

Ружинська Людмила Іванівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: ruzhli@ukr.net

Ревтов Олексій Олександрович, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: 3kingdomrat@gmail.com

УДК 004.942:004.021

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.67616

МНОГОЦЕЛЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ СО СВЯЗАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СКОЛЬЗЯЩЕГО ОКНА

© П. С. Швец, Д. А. Монова, В. В. Бондаренко, Е. А. Оборотова

Проанализированы проблемы, возникающие при многоцелевой оптимизации систем со слабо связанными аргументами. Предложен интегральный показатель эффективности решения подобных задач, представляющий собой сумму глубин оптимизации отдельных подсистем по единому слабо связанному аргументу. Разработан метод многоцелевой оптимизации систем со слабо связанными аргументами с помощью метода скользящего окна. Разработан метод оптимизации зоны связности систем со слабо связанными аргументами

Ключевые слова: многоцелевая оптимизация, зона связности, интегральный показатель эффективности, метод скользящего окна

The problems arising in multi-objective optimization of systems with loosely coupled arguments are analyzed. The integral indicator for efficiency of solving such problems is proposed. It is a sum of optimization levels of the individual subsystems for loosely coupled single argument. The multi-objective optimization method for systems with loosely coupled argument using the sliding window method is developed. The method for optimizing the connectivity zone of systems with loosely coupled arguments is developed

Keywords: multi-objective optimization, connectivity zone, integral efficiency index, sliding window method

1. Введение

Задачи многоцелевой оптимизации возникают практически во всех областях человеческой деятельности. Чаще всего они связаны с ограниченностью ресурсов и невозможностью максимально (оптимально) удовлетворить потребности отдельных составляющих оптимизируемых систем. Многочисленные внешние и внутренние ограничения лишь усугубляют создающиеся при этом трудности, снижая эффективность принимаемых решений [1].

Само понятие «эффективности» многоцелевой оптимизации связано с существованием связей между ее аргументами, – действительно, если аргументы не связаны, то ничто не мешает рассмотреть многоцелевую оптимизацию как множество одноцелевых, решение которых тривиально. В то же время, неоднозначность понятия «эффективность» заставляет прикладных математиков предварительно договариваться, какие методы расчета этой эффективности применять. Ведь существуют приложения, где даже такие традиционные и общепризнанные методы, как оптимизация по Парето, могут оказаться недостаточно эффективными.

Примером такого приложения являются задачи оптимизации систем со слабо связанными аргументами, в которых именно эта слабая связь является не просто дополнительным ограничением, а целью, непосредственно связанной с предметной областью, например, с технологией.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В технических приложениях проблема связности аргументов возникает практически при любой попытке оптимизировать сложную систему. Чаще всего она возникает в процессе проектирования при решении обратных задач поиска наилучших параметров системы, удовлетворяющих, тем не менее, предъявляемым к ней требованиям [2]. Примерами такой связности могут служить соотношение скоростей вращения шлифовальных кругов, сидящих на одном валу (жесткая связь) [3], или магнитного поля статора и ротора асинхронного двигателя (слабая связь) [4]. Перечень существующих нежестких (слабых) связей в различных объектах может быть существенно расширен: это температуры внутри камеры одной металлургической печи [5], скорости движения ступеней и перил в эскалаторах [6, 7], параметры конструкции и технологии изготовления резинометаллических амортизаторов [8–10], параметры взаимодействия элементов в измерительных системах [11, 12] и многое другое.

Такие условия чаще всего накладывают дополнительные, зачастую, нежесткие связи между оптимизируемыми аргументами – параметрами объекта и среды, приводящие к существенным изменениям математических методов оптимизации в проектировании, особенно, автоматизированном, так как эти методы требуют большого объема компьютерных вычислений [13].

Как сказано выше, эти связи могут быть представлены как дополнительные ограничения, учитываемые в процессе оптимизации конструкции [14, 15], так и в качестве основных целевых функций оптимизации, позволяющих выполнить этот процесс глубже за счет выявления новых видов целевых функций и новых взаимодействий между аргументами, что, в конечном итоге, должно привлечь в процесс проектирования новые, ранее скрытые, связи и современные математические методы их учета.

Среди существующих математических методов оптимизации слабосвязанных систем наибольшее применение нашли методы дискретного программирования [16], методы адаптивных алгоритмов [17], и, наконец, эволюционные методы генетических алгоритмов, которые непрерывно совершенствуются [18]. В результате, комплексные генетические алгоритмы оказались наиболее приспособленными для решения оптимизационных задач со слабыми связями между аргументами, так как подобная связность привела не только к изменению вычислительного алгоритма, но и к структурному и параметрическому совершенствованию символьных моделей оптимизируемых систем – их хромосом [19, 20].

К сожалению, даже такие методы и модели не пригодны для оптимизации сложных систем, в которых в качестве целевой функции выступает непосредственно глубина связности, т. е. вытекающий из свойств предметной области допуск на одномоментное различие аргументов, учитываемых в разных подсистемах.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение эффективности оптимизации объектов со слабосвязанными параметрами путем использования в качестве целевой функции ширины области связности и метода скользящего окна для поиска оптимального решения.

Для достижения этой цели в работе были решены следующие задачи:

- предложен показатель эффективности многоцелевой оптимизации систем со слабосвязанными аргументами;
- разработан метод многоцелевой оптимизации систем со слабосвязанными аргументами по критерию величины зоны связности с помощью метода скользящего окна.

4. Диапазон связности как целевая функция оптимизационных расчетов в проектировании

4.1. Показатель эффективности многоцелевой оптимизации систем со слабосвязанными аргументами

Влияние связей, о которых речь шла выше, рассмотрим на примере процесса оптимизации двух целевых функций $f_1(x)$ и $f_2(x)$ одного аргумента x , имеющих, как минимум, один экстремум (рис. 1).

Введем понятие «зона связности шириной b ». Пусть при отдельном рассмотрении (аргументы x_1 и x_2 не связаны никаким соотношением) функция $f_1(x)$ достигает минимума при x_1^* , а функция $f_2(x)$ – при x_2^* (зеленые точки на рис. 1). При этом расстояние

между оптимальными аргументами x_1^* и x_2^* равно b_{\max} . Это связано с тем, что при $b > b_{\max} = |x_1^* - x_2^*|$ оптимизируемый объект фактически является системой с несвязанными параметрами и не нуждается в совместной оптимизации.

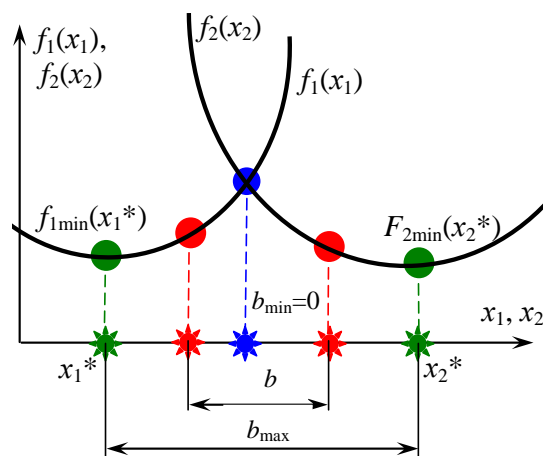


Рис. 1. Схема к расчету влияния глубины связности b на эффективность двухкритериальной оптимизации по одному оптимизирующему аргументу

Отметим, что величина b_{\max} может быть рассчитана в результате решения промежуточной оптимизационной задачи, если функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$ известны. Величина $b = b_{\min}$ всегда равна 0, она достигается, когда оба аргумента жестко связаны, когда они не могут одномоментно отличаться, и мы имеем обычную двухцелевую оптимизацию жесткосвязанного объекта по одному оптимизирующему аргументу x , а наилучшее значение x^* , например, по Парето, соответствует синим точкам на рис. 1.

Если $b_{\min} < b < b_{\max}$ (красные точки), имеем двухцелевую оптимизацию со слабосвязанными аргументами, оптимальные значения которых могут одномоментно отличаться в пределах b :

$$|x_2^* - x_1^*| \leq b. \tag{1}$$

Эффективность такой оптимизации можно оценивать по-разному. Введем показатель $E_{жс}(x)$ эффективности многоцелевой оптимизации жестко связанных аргументов в виде:

$$E_{жс}(x) = \sum_{i=1}^N \frac{f_i(x)}{f_i(x_i^*)}, \tag{2}$$

где $f_i(x)$ – текущее значение i -ой целевой функции; $f_i(x_i^*)$ – оптимальное значение i -ой целевой функции при оптимальном для этой функции аргументе x_i^* .

В нашем примере $N=2$ и выражение (2) приобретает вид:

$$E_{жс}(x) = \frac{f_1(x)}{f_1(x_1^*)} + \frac{f_2(x)}{f_2(x_2^*)}. \tag{3}$$

При $f_1(x)=f_2(x)$ функция (3) достигает максимума, что соответствует оптимальности по Парето (рис. 1).

Перейдем теперь к системам со слабосвязанными параметрами. Для разных функций аргументы такой системы могут одновременно отличаться, а значит, в формуле (3) должно появиться значение ширины зоны связности b :

$$E_c(x, b) = \frac{f_1(x, b)}{f_1(x_1^*)} + \frac{f_2(x, b)}{f_2(x_2^*)}. \quad (4)$$

Очевидно, что от конкретного вида числителей в правой части (4) будет существенно зависеть вид функции эффективности $E_c(x, b)$. При этом зависимость $f_i(x)$ определяется исключительно видом и свойствами оптимизируемого объекта, а $f_i(b)$ – правилами оптимизации. Например, если в двухцелевой оптимизации $f_i(x)$ – параболы, x_1, x_2 – концы отрезка b , а x – его середина, то:

$$E(x, b) = 2 + \frac{(x-6)^2}{5} + \frac{(x-17)^2}{30}; \quad b=0$$

$$E(x, b) = 2 + \frac{(x-0.5-6)^2}{5} + \frac{(x+0.5-17)^2}{30}; \quad b=1;$$

$$E(x, b) = 2 + \frac{(x-2.5-6)^2}{5} + \frac{(x+2.5-17)^2}{30}; \quad b=5; \quad (5)$$

$$E(x, b) = 2 + \frac{(x-16-6)^2}{5} + \frac{(x+16-17)^2}{30}; \quad b=16,$$

а зависимость (4) интерпретируется семейством кривых, представленных на рис. 2.

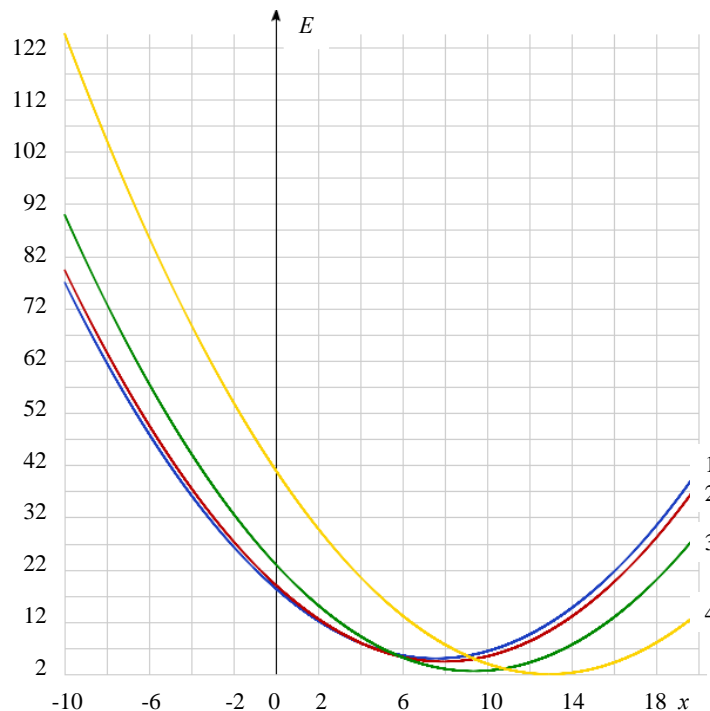


Рис. 2. Влияние аргумента x на показатель эффективности E , рассчитанный по формулам (5) при различных значениях b : 1 – $b=0$; 2 – $b=1$; 3 – $b=5$; 4 – $b=16$

Как видно из рисунка, величина зоны связности b существенно сдвигает оптимальное значение оптимизируемых аргументов x_1^* и x_2^* , находящихся на концах отрезка b . Этот метод хорош для малых и постоянных отрезков b , когда расстояние между его концами невелико и фиксация на них аргументов x_1 и x_2 не намного снижает точность оптимизации.

4. 2. Многоцелевая оптимизация систем со слабосвязанными аргументами с помощью метода скользящего окна

Если усложнить задачу и предоставить возможность аргументам перемещаться внутри зоны связности и, кроме того, позволить самой зоне связности изменяться при движении, т. е. положить $b=b(x)$, то получим весьма сложную оптимизационную задачу. Теперь в перечень исходных данных, кроме целевых функций, дополнительно входят

ширина зоны связности как функция оптимизирующего аргумента и интервал оптимизации вдоль оси оптимизирующего аргумента.

Именно ширина зоны связности $b=b(x)$ становится в этом методе величиной скользящего окна, которая, естественно, в общем случае также является переменной функцией аргумента x . Для оптимизационных расчетов методом «скользящего окна» отрезок шириной b дискретно перемещается вдоль оси x , порождая дискретные значения $E_c(x, b)$. Шаг дискретизации является в этом методе настройкой пользователя и может выбираться последним или функционально привязываться к переменным параметрам оптимизируемой системы произвольно. Работу метода иллюстрирует рис. 3.

Пусть на отрезке $x_{\min} - x_{\max}$ определены две функции: $f_1(x)$ и $f_2(x)$ и заданы текущие i -е дискретные значения аргумента $b_{i\min}$ и $b_{i\max}$, определяющие начало и конец текущего i -го расположения зоны

связности вдоль оси x . Затем рассчитываются минимизирующие (максимизирующие) на отрезке b_{\min} и b_{\max} значения x_{i1}^* и x_{i2}^* (рис. 3), а также соответствующие им минимальные (максимальные) значения функций $f_{i1\min}(x_{i1}^*)$ и $f_{i2\min}(x_{i2}^*)$.

Далее, в соответствии с (4) рассчитывается значение функции эффективности $E_{ic}(x, b)$ для этого расположения и этой ширины зоны b_i .

В общем алгоритме оптимизации систем со слабосвязанными параметрами по показателю эффективности E методом скользящего окна (рис. 4) все промежуточные значения $E_{ic}(x, b)$ «собираются» в единую базу, позволяющую выбрать наилучшее в некотором смысле значение ширины зоны связности b .

Применение разработанного метода в практике проектирования электротехнического оборудования позволило снизить массу трансформаторов и асинхронных двигателей на 8–15% без ухудшения их электрической мощности и КПД.

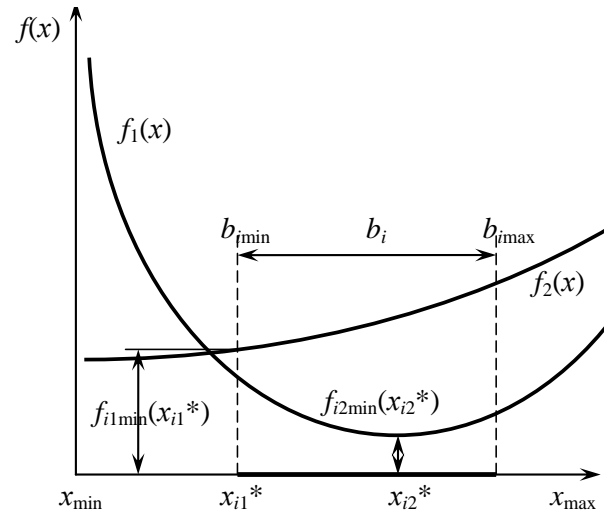


Рис. 3. Схема к методу оптимизации систем со связанными подсистемами с помощью скользящего окна

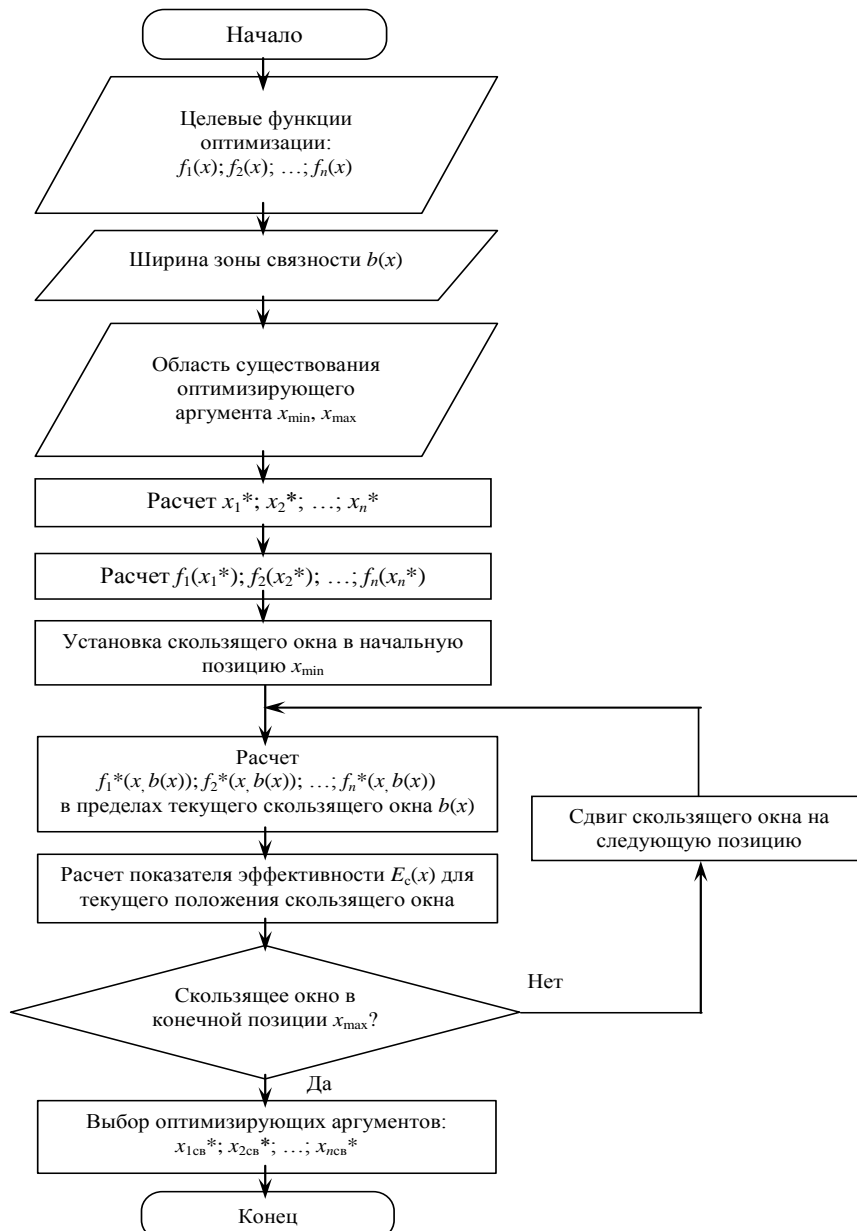


Рис. 4. Блок-схема алгоритма оптимизации систем со слабосвязанными параметрами по показателю эффективности E методом скользящего окна

5. Результаты исследования

Главным результатом настоящего исследования является предложенный показатель эффективности оптимизации слабосвязанных систем, позволяющий оценивать количественно глубину оптимизации за пределами Парето-оптимальных решений. Наличие такого показателя позволило предложить новую постановку оптимизационных задач, в которой целевыми функциями являются уже не параметры подсистем объекта, а допустимая свойствами последнего ширина зоны связности его аргументов.

Поскольку ширина зоны связности определяется с конструкцией объекта либо технологией его изготовления, такая постановка позволяет применять эти задачи в системах автоматизированного проектирования.

В частности, применение разработанного метода в практике проектирования электротехнического оборудования позволило достичь значительного технико-экономического результата.

6. Выводы

1. Для сравнительной возможности оценки разных вариантов объектов со слабосвязанными параметрами предложен показатель, представляющий собой сумму относительного отклонения от оптимальности по всем целевым функциям.

2. Для систем с малым возможным отклонением оптимизирующих аргументов предложен ускоренный метод оптимизации с помощью скользящего окна постоянной ширины и с фиксированными концами.

3. Для систем с относительно большим возможным отклонением оптимизирующих аргументов предложен расширенный метод оптимизации с помощью скользящего окна переменной ширины и с плавающими концами.

Литература

1. Шоробура, Н. Н. Разработка моделей и программных средств для многокритериальной оптимизации сложных объектов в компьютерных информационных системах [Текст] / Н. Н. Шоробура. – Донецк: ДНТУ.

2. Становський, О. Л. Оптимізація зв'язності елементів в задачах автоматизованого проектування систем [Текст] / О. Л. Становський, П. С. Швець, А. В. Торопенко, В. В. Бондаренко, А. О. Становський, О. Абу Шена, О. М. Красножон // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – № 49 (1158). – С. 170–175.

3. Перпері, А. О. Модернізація математичного методу генетичного алгоритму для оптимізації геометрії шліфувальних кіл [Текст] / А. О. Перпері, П. С. Швець, Д. А. Монова // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2011. – № 41. – С. 217–221.

4. Hameyer, K. Electrical Machine: Basics, Design, Function, Operation [Text] / K. Hameyer // RWTH Aachen University Institute of electrical machines. – 2013. – P. 133.

5. Металлургические печи: основы тепловой работы печей, нагревательные и термические печи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mashmex.ru/metallurgi/79-terplovaia-rabota-pechi.html?showall=1>

6. Почему на эскалаторах в метро перила движутся быстрее, чем ступеньки? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://thequestion.ru/questions/37006/pochemu-na-eskalatorakh-v-metro-perila-dvizhutsya-bystrye-stupenki>

7. Бакулин, А. С. Сооружения, устройства и подвижный состав метрополитена [Текст] / А. С. Бакулин, К. И. Кудринская, П. А. Куи, Е. Т. Мосин, В. А. Пронин, Е. А. Федоров. – М.: Транспорт, 1979. – 239 с.

8. Становський, О. Л. Автоматизоване проектування технології виготовлення гумовометалевих виробів [Текст] / О. Л. Становський, О. Ю. Лебедева, О. М. А. Абу Шена, О. М. Красножон // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 5, № 1 (77). – С. 23–28. doi: 10.15587/1729-4061.2015.51213

9. Лебедева, О. Ю. Автоматизація проектування технологічного процесу виготовлення гумовометалевих виробів [Текст]: конф. / О. Ю. Лебедева, О. Абу Шена, В. В. Бондаренко, О. М. Красножон // Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості 2015. – Івано-Франківськ, 2015. – С. 59–60.

10. Савельева, О. С. Інформаційні технології проектування конструкції та технології виготовлення гумометалевих виробів [Текст] / О. С. Савельева, І. І. Становська, О. Ю. Лебедева, А. В. Торопенко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Т. 2, № 2 (80). – С. 28–35. doi: 10.15587/1729-4061.2016.65456

11. Fleming, P. J. Application of Multiobjective Optimization to Compensator Design for SISO Control Systems [Text] / P. J. Fleming // Electronics Letters. – 1986. – Vol. 22, Issue 5. – P. 258. doi: 10.1049/el:19860177

12. Fleming, P. J. Computer-Aided Control System Design of Regulators using a Multiobjective Optimization Approach [Text] / P. J. Fleming // Proc. IFAC Control Applications of Nonlinear Prog. And Optim., Capri, Italy, 1985. – P. 47–52.

13. Становський, А. Л. САПР электротехнического оборудования со слабосвязанными элементами [Текст] / А. Л. Становський, П. С. Швець, А. В. Торопенко // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – 2013. – Вип. 8. – С. 133–143.

14. Становський, А. Л. Эволюционная оптимизация слабосвязанных технических систем в САПР [Текст] / А. Л. Становський, П. С. Швець, Д. А. Желдубовский // Праці Одеського політехнічного університету. – 2011. – Вип. 2 (36). – С. 234–238.

15. Становський, А. Л. Оптимизация слабосвязанных систем в автоматизированном проектировании и управлении [Текст] / А. Л. Становський, П. С. Швець, И. Н. Щедров // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2011. – Вип. 6. – С. 129–134.

16. Сигал, И. Х. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы [Текст]: учебное пособие / И. Х. Сигал, А. П. Иванова. – М.: Физматлит, 2002. – 240 с.

17. Шеховцов, А. В. Решение многокритериальной оптимизации с использованием адаптивных алгоритмов [Текст] / А. В. Шеховцов, В. В. Крючковский, А. Н. Мельник // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2007. – № 2 (20). – С. 26–32.

18. Dasgupta, D. Optimisation in Time-Varying environments using Structured Genetic Algorithms [Text] / D. Dasgupta // Technical Report No IKBS-17-93. – 1993.

19. Тонконогий, В. М. Многоцелевая оптимизация методом комплексного генетического алгоритма [Текст] / В. М. Тонконогий, А. А. Перпері, Д. А. Монова // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2011. – Вип. 6. – С. 276–281.

20. Лебедева, Е. Ю. Метод проектирования систем с существенно различными свойствами материалов элементов [Текст]: матер. XXII семинара / Е. Ю. Лебедева, А. Н. Красножон, А. А. Становський // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – Одесса: ОНПУ, 2014. – С. 57–58.

References

1. Shorobura, N. N. Razrabotka modelej i programnyh sredstv dlja mnogokriterial'noj optimizacii slozhnyh ob'ektov v komp'yuternyh informacionnyh sistemah. Doneck: DNTU.
2. Stanovskij, O. L., Shvec', P. S., Toropenko, A. V., Bondarenko, V. V., Stanovskij, A. O., Abu Shena, O., Krasnozhon, O. M. (2015). Optymizacija zv'jaznosti elementiv v zadachah avtomatyzovanogo proektuvannja system. Visnyk NTU «HPI», 49 (1158), 170–175.
3. Perperi, A. O., Shvec', P. S., Monova, D. A. (2011). Modernizacija matematychnogo metodu genetychnogo algorytmu dlja optymizacii' geometrii' shlifival'nyh kil. Visnyk Odes'koi' derzhavnoi' akademii' budivnyctva ta arhitektury, 41, 217–221.
4. Hameyer, K. (2013). Electrical Machine: Basics, Design, Function, Operation. RWTH Aachen University Institute of electrical machines, 133.
5. Metallurgicheskie pechi: osnovnyteplovoj raboty pechej, nagrevatel'nye i termicheskie pechi. Available at: <http://mashmex.ru/metallurgi/79-teplovaya-rabota-pechi.html?showall=1>
6. Pochemu na jeskalatorah v metro perila dvizhutsja bystree, chem stupen'ki? Available at: <http://thequestion.ru/questions/37006/pochemu-na-eskalatorakh-v-metro-perila-dvizhutsya-bystree-chem-stupenki>
7. Bakulin, A. S., Kudrinskaja, K. I., Kui, P. A., Mosin, E. T., Pronin, V. A., Fedorov, E. A. (1979). Sooruzhenija, ustrojstva i podvizhnyj sostav metropolitena. Moscow: Transport, 239.
8. Stanovskij, O. L., Lebedjeva, O. Ju., Abu Shena, O. M. A., Krasnozhon, O. M. (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
9. Lebedeva, O. Ju., Abu Shena, O., Bondarenko, V. V., Krasnozhon, O. M. (2015). Avtomatyzacija proektuvannja tehnologichnogo procesu vygotovlennja gumovometal'nyh vyrobiv. Informacijni tehnologii' v osviti, tehnici ta promyslovosti 2015. Ivano-Frankivs'k, 59–60.
10. Savjel'jeva, O. S., Stanovskaja, I. I., Lebedjeva, O. Ju., Toropenko, A. V. (2016). Information technologies of optimization designs and manufacturing techniques of rubber-metal products. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2/2 (80), 28–35. doi: 10.15587/1729-4061.2016.65456
11. Fleming, P. J. (1986). Application of Multiobjective Optimization to Compensator Design for SISO Control Systems. Electronics Letters, 22 (5), 258. doi: 10.1049/el:19860177
12. Fleming, P. J. (1985). Computer-Aided Control System Design of Regulators using a Multiobjective Optimization Approach. Proc. IFAC Control Applications of Nonlinear Prog. And Optim., Capri, Italy, 47–52.
13. Stanovskij, A. L., Shvec, P. S., Toropenko, A. V. (2013). SAPR jelektrotehnicheskogo oborudovanija so slabosvjazannymi jelementami. Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: zbirnik naukovih prac', 8, 133–143.
14. Stanovskij, A. L., Shvec, P. S., Zheldubovskij, D. A. (2011). Jevoljucionnaja optimizacija slabosvjazannyh tehniceskikh sistem v SAPR. Praci Odes'kogo politehnichnogo universitetu, 2 (36), 234–238.
15. Stanovskij, A. L., Shvec, P. S., Shhedrov, I. N. (2011). Optimizacija slabosvjazannyh sistem v avtomatizirovannom proektirovanii i upravlenii. Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni, 6, 129–134.
16. Sigal, I. H., Ivanova, A. P. (2002). Vvedenie v prikladnoe diskretnoe programmirovanie: modeli i vychislitel'nye algoritmy. Moscow: Fizmatlit, 240.
17. Shehovcov, A. V., Krjuchkovskij, V. V., Mel'nik, A. N. (2007). Reshenie mnogokriterial'noj optimizacii s ispol'zovaniem adaptivnyh algoritmov. Avtomatika. Avtomatizacija. Jelektrotehnicheskie komplekxy i sistemy, 2 (20), 26–32.
18. Dasgupta, D. (1993). Optimisation in Time-Varying environments using Structured Genetic Algorithms. Technical Report No IKBS-17-93.
19. Tonkonogij, V. M., Perperi, A. A., Monova, D. A. (2011). Mnogocелеvaja optimizacija metodom kompleksnogo geneticheskogo algoritma. Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni, 6, 276–281.
20. Lebedeva, E. Ju., Krasnozhon, A. N., Stanovskij, An. A. (2014). Metod proektirovanija sistem s sushhestvenno razlichnymi svojstvami materialov jelementov. Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovanijah. Odessa: ONPU, 57–58.

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, проф. А. Л. Становский.

Дата надходження рукопису 18.03.2016

Швец Павел Степанович, кандидат технических наук, кафедра электрических машин, Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
E-mail: pshvets@mail.ru

Монова Дария Анатольевна, специалист, кафедра нефтегазового и химического машиностроения, Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
E-mail: Saukh.dariya@gmail.com

Бондаренко Виктор Владимирович, кафедра радиотехнических систем, Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
E-mail: snow_dog@ukr.net

Оборотова Елена Александровна, специалист, кафедра нефтегазового и химического машиностроения, Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
E-mail: lenaoborotova24@mail.ru