^*}{v_I \sqrt{l_I^2 + x^{*2}}} + \frac{x_A - x^*}{v_{II} \sqrt{l_{II}^2 + (x_A - x^*)^2}} = 0. \quad (15)$$

Розв'язуючи рівняння (15) отримуємо значення $x^* = 9,12$ м, а відповідний йому мінімальний час $\tau_{\min}(x^*) = 17,928$ с.

На жаль, обчислювальний шлях лише до одного результату (а в САПР такі результати перебирають тисячами) в найпростішому випадку (дві зони, які складаються з ізотропних матеріалів) виявляється настільки великим, що його не можна рекомендувати до практичного використання.

Чисельний метод розв'язання задач оптимізації поліматеріальних об'єктів. Skorистаємося формулою (11) і будемо варіювати шукане значення x^* по дискретних значеннях $x = 0, 1, 3, 5, 7, 9$. Результати занесемо до табл. 1 (1 варіант)

Як бачимо, оптимальне τ зменшується монотонно, і його найменше значення співпадає із $x = 10$, тобто точка X опиняється на межі допуску на своє існування. Це протирічить фізичному сенсу початкової задачі.

Змінимо сталі задачі на $l_I = 1$ м, $l_{II} = 2$ м, $v_I = v_{II} = 1$ м/с, $x_A = 10$ м. В цьому наборі властивості зон співпадають, а отже оптимальним шляхом між точками O та A є відрізок OA . Вираз (11) перетворюється на:

$$\tau = (\sqrt{1 + x^2} + \sqrt{4 + (10 - x)^2}), \quad (16)$$

а розрахунки за ним представлені в таблиці 1 (2 варіант). Як бачимо, в цьому прикладі $x = 3$ м (оскільки товщина зон різна).

Таблиця 1 – Результати наближеного розрахунку поліматеріального об'єкта

| x , м | τ , с 1 варіант | τ , с 2 варіант |
|---------|-------------------------|-------------------------|
| 0 | 40,8 | 11,00 |
| 1 | 38,3 | 10,61 |
| 3 | 30,0 | 10,44 |
| 5 | 27,0 | 10,47 |
| 7 | 21,0 | 10,67 |
| 9 | 18,05 | 11,28 |
| 10 | 18,04 | 12,04 |

Повертаємося до першого варіанту і виказуємо припущення, що мінімізує час значення x^* знаходиться між $x = 9$ м та $x = 10$ м. Будуємо табл. 2, в якій знаходимо цей оптимум: $x^* = 9,5$ м; $\tau_{\min}(x^*) = 17,798$ с.

Таблиця 2 – Результати уточнюючого розрахунку поліматеріального об'єкта

| x , м | τ , с 1 варіант |
|---------|----------------------|
| 9 | 18,5 |
| 9,1 | 17,928 |
| 9,5 | 17,798 |
| 10 | 18,04 |

Як бачимо, результат приблизно знайдено, але й цей, чисельний шлях виявляється досить складним навіть для найпростішого двохшарового варіанту. Більш точний результат розв'язання задачі (12) може бути знайдений, наприклад, методом підбору, що навіть для зовсім простої двовимірної задачі є математично складним випробуванням.

Метод віртуальної моделі оптимізації поліматеріальних об'єктів. В попередніх прикладах розмірність задачі оптимізації дорівнювала двом. Перейдемо тепер до об'єктів із необмеженою розмірністю. Нехай об'єкт проектування Ω має тепер наступні атрибути:

\mathbf{x} – вектор розмірних параметрів (конфігурація);
 $\boldsymbol{\lambda}$ – вектор характеристик матеріалів, з яких складається об'єкт;

\mathbf{q} – вектор зовнішніх впливів на об'єкт.

Якщо розглядати комплекс цих множин $\{\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{q}\}$ як *параметрів-причин*, то *параметрами-наслідками* або *реакціями* може вважатися деякий вектор чисел \mathbf{r} , відповідний в деякому сенсі початковому об'єкту Ω :

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{q}). \quad (17)$$

Задача (17) пряма: по трьом векторам-причинам знайти вектор-реакцію. До неї існують три обернені задачі.

1. За відомими реакцією \mathbf{r} , характеристикам $\boldsymbol{\lambda}$ і дії \mathbf{q} знайти конфігурацію \mathbf{x} :

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{r}, \lambda, \mathbf{q}). \quad (18)$$

2. За відомими реакцією \mathbf{r} , конфігурації \mathbf{x} і дії \mathbf{q} знайти характеристики λ :

$$\lambda = \lambda(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{q}). \quad (19)$$

3. За відомими реакцією \mathbf{r} , характеристикам λ і конфігурації \mathbf{x} знайти вплив \mathbf{q} :

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}(\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{r}). \quad (20)$$

У проектуванні вирішуються перша і друга об'єрнені задачі (18) і (19), в управлінні – третя (20).

Рішення цих задач неаналітичними методами, наприклад, методом перебору передбачає заміну однієї оберненої задачі (18), (19) або (20) деякою множиною прямих (17). При цьому, як сказано вище, розв'язуючий алгоритм різко ускладнюється, настільки ж різко зростає його часова складність. Зокрема, для проектування за допомогою зміни зовнішнього впливу $\Delta\mathbf{q}$ на об'єкт Ω вирішальний алгоритм підбору виглядає наступним чином [12]:

1 – вибрати деяке початкове рішення $\Delta\mathbf{q} = \Delta\mathbf{q}_{\text{поч}}$;

2 – вирішуючи пряму задачу (17), розрахувати $\mathbf{r}_{\text{поч}}(\Delta\mathbf{q}_{\text{поч}})$;

3 – визначити допустимість відхилення $\mathbf{r}_{\text{поч}}$ від області допустимих значень $\mathbf{r} \in \mathbf{R}$;

4 – якщо відхилення допустимо, зупинитися, якщо ні, – повернутися до п. 1, змінити $\Delta\mathbf{q}_{\text{поч}}$ і повторювати пп. 2 – 4 до зупинки.

Таким чином, рішення методом перебору припускає деякий «рух» в області визначення можливих зовнішніх впливів на об'єкт $\mathbf{q} \in \mathbf{Q}$. У переважній більшості випадків проектування таких «рух» неможливий із-за особливостей параметра, вздовж якого необхідно рухатися. Наприклад, не завжди можливо вільно варіювати характеристики матеріалу, з якого планується виробити об'єкт, адже матеріалу з такими характеристиками може просто не існувати! Для розв'язання цієї проблеми створюється *віртуальна* модель об'єкта проектування. Віртуальна в тому сенсі що в ній, допускаються різні, неможливі в реальному світі стани окремих елементів: наприклад, елемент *одночасно* виконаний зі сталі та алюмінію (рис. 2, а); на елемент *одночасно* в одній точці діють різні за величиною сили (рис. 2, б); елемент одночасно має різні значення одного й того ж розміру (рис. 2, в) [12].

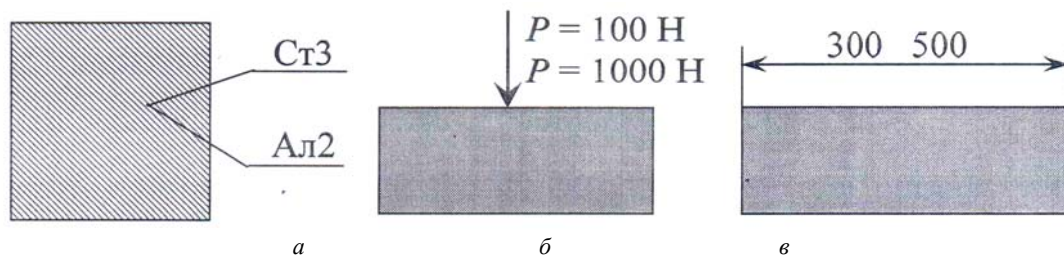


Рис. 2 – Варіанти віртуальних об'єктів в механіці: а – елемент одночасно виконаний зі сталі та алюмінію; б – на елемент одночасно в одній точці діють різні за величиною сили; в – елемент одночасно має різні значення одного й того ж розміру

Віртуальний об'єкт припускає рух в напрямку підбору квазіоптимальних рішень вздовж будь-якого параметра, незалежно від його доцільності і реальної можливості. Такий рух створює квазіоптимальну модель, для якої в реальному світі не існує відповідного до цієї моделі об'єкта.

Нехай для пошуку оптимальної конструкції деякого об'єкта необхідно «рухатися» уздовж параметра P_1 його моделі, але розв'язуючий алгоритм такий рух обмежує, наприклад, високою часовою складністю комп'ютерних обчислень (заборона А). Нехай рухом уздовж параметра P_2 моделі також можна оптимізувати управління об'єктом (назвемо цей процес квазіоптимізацією), але такий рух забороняє фізична основа об'єкта (заборона Б).

У разі «звичайної» моделі в цих умовах доведеться рухатися, змінюючи P_1 , – адже така, що суперечить здоровому глузду, заборона Б нездоланна! Інша річ – якщо модель віртуальна, – в ній немає ніяких заборон! Тоді, рухаючись в напрямку P_2 всередині віртуальної моделі, знайдемо спочатку квазіоптимальний (віртуальний) керуючий вплив $\Delta\mathbf{q}_{\text{кво}}$.

Далі має бути фінішний перехід від квазіоптимального впливу $\Delta\mathbf{q}_{\text{кво}}$ до оптимального $\Delta\mathbf{q}_{\text{опт}}$. Завдання вирішено і заборона А обійдена. Результат – значне зниження часової складності пошуку оптимального

керуючого впливу. Таким чином, запропонований метод складається з двох етапів: квазіоптимізації і фінішного переходу.

Наведемо конкретний приклад. Розглянемо проектування матеріального об'єкта у вигляді багатошарової пластини (рис. 3).

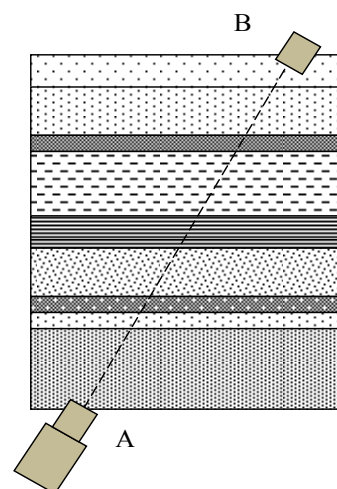


Рис. 3 – Багатошарова пластинка із різними властивостями окремих шарів: А – джерело коливань; Б – приймач коливань

Необхідно спроектувати товщину та матеріал окремих пластин так, щоб пластина працювала в якості фільтра, який на шляху від джерела широкого спектра коливань А до приймача Б подавляє деякий заданий спектр частот.

Для розрахунку параметрів розповсюдження коливань крізь цей об'єкт розглянемо віртуальну модель цього об'єкта, в якій джерело А випромінює коливання тільки однієї частоти, причому *одночасно різної*. Далі для кожного окремого шару обчислюємо таку частоту, яка найбільш відповідає умовам задачі. Фінішний перехід полягає у відтворенні фізично припустимого стану (частота єдина), що досягається відповідним перерахуванням товщин шарів об'єкта.

Практичні випробування результатів дослідження. В ПАТ «Одеський завод гумових технічних виробів» було проведено випробування САПР процесу виготовлення поліматеріальних виробів «POLIMOV». В якості об'єкта автоматизованого проектування використовували технологічний процес лиття під тиском гумової суміші при виробництві гумометалевих амортизаторів типу АКСС-10М та КРМ (рис. 4, а, б).



а



б

Рис. 4 – Гумометалеві двоматеріальні вироби типу «Силовий композиційний елемент» (гумометалеві амортизатори): а – типу АКСС; б – типу КРМ.

В результаті випробувань встановлено, що використання процесу виготовлення поліматеріальних виробів, спроектованого за допомогою САПР «POLIMOV», дозволило знизити відсоток браку в

партії гумометалевих амортизаторів АКСС-10М та КРМ на 39,14 % при забезпеченні заданих властивостей деталі.

Обговорення результатів дослідження. Результати дослідження підтверджують практичну можливість використання методу віртуальної моделі при оптимізації поліматеріальних об'єктів в сапр. Метод може бути застосований при проектуванні конструкцій та технологічних процесів виготовлення досить складних за будовою та досить відповідальних за призначенням композиційних поліматеріальних деталей.

Висновки. В результаті аналізу існуючих методів розв'язання задач проектування структури та параметрів багат шарових об'єктів в сапр встановлено, що обчислювальна складність виникаючих при цьому задач оптимізації не завжди дозволяє застосовувати для цього «звичайні» аналітичні та чисельні методи.

Наведені приклади постановки та розв'язання таких задач для поліматеріальних об'єктів за допомогою методу віртуальної моделі. Метод дозволяє уникнути складних обчислень в напрямку підбору реальних параметрів і замінити їх на створення «неможливих» віртуальних характеристик об'єктів із подальшим перерахуванням їх до реального результату проектування. Розроблені методи та моделі дозволили запропонувати нові підсистеми та створити загальну САПР «POLIMOV» (*polimaterialy object*), призначену для автоматизованого проектування поліматеріальних виробів будь-яких видів та складів матеріалів, які входять до композиції та технології їхнього виготовлення.

Список літератури

1. Становская, Т. П. Подвеска транспортного средства как нелинейный фильтр [Текст] / Т. П. Становская, О. С. Савельева, А. В. Опарин // Материалы XII семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – 2005. – С. 63–64.
2. Становський, О. Л. Автоматизоване проектування технології виготовлення гумометалевих виробів [Текст] / О. Л. Становський, Е. Ю. Лебедева, О. М. Абу Шена, А. Н. Красножон // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 5/1 (77). – С. 23–28. doi: [10.15587/1729-4061.2015.51213](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51213)
3. Лосев, А. К. Теория и расчет электромеханических фильтров [Текст] / А. К. Лосев. – М.: Связь, 1965. – 262 с.
4. Павлов, А. Н. Высокодобротный электромеханический фильтр низкочастотных сигналов [Текст] / А. Н. Павлов // Измерительная техника. – 2003. – № 10. – С. 39–40.
5. Shvets, P. The computer-aided design of rubber-metal products [J] / P. Shvets, O. Lebedeva, V. Bondarenko // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi. – 2015. – № 3. – P. 36–40. doi: [10.15276/opu.3.47.2015.10](https://doi.org/10.15276/opu.3.47.2015.10)
6. Балан, С. А. Моделирование передаточных частотных характеристик элементов автотранспортных средств [Текст] / С. А. Балан, Т. П. Становская, А. В. Опарин // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – № 3. – С. 71–73.
7. Балан, С. А. Метод виртуального объекта в управлении тормозными системами с внутренней виброзащитой [Текст] / С. А. Балан, Т. П. Становская, А. В. Опарин // Труды Одесского политехнического университета. – 2000. – № 2. – С. 29–32.
8. Сидоренко, И. И. Активная виброзащитная система с механической обратной связью по величине передаваемой нагрузки [Текст] / И. И. Сидоренко // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – № 2. – С. 51–54.
9. Гончарова, О. Е. Нечувствительный к асимметрии численный метод оптимизации конструкций [Текст] / О. Е. Гончарова, В. Г. Максимов, А. Л. Становский // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – № 2. – С. 41–44.

10. *Балан, С. А.* Метод виртуального объекта в проектировании [Текст] / *С. А. Балан, Т. П. Становская, О. Е. Гончарова* // Труды Одесского политехнического университета. – 2000. – № 1. – С. 32–35.
11. *Становский, А. Л.* Метод виртуальной модели в метрологическом обеспечении автоматизированного проектирования и управления [Текст] / *А. Л. Становский, Л. В. Бовнегра, А. В. Шмараев, Ю. В. Шихирева* // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015 – № 2/9 (74). – С. 30–35. doi: [10.15587/1729-4061.2015.40003](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.40003)
12. *Балан, С. А.* Применение метода виртуального объекта в машиностроении [Текст]: тр. VII семинара / *С. А. Балан, Т. П. Становская, О. Е. Гончарова* // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – 2000. – С. 12–16.
13. *Хемди, А. Таха* Введение в исследование операций. Operations Research: An Introduction [Текст] / *А. Таха Хемди*. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.
5. *Shvets, P., Lebedeva, O., Bondarenko, V.* (2015). The computer-aided design of rubber-metal products. Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi, 3, 36–40. doi: [10.15276/opu.3.47.2015.10](https://doi.org/10.15276/opu.3.47.2015.10)
6. *Balan, S. A., Stanovskaya, T. P., Oparin, A. V.* (1999). Modelirovanie peredatochnykh chastotnykh harakteristik elementov avtotransportnykh sredstv / Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta, 3, 71–73.
7. *Balan, S. A., Stanovskaya, T. P., Oparin, A. V.* (2000). Metod virtualnogo ob'ekta v upravlenii tormoznyimi sistemami s vnutrenney vibrozashchitoy. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta, 2, 29–32.
8. *Sidorenko, I. I.* (1999). Aktivnaya vibrozashchitnaya sistema s mehanicheskoy obratnoy svyazyu po velichine peredavaemoy nagruzki. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta, 2, 51–54.
9. *Goncharova, O. E., Maksimov, V. G., Stanovskiy, A. L.* (1999). Nechuvstvitelnyy k asimmetrii chislennyiy metod optimizatsii konstruktivnykh. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta, 2, 41–44.
10. *Balan, S. A., Stanovskaya, T. P., Goncharova, O. E.* (2000). Metod virtualnogo ob'ekta v proektirovanii. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta, 1, 32–35.
11. *Stanovskiy, A. L., Bovnegra, L. V., Shmaraev, A. V., Shihireva, Yu. V.* (2015). The virtual model method in the metrological provision of automated design and control. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (9 (74)), 30–35. doi: [10.15587/1729-4061.2015.40003](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.40003)
12. *Balan, S. A., Stanovskaya, T. P., Goncharova, O. E.* (2000). Primenenie metoda virtualnogo ob'ekta v mashinostroyenii. Modelirovanie v prikladnykh nauchnykh issledovaniyakh, 12–16.
13. *Hemdi A. Taha.* (2007). Vvedenie v issledovanie operatsiy. Operations Research: An Introduction, Moscow: Vilyams, 912.

Bibliography (transliterated)

1. *Stanovskaya, T. P., Saveleva, O. S., Oparin, A. V.* (2005). Podveska transportnogo sredstva kak nelineyniy filtr. Materialy XII seminaru «Modelirovanie v prikladnykh nauchnykh issledovaniyakh», 63–64.
2. *Stanovskiy, O. L., Liebedieva, O. Iu., Mokhammed Ali, A. Sh. O., Krasnozhan, O. M., Shvets, P. S.* (2015). A computer-aided design technology for manufacturing rubber and metal products. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (1 (77)), 23–28. doi: [10.15587/1729-4061.2015.51213](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51213)
3. *Losev, A. K.* (1965). Teoriya i raschet elektromekhanicheskikh filtrov. Moscow: Svyaz, 262.
4. *Pavlov, A. N.* (2003). Vyisokodobrotnyy elektromekhanicheskyy filtr nizkochastotnykh signalov. Izmeritelnaya tehnika, 10, 39–40.

Поступила (received) 25.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделювання та оптимізація поліматеріальних об'єктів в САПР за допомогою метода віртуальної моделі/ О. Л. Становський, Валід Шер Хуссаян, О. Ю. Лебедева, Т. П. Становська, А. В. Торопенко, П. С. Швець // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 61–67. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.

Моделирование и оптимизация полиматериальных объектов в САПР с помощью метода виртуальной модели/ А. Л. Становский, Валід Шер Хуссаян, Е. Ю. Лебедева, Т. П. Становская, А. В. Торопенко, П. С. Швець // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С.61–67. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.

Modeling and optimization polimaterialnyh objects in CAD method using a virtual model/ O. Stanovskiy, Walid Sher Hussain, O. Lebedeva, T. Stanovskaya, A. Toropenko, P. Shvets //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P. 61–67. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Становський Олександр Леонідович – доктор технічних наук, професор, Одеський національний політехнічний університет, завідувач кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, пр. Шевченка, 1, м Одеса, Україна, 65044; e-mail: ostanovskiy@gmail.com.

Хуссаян Валід Шер – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, пр. Шевченка, 1, м Одеса, Україна, 65044; e-mail: walidsher@hotmail.com.

Лебедева Олена Юрївна – Одеський завод гумових технічних виробів, інженер-технолог, Миколаївська дорога, 124, м Одеса, Україна, 65013; e-mail: ozrti@rambler.ru.

Становська Тетяна Павлівна – кандидат технічних наук, доцент, Одеська національна академія харчових технологій, доцент кафедри інформаційних технологій та кібербезпеки; вул. Канатна, 112, м Одеса, Україна, 65000; e-mail: ostanovskiy@gmail.com.

Торопенко Алла Володимирівна – кандидат технічних наук, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, пр. Шевченка, 1, м Одеса, Україна, 65044; e-mail: alla.androsyk@gmail.com.

Швець Павло Степанович – кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, пр. Шевченка, 1, м Одеса, Україна.

на, 65044; e-mail: sps.090584@gmail.com.

Становский Александр Леонидович – доктор технических наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет, заведующий кафедрой нефтегазового и химического машиностроения, пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: ostanovskyi@gmail.com

Хуссаин Валид Шер – Одесский национальный политехнический университет, аспирант кафедры нефтегазового и химического машиностроения, пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: walidsher@hotmail.com.

Лебедева Елена Юрьевна – Одесский завод резиновых технических изделий, инженер-технолог, Николаевская дорога, 124, г. Одесса, Украина, 65013; e-mail: ozrti@rambler.ru.

Становская Татьяна Павловна – кандидат технических наук, доцент, Одесская национальная академия пищевых технологий, доцент кафедры информационных технологий и кибербезопасности; ул. Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65000; e-mail: ostanovskyi@gmail.com.

Торопенко Алла Владимировна – кандидат технических наук, Одесский национальный политехнический университет, доцент кафедры нефтегазового и химического машиностроения, пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: alla.androsyuk@gmail.com.

Швец Павел Степанович – кандидат технических наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет, доцент кафедры электроснабжения и энергетического менеджмента, пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: sps.090584@gmail.com.

Stanovskyi Oleksandr – PhD, professor, Odessa National Polytechnic University, Head of the Department of oil and gas and chemical engineering, Shevchenko Avenue, 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: ostanovskyi@gmail.com.

Hussain Valid Sher – Odessa National Polytechnic University, Postgraduate of the Department of oil and gas and chemical engineering, Shevchenko Avenue, 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: walidsher@hotmail.com.

Lebedeva Olena – Odessa factory of rubber technical products, engineer, Nikolaev road, 124, Odessa, Ukraine, 65013; e-mail: ozrti@rambler.ru.

Stanovska Tetyana – PhD, Associate Professor, Odessa National Academy of Food Technologies, assistant professor of the Department of information technology and cybersecurity; Kanatna Street., 112, Odessa, Ukraine, 65000; e-mail: ostanovskyi@gmail.com.

Toropenko Alla – PhD, Odessa National Polytechnic University, assistant professor of the Department of oil and gas and chemical engineering, Shevchenko Avenue, 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: alla.androsyuk@gmail.com.

Shvets Pavlo – PhD, Associate Professor, Odessa National Polytechnic University, assistant professor of the Department of electrical and energy management, Shevchenko Avenue, 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: sps.090584@gmail.com.