

УДК 004.942

О.В. Ченгарь (канд. техн. наук)ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк
кафедра автоматизированных систем управления
E-mail: olga.chengar@gmail.com**МЕТОД ПАРЕТО-ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РАСПИСАНИЯ НА
ОСНОВЕ «НАПРАВЛЕННОГО» МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА**

В статье рассмотрены вопросы формирования расписания загрузки технологического оборудования машиностроительного предприятия, которое является результатом решения многокритериальной задачи, основанной на концепции доминирования Парето применительно к методу муравьиных колоний, с целью учёта нескольких факторов, влияющих на планирование производства, и для обеспечения высокой эффективности функционирования участка механообработки.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, пространство критериев, доминируемые и недоминируемые решения, фронт Парето, взвешенная сумма критериев, «направленный» муравьиный алгоритм.

Общая постановка проблемы и анализ литературы

В рамках оперативного управления одной из важнейших проблем является проблема планирования загрузки технологического оборудования. Как показывает практика, в реальной производственной ситуации создается не оптимальный, а рациональный план. В связи с этим своевременным является подход, который обеспечивает использование не одного критерия, а позволяет осуществлять проигрывание и анализ вариантов плана, основываясь на группе критериев. Кроме того, противоречие между требованиями эффективного использования оборудования и соблюдением сроков выпуска можно в значительной мере ослабить, перейдя от регламентации сроков к заданию приоритетов, т.е. частично упорядоченной последовательности изготовления деталей. Приоритеты могут оперативно меняться исходя из текущих потребностей. Так на практике в реальной производственной обстановке необходимо сформировать график работ, основываясь не на одном критерии эффективности, а одновременно учитывая несколько. И полученное таким образом расписание должно быть субоптимальным относительно выбранных критериев одновременно. Так становится актуальной задача многокритериальной оптимизации производственного расписания, трудность работы с которой представляет природа условий оптимальности для множества критериев.

Многокритериальная оптимизация основана на поиске решения, которое является лучшим одновременно для нескольких функций [1,2]. Это требует применения специальных методов, которые существенно отличаются от стандартной техники, ориентированной на оптимизацию одной функции. В общем виде задачу многокритериальной оптимизации можно сформулировать следующим образом (1):

$$\max(\min) \{z_1 = f_1(x), z_2 = f_2(x), \dots, z_q = f_q(x)\}, g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad x \geq 0, \quad (1)$$

где $f_q(x)$ – функция-критерий;

q – количество критериев;

$g_i(x)$ – ограничение задачи;

m – количество ограничений.

Согласно принципу доминирования Парето, потенциальные решения многокритериальной проблемы удобно классифицировать на доминируемые и недоминируемые решения [2]. Решение X называется доминируемым, если существует решение Y , не хуже чем X по всем критериям, то есть для всех оптимизируемых функций f_i ($i = 1, \dots, q$):

$$f_i(x) \leq f_i(y) \text{ для всех } 1 \leq i \leq k \text{ при максимизации функции } f_i \text{ и}$$

$$f_i(x) \geq f_i(y) \text{ для всех } 1 \leq i \leq k \text{ при минимизации функции } f_i.$$

Если решение не доминируемо никаким другим решением, то оно называется недоминируемым или оптимальным в смысле Парето.

Анализ ряда научных работ и публикаций [3-6], посвящённых современным методам решения задачи многокритериальной оптимизации, показывает, что одним из самых перспективных подходов является вопрос построения аппроксимации множества Парето на основе эволюционных алгоритмов. Принципиальным в этих методах является не использование именно эволюционных алгоритмов, а правила формирования фитнес-функции, обеспечивающие перемещение индивидов популяции, в конечном счете, в направлении множества Парето [5]. Эволюция же этих индивидов может протекать по законам, отличным от законов, используемых в эволюционных алгоритмах, например, по законам движения популяции муравьев в муравьином алгоритме. Таким образом, становится актуальной задача многокритериальной оптимизации основанной на так называемых «популяционных» методах Парето-аппроксимации, например методе муравьиных колоний.

Целью работы является применение концепции доминирования Парето к «направленному» муравьиному алгоритму за счет формирования «общей» целевой функции, состоящей из отдельных целевых функций в виде взвешенной суммы, с целью учёта нескольких факторов, влияющих на планирование производства.

Постановка задач исследования

В предыдущих работах [7-9] была рассмотрена задача синтеза субоптимального производственного расписания, для решения которой выбиралась некоторая числовая функция $F(G)$ (функция-критерий), определенная на всех графах $G(i)$, что ставило в соответствие каждому графу $G(i)$ определенное число $F(G_i)$. При этом наилучшему графу соответствовал экстремум функции $F(G)$. Таким образом, задача сводилась к тому, чтобы построить граф, который удовлетворяет всем сформулированным в задании ограничениям, на котором функция $F(G)$ достигает своего экстремального значения [8].

Обоснование выбора того или иного критерия эффективности является ответственной и далеко не всегда очевидной задачей. Трудность состоит в том, что различные критерии оптимальности зачастую оказываются противоречивыми, оптимизация по одному критерию приводит к ухудшению качества по другому критерию. Для решения данной проблемы целесообразно использование интегрированного критерия, например суммы частных критериев с некоторыми экспертно назначенными коэффициентами. Однако такой подход также нуждается в серьезном обосновании, в первую очередь, из-за значительного произвола при выборе структуры интегрированного критерия и назначении коэффициентов.

В основе муравьиных алгоритмов лежит использование множества потенциальных решений в различных направлениях глобального поиска, т.к. они не предъявляют никаких требований к виду целевых функций и ограничений [7]. Поэтому при многокритериальной оптимизации выполняется поиск не одного пути популяции муравьев по вершинам графа, а множество вариантов путей для каждой популяции муравьев, оптимальных в смысле Парето.

При многокритериальной оптимизации выполняется поиск не одного пути популяции муравьев по вершинам графа, а множество вариантов путей для каждой популяции муравьев, оптимальных в смысле Парето и центральным вопросом является формирование целевой функции. Проведенный анализ [10] показал эффективность метода взвешенной суммы, при

котором определяется вес каждого критерия, входящего в целевую функцию. Этот подход является одним из самых популярных и естественным развитием классических методов оптимизации, где «общая» целевая функция строится из отдельных целевых функций в виде взвешенной суммы (2):

$$F(x) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(x), \quad \sum_{i=1}^k w_i = 1, \quad (2)$$

где w_i – вес каждого критерия, входящего в целевую функцию;
 k – количество критериев.

Для поставленной задачи планирования загрузки технологического оборудования производственного участка одновременно по нескольким критериям эффективности целесообразно применение метода Парето-оптимизации, основанного на «направленном» муравьином алгоритме с адаптивными весами.

Метод Парето-оптимизации, основанный на «направленном» муравьином алгоритме с адаптивными весами

Как правило, в реальной производственной ситуации проблематично определить градацию критериев эффективности в порядке возрастания их важности, а, соответственно, выделить приоритеты и назначить необходимые весовые коэффициенты для интегрированной целевой функции. Таким образом, использование адаптивных весов в интегрированном критерии оптимальности отражает тенденцию переменного направления поиска, более приспособленного для поиска фронта решений.

Тогда структура многокритериального подхода основанного на «направленном» муравьином алгоритме с адаптивными весами может быть представлена следующим алгоритмом (рис. 1).

Так для каждой цели $f_k(x)$ определяется свой вес w_k (4). Скалярное значение новой целевой функции при этом вычисляется путем суммирования взвешенных значений q критериев оптимальности. Для параллельного поиска кратных решений веса не фиксируются, что дает возможность «направленному» муравьиному алгоритму расширить фронт по всем направлениям.

В представленном алгоритме на каждой итерации по определённому критерию оптимизации формируется множество решений на основе «направленного» муравьиного алгоритма. Далее для исследуемых решений определяются максимальная и минимальная экстремальные точки в пространстве заданных критериев (3):

$$z^+ = \{z_1^{\max}, z_2^{\max}, \dots, z_q^{\max}\}, \quad z^- = \{z_1^{\min}, z_2^{\min}, \dots, z_q^{\min}\}, \quad (3)$$

Для каждого критерия максимальное и минимальное значение определяется следующим образом (4):

$$z_k^{\max} = \max\{f_k(x) | x \in P\}, \quad k=1,2,\dots,q, \quad z_k^{\min} = \min\{f_k(x) | x \in P\}, \quad k=1,2,\dots,q, \quad (4)$$

где z_k^{\min} и z_k^{\max} - минимальное и максимальное значение для k -ой цели по заданному критерию;

q – число критериев оптимальности

P – множество решений по заданному критерию.

В итоге получаем гиперплоскость, определяемую двумя экстремальными точками, и содержащую все текущие решения. Указанные две экстремальные точки обновляются на каждой итерации.

При этом адаптивный вес k -ой цели определяется соотношением (5).

$$w_k = \frac{1}{z_k^{\max} - z_k^{\min}}, \quad k=1,2,\dots,q. \quad (5)$$

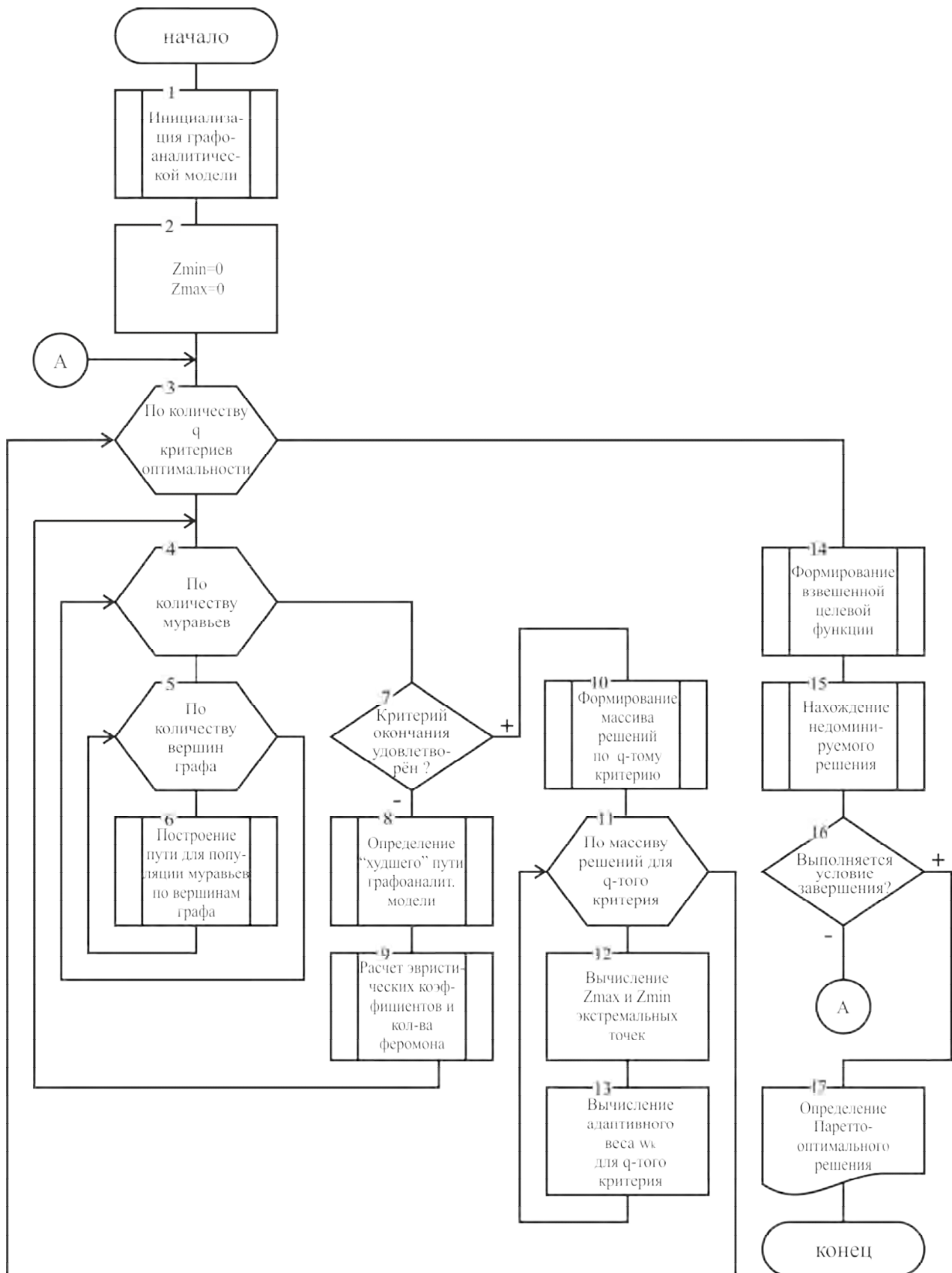


Рисунок 1 – «Направленный» муравьиный алгоритм с адаптивными весами

Для каждой цели на основе выбранных критериев эффективности устанавливаются средневзвешенные весовые коэффициенты значимости, которые нормируются внутри группы (6).

$$w_k^{\text{норм.}} = \frac{w_k}{\sum_{i=1}^q w_i}, \quad k = 1, 2, \dots, q. \quad (6)$$

Тогда на каждой итерации взвешенная целевая функция определяется согласно следующему выражению (7):

$$z(x) = \sum_{k=1}^q w_k^{\text{норм.}} (f_k(x) - z_k^{\text{min}}). \quad (7)$$

Все исследуемые решения Парето лежат в пространстве z и в течение процесса поиска решения каждой популяцией муравьев, гиперплоскость последовательно приближается к положительной (или отрицательной) идеальной точке. Так данный метод позволяет корректировать веса целевой функции и направляет поиск решений в нужном направлении.

Поскольку у каждого из критериев оптимальности может быть своя точность решения [9], которая достигается при различном количестве итераций (n_i), для определения n_i были проведены экспериментальные исследования и в качестве критерия останова при решении многокритериальной задачи выбирается максимальное значение из всего количества итераций по разным критериям.

Экспериментальное исследование предложенного метода

Анализируя критерии эффективности, можно выделить ряд целей, пригодных для исследования многокритериальной задачи планирования загрузки технологического оборудования. Критерии отбирались исходя из того, чтобы цели оптимизации не противоречили друг другу, оптимизация проводилась в одном направлении (минимизация или максимизация), а также исходя из требований реальной производственной ситуации. На основании выше изложенного, были отобраны следующие комбинации критериев эффективности:

- 1) минимизировать нарушение крайних сроков изготовления заказа при минимальной длительности цикла изготовления деталей;
- 2) минимизировать нарушение крайних сроков изготовления заказа при минимизации времени переналадок оборудования;
- 3) минимизировать длительность изготовления деталей при минимизации времени переналадок оборудования;
- 4) минимизировать нарушение крайних сроков изготовления заказа при минимальной длительности цикла изготовления деталей и времени переналадок оборудования.

Поскольку оптимизация происходит по двум критериям, то возможна ситуация, когда существует более одного решения, называемых Парето-фронт. Поэтому в реальной производственной ситуации довольно актуальным становится вопрос о выявлении одного «хорошего» решения в достаточно короткие сроки. В связи с этим необходимо для каждого определённого производственного участка на стадии отладки алгоритма экспериментально подбирать все управляющие параметры. Экспериментально было выявлено, что при производственной программе на месяц, включающей 3 наименования деталей в общем количестве примерно 200 шт., максимальное число итераций, необходимое для получения субоптимального по Парето решения составляет $n_i=100$.

На рисунке 2 приведен результат для I варианта многокритериальной задачи оптимизации, с применением «направленного» муравьиного алгоритма.

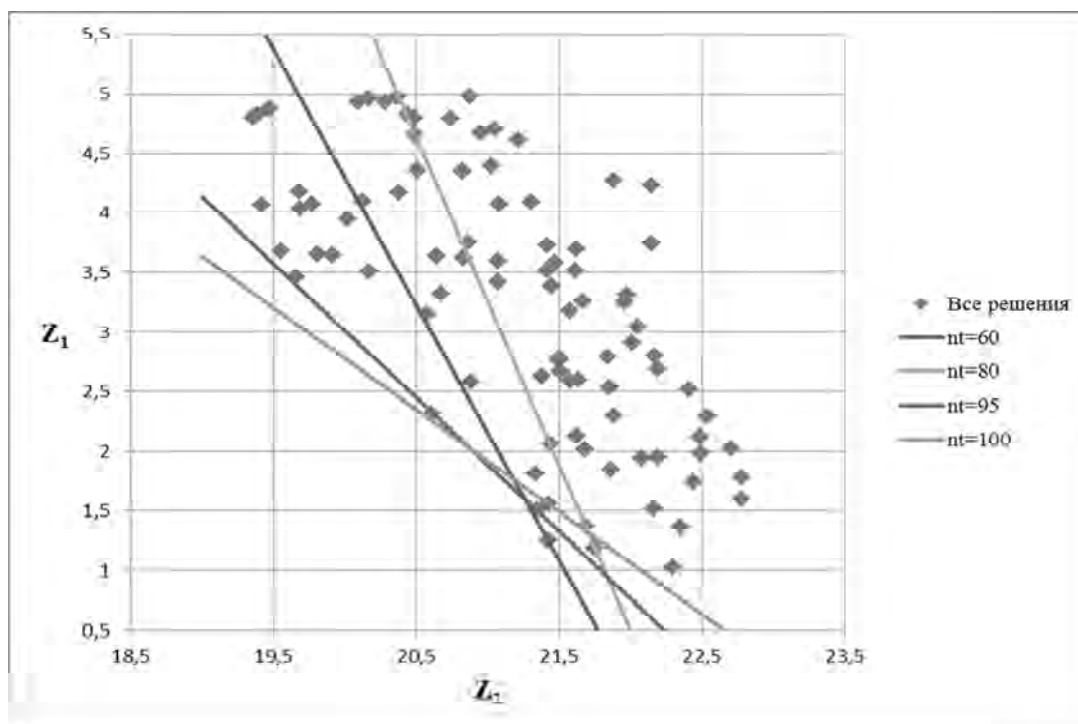


Рисунок 2 – Результат Парето-оптимизации двухкритериальной задачи

Для большей наглядности представленная задача отображена в пространстве критериев в порядке приближения решения к Парето-оптимальному. Жирными точками обозначены все доминируемые точки, получаемые в процессе работы алгоритма. Прямыми отмечено последовательное приближение адаптивной линии к недоминируемым решениям исходя из количества популяций муравьёв. Точкой условного минимума, то есть решением рассматриваемой задачи, является нижняя точка пересечения допустимой области с адаптивной прямой, построенной на заданном количестве итераций.

Аналогичные действия были проведены и для других вариантов выбора критериев, включая и трехкритериальную задачу. Результаты решения предложенных тестовых заданий позволяют сделать вывод об успешности выполненной модификации метода муравьиных колоний и концепции доминирования Парето – точки расположены практически равномерно и по всему множеству критериев, адаптивная прямая последовательно движется к недоминируемым точкам, приближаясь таким образом к Парето-оптимальному решению.

Выводы

С целью учёта нескольких факторов, влияющих на планирование производства, проведено исследование многокритериальной задачи. Вследствие чего установлено, что для обеспечения высокой эффективности функционирования участка механообработки целесообразно формирование производственного расписания с применением метода Парето-оптимизации, основанного на «направленном» муравьином алгоритме с адаптивными весами, который позволяет перебирать все пространство решений для каждой популяции муравьёв и выбирать из них варианты, оптимальные в смысле Парето.

Экспериментальное исследование предложенного метода позволило утверждать, что при введении дополнительных критериев эффективности, задача выбора субоптимальных решений значительно усложняется, однако эффективность методов существенно не снижается. Так по различным критериям эффективности расхождения результатов однокритериальной и двухкритериальной задач находятся в пределах 1÷3%, а однокритериальной и трехкритериальной задач – в пределах 6÷8,5%, что является допустимым.

Список использованной литературы

1. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин.- М.: Физматлит, - 2005.- 176 с.
2. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач.- М.: Физматлит, 2007.- 256 с.
3. Zitzler E. Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results / Zitzler E., Deb K., Thiele L. // *Evolutionary Computation*, - 2000, Vol. 8(2), pp. 173-195.
4. Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms / Deb K. - Chichester, UK: Wiley, -2001, P. 518.
5. Mostaghim S. Strategies for Finding Good Local Guides in Multi-objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) / Mostaghim S., Teich J. // In: *Swarm Intelligence Symposium, 2003. SIS '03. Proceedings of the*. - 2003, pp. 26 – 33.
6. Ченгар О.В. Аналіз методів, моделей, алгоритмів оперативного планування роботи виробничої ділянки / О.В. Ченгар, Ю.О. Скобцов, О.І. Секірін // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Донецьк, 2010. – Випуск 18(169). – С.133-140.
7. Ченгарь О.В. Оптимизация работы производственного участка машиностроительного предприятия на основе метода муравьиных колоний / Ю.А. Скобцов, О.В. Ченгарь // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. - №31. – С. 177-183.
8. Ченгарь О.В. Разработка «направленного» муравьиного алгоритма для оптимизации производственного расписания / О.В. Ченгарь // Вестник Херсонского национального технического университета, ISBN 5-7763-2514-5 – г. Херсон, 2013 - №1(46), С. 212-217.
9. Ченгарь О.В. Имитационный алгоритм моделирования организационно-технологических процессов в гибкой производственной системе / О.В. Ченгарь // Известия южного федерального университета. Технические науки Издательство: Технологический институт Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Южный федеральный университет", ISSN: 1999-9429 – г. Таганрог, 2013 – № 4.
10. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: Учебное пособие для ВУЗов / И.М.Соболев, Р.Б. Статников - М.: Дрофа, - 2006.- 175 с.

References

1. Nogin, V.D. (2005), *Prinyatie resheniy v mnogokriterialnoy srede: kolichestvenniy podhod* [Multicriteria solution making environment: a quantitative approach], Fizmalit, Moscow, Russia.
2. Polinovsciy, V.V and Nogin, V.D. (2007), *Pareto-optimalnie resheniya mnogokriterialnih zadach*, [Pareto-optimal solutions of multiobjective problems], Fizmalit, Moscow, Russia.
3. Zitzler, E., Deb, K. and Thiele, L. (2000), “Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results”, *Evolutionary Computation*, vol. 8(2), pp. 173-195.
4. Deb, K. (2001), *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, Chichester, Wiley, UK.
5. Mostaghim, S. and Teich, J. (2003), “Strategies for Finding Good Local Guides in Multi-objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)”, *In: Swarm Intelligence Symposium, SIS '03, Proceedings of the*, pp. 26 – 33.
6. Chengar, O.V., Skobtsov, Y.A. and Sekirin, A.I. (2010), “Analysis of methods, models, algorithms of operational planning of work of an industrial site”, *Naukovi praci DonNTU. Seriya: Obchislyvalna tehnica ta avtomatizaciya*, no. 18(169), pp. 133-140.

7. Chengar, O.V. and Skobtsov, Y.A. (2010), "Machine-building enterprise production work area optimization on the basis of ant colony method", *Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu HPI. Tematicniy vipusk: Informatica i modelyvannya*, no. 31, pp. 177-183.
8. Chengar, O.V. (2013), "Development of "directional" ant algorithm to optimize the production schedule", *Bulletin Kherson national technical university*, no. 1(46), pp. 212-217.
9. Chengar, O.V. (2013), "The imitating algorithm of modeling of organizational-technological processes in a flexible production system", *Izvestiya ujnogo federalnogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, no 4, pp. 128-134.
10. Sobol, I.M. and Statnikov, R.B. (2006), *Vibor optimalnich parametrov v zadachah so mnogimi kriteriyami: Uchebnoe posobie dlya VUZov* [Choice of optimal parameters in problems with many criteria: Textbook for High Schools], Drofa, Moscow, Russia.

Надійшла до редакції:
05.05.2014 р.

Рецензент:
докт. техн. наук, проф. Скобцов Ю.О.

О.В. Ченгар

ДВНЗ «Донецкий национальный технический университет»

Метод Парето-оптимізації виробничого розкладу на основі «спрямованого» мурашиного алгоритму. У статті розглянуті питання формування розкладу завантаження технологічного обладнання машинобудівного підприємства, яке є результатом рішення багатокритеріальної задачі, що заснована на концепції домінування Парето стосовно до методу мурашиних колоній, з метою врахування декількох факторів, що впливають на планування виробництва, і для забезпечення високої ефективності функціонування ділянки механообробки.

Ключові слова: багатокритеріальна оптимізація, простір критеріїв, доміновані й недоміновані рішення, фронт Парето, зважена сума критеріїв, «спрямований» мурашиний алгоритм.

O.V. Chengar

Donetsk National Technical University

Pareto-optimization technique for the production scheduling based on the "directed" ant algorithm. The article describes creating of the schedule of equipment loading process at engineering enterprise that is the result of solving the multicriterion task, based on the Pareto concept of dominance as applied to the ant colonies technique. This concept is used to account for several factors that affect the production planning and to ensure high efficiency of the machining section.

Key words: multicriterion optimization, criteria space, dominated and non-dominated solutions, Pareto front, weighted sum of criteria, "directed" ant algorithm.



Ченгарь Ольга Васильевна, Украина, закончила Донецкий государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина). Основное направление научной деятельности – методы оптимизации производственного расписания, основанные на направлении Natural Computing (Природные вычисления).