

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА, УЧАСТВУЮЩЕГО В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССЕ КРУПНЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

OPTIMIZATION OF AUTOMOTIVE TRANSPORT MOVEMENTS INVOLVED IN THE PRODUCTION PROCESS OF LARGE MACHINE-BUILDING ENTERPRISES

П.С. РОМАНОВ¹, д.т.н.
И.П. РОМАНОВА², к.т.н.

¹ Коломенский институт (филиал) ФГБОУ ВО
«Московский политехнический университет»
(г. Коломна), romanov_p_s@mail.ru
² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
московский государственный строительный
университет» (НИУ МГСУ) (г. Москва), irom84@mail.ru

P.S. ROMANOV¹, DSc in Engineering
I.P. ROMANOVA², PhD in Engineering

¹ The branch in Kolomna of Moscow Polytechnic University,
Kolomna, Russia, romanov_p_s@mail.ru
² National Research Moscow State University
of Civil Engineering, Moscow, Russia, irom84@mail.ru

В статье рассматривается подход к оптимизации перемещений автомобильного транспорта для транспортировки заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий между цехами и складами крупных машиностроительных предприятий. Для нормального функционирования производственного процесса нужна развитая система транспортирования и хранения заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий. На крупных предприятиях цеха складские помещения часто значительно разнесены в пространстве, и для транспортировки заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий на них используют автомобильную технику.

Время на перемещение заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий между цехами и складами на предприятии является бесполезно затраченным и увеличивает себестоимость выпускаемой продукции. Поэтому оптимизация перемещений автомобильного транспорта при перевозках заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий между цехами и складами позволит сократить время технологических процессов изготовления изделий, выпускаемых машиностроительным предприятием, а следовательно, оптимизировать его производственный процесс. Таким образом, поиск оптимального маршрута перемещения автомобильного транспорта по территории предприятия является весьма актуальной задачей.

Задача нахождения оптимального маршрута относится к области комбинаторной оптимизации, а также рассматривается в теории исследования операций и известна под общим названием как «задача коммивояжера». Задача коммивояжера относится к числу трансвычислительных. Все эффективные (сокращающие полный перебор) методы решения задачи коммивояжера являются эвристическими. В большинстве эвристических методов находится не самый эффективный маршрут, а его приближенное решение – базовый маршрут. На следующем этапе это приближенное решение улучшают.

В статье приводятся результаты сравнительного анализа ряда методов (алгоритмов) решения задачи коммивояжера, на основе которого для решения задачи оптимизации перемещений автомобильного транспорта крупных машиностроительных предприятий предлагается использовать либо алгоритм Литтла либо алгоритм муравьиных колоний. Дается постановка задачи оптимизации перемещений автомобильного транспорта при участии его в производственном процессе крупных машиностроительных предприятий, предлагается процедура расчетов при решении задачи – пример решения конкретной задачи с помощью разработанных процедуры расчета и компьютерной программы «Задача коммивояжера» (разработана на языке Паскаль в программной среде Delphi 7).

Предлагаемый подход к решению задачи оптимизации перемещений автомобильного транспорта при участии его в производственном процессе крупных машиностроительных предприятий позволяет сократить время на транспортировку заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий между цехами и складами предприятий, т.е. сократить время на вспомогательные операции и, как следствие, повысить производительность и снизить себестоимость выпускаемой продукции. Кроме того, сокращение маршрута перемещений автомобильного транспорта снижает эксплуатационные затраты на содержание автомобилей.

Ключевые слова: производственный процесс; машиностроительное предприятие; задача коммивояжера; выбор алгоритма решения задачи коммивояжера; определение оптимального маршрута перемещения автомобильного транспорта.

The paper considers approach to optimization of automotive transport movements for transportation of billets, semi-finished and finished goods between shop floors and warehouses of large machine-building enterprises. For the normal functioning of the production process a developed system of transportation and storage of billets, semi-finished and finished goods is needed. In large enterprises shop floors and warehouses are usually significantly separated in space and for transportation of billets, semi-finished and finished goods the automotive transport is used.

Time needed to move of billets, semi-finished and finished goods between shop floors and warehouses in the enterprise is useless and increases production costs. Therefore, optimization of the movements of automotive transport when moving billets, semi-finished and finished goods between shop floors and warehouses will reduce the time of technological processes for products manufacturing produced by the machine building enterprise, and thus to optimize the production process. Thus, the search for the optimal route movement of automotive transport on the territory of the enterprise is a very important task.

The problem of finding the optimal route is in the field of combinatorial optimization, as well as considered in the theory of operations research and is known under the general name as "traveling salesman problem". Traveling salesman problem is one of the transcomputational. All effective (reducing the exhaustive search) methods for solving the traveling salesman problem are heuristic. In most of heuristic methods not the most efficient route is obtained, and its approximate solution is a basic route. The next step is to improve the approximate solution.

The article presents the results of a comparative analysis of a number of methods (algorithms) for solving the traveling salesman problem on the basis of which to solve the problem of optimization of automotive transport of large machine-building enterprises is proposed to use either the Little algorithm or ant colony algorithm. The statement of the problem of optimization of automotive transport movement during its work for manufacturing process of large machine-building enterprises is given, the procedure of calculations to solve the problem is shown, an example of solving a particular problem with the help of the developed "traveling salesman problem" procedure of calculation and the computer program (developed on Pascal in Delphi 7).

The proposed approach to solving the problem of optimizing automotive transport movements during its work in the production process of large machine-building enterprises can reduce the time for transportation of billets, semi-finished and finished goods between shop floors and warehouses, which means that it is possible to reduce the time of subsidiary operations, and as a consequence, increase productivity and reduce production costs. In addition, the reduction of the displacement route of automotive transport reduces the operating costs of automobiles maintenance.

Keywords: manufacturing process, machine-building enterprise, traveling salesman problem, selection of algorithm for solving the traveling salesman problem, determining the optimal route for automotive transport movements.

Введение

Как известно [1–4], производственный процесс – это регламентированное взаимодействие потоков материалов, энергии и информации в целях производства материальной продукции. Определяющую роль играют потоки основных и вспомогательных материалов, их движение и преобразование; потоки энергии и информации обеспечивают эти процессы, делают их возможными. Все взаимодействия в рамках производственного процесса являются технологическими.

Для нормального функционирования производственного процесса нужна развитая система транспортирования и хранения заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий. Хотя для транспортировки заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий между цехами и складами чаще применяют различного рода конвейеры, на крупных предприятиях цеха и складские помещения часто значительно разнесены в пространстве, и для транспортировки заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий на них используют автомобильную технику [3, 4].

Как отмечается [3], любое время функционирования, когда технологический процесс прерывается, является бесполезно затраченным,

потерянным для основного функционального назначения. Поэтому время на перемещение заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий между цехами и складами на предприятии является бесполезно затраченным и увеличивает себестоимость выпускаемой продукции.

Кроме того правильный выбор средств транспортирования, загрузки, накопления и складирования изделий непосредственно влияет на надежность, производительность и эксплуатационные затраты производственных систем. [5].

Но не всегда возможно отказаться от использования автомобильной техники в производственном процессе, в частности для транспортировки заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий между цехами и складами. Так, например, у ОАО ХК «Коломенский завод» площадь территории производственной зоны составляет 124 га. Производственный комплекс состоит из металлургического, заготовительного, сварочно-сборочного, механосборочного производств. На территории завода расположено 28 цехов основного производства и 15 цехов вспомогательного производства (некоторые из них размещены на значительных расстояниях один от другого). Автотранспорт-

ный цех является вспомогательным цехом машиностроительного предприятия и выполняет следующие вспомогательные функции:

- перевозка людей по объектам предприятия и по производственным заданиям, доставка персонала к рабочим местам;
- перевозка материалов для нужд различных цехов предприятия по его территории, а также перевозка отработанного материала в цеха переработки и переплавки;
- перевозка готовых изделий предприятия к местам назначений (складам, площадкам для хранения и т.п.) и др. [6].

При невозможности отказаться от использования автомобилей в движении материальных потоков во внутрипроизводственных логистических системах, как указывается в [7], необходимо оптимизировать работу технологического транспорта (в данном случае автомобильного).

Постановка задачи

Оптимизация перемещений автомобильного транспорта при перевозках заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий между цехами и складами позволит сократить время технологических процессов изготовления изделий, выпускаемых машиностроительным предприятием, а следовательно, оптимизировать его производственный процесс. Таким образом, поиск оптимального маршрута перемещения автомобильного транспорта по территории предприятия является весьма актуальной задачей.

Для решения этой задачи необходимо сократить время на перемещения автомобильного транспорта между цехами, между цехами и складами и т.п.

Задача нахождения оптимального маршрута относится к области комбинаторной оптимизации, а также рассматривается в теории исследования операций и известна под общим названием как «задача коммивояжера» [8–15].

В «классической» формулировке задачи коммивояжера пытаются определить кратчайший маршрут для одноразового посещения n городов. Как указывается в [9, 11, 15], эта задача является задачей о назначениях с дополнительными ограничениями, которые гарантируют исключение из оптимального решения неполных замкнутых маршрутов. В задаче коммивояжера замкнутый маршрут, проходящий через каждый пункт только один раз,

называется циклом; цикл, проходящий через все пункты, называется полным, в противном случае – частичным или подциклом.

Постановка задачи следующая [11]. Коммивояжер должен выйти из первого города, посетить по одному разу в неизвестном порядке города 2, 3, 4, ..., n и вернуться в первый город. Расстояния между городами известны. Требуется определить порядок обхода городов, чтобы замкнутый путь (тур) коммивояжера был кратчайшим.

Если города перенумерованы числами $j \in T = (1, 2, 3, \dots, n)$, то тур коммивояжера может быть описан циклической перестановкой $t = (j_1, j_2, \dots, j_n)$, причем все j_1, \dots, j_n – разные номера; повторяющийся в начале и в конце j_1 , показывает, что перестановка замкнута. Расстояния между парами вершин C_{ij} образуют матрицу $\|C\|$. Задача состоит в том, чтобы найти такой тур t , чтобы минимизировать функционал:

$$L = L(t) = \sum_{k=1}^n C_{j_k j_{k+1}} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Относительно математической формулировки задачи необходимо знать следующее:

В постановке C_{ij} означали расстояния, поэтому они должны быть неотрицательными, т.е. для всех:

$$j \in T : C_{ij} \geq 0; C_{ij} = \infty \quad (2)$$

(последнее равенство означает запрет на петли в туре), симметричными, т.е. для всех i, j :

$$C_{ij} = C_{ji} \quad (3)$$

и удовлетворять неравенству треугольника, т.е. для всех:

$$C_{ij} + C_{jk} = C_{ik}. \quad (4)$$

В математической постановке говорится о произвольной матрице. Сделано это потому, что имеется много прикладных задач, которые описываются основной моделью, но всем условиям (2)–(4) не удовлетворяют. Особенно часто нарушается условие (3) (например, если C_{ij} – не расстояние, а плата за проезд: часто туда билет стоит одну цену, а обратно – другую). Поэтому различают два варианта задачи: симметричную задачу, когда условие (3) выполнено, и несимметричную – в противном случае. Условия (2)–(4) по умолчанию считают выполненными.

Второе замечание касается числа всех возможных туров. В несимметричной задаче все

туры $t = (j_1, j_2, \dots, j_n)$ и $t' = (j_1, j_n, \dots, j_2, j_1)$ имеют разную длину и должны учитываться оба. Разных туров тогда будет $(n-1)!$.

Общая постановка задачи и большинство ее частных случаев, относится к классу *NP*-сложных задач (от англ. non-deterministic polynomial). Поэтому алгоритмы решения этой задачи делятся на точные и приближенные [8–11, 16, 17].

Все точные алгоритмы фактически представляют собой оптимизированный полный перебор вариантов. В некоторых случаях эти алгоритмы достаточно быстро находят решения, но в общем случае приходится перебирать все $n!$ циклов.

Задача коммивояжера относится к числу трансвычислительных: уже при относительно небольшом числе городов (66 и более) она не может быть решена методом перебора вариантов никакими теоретически мыслимыми компьютерами за время, меньшее нескольких миллиардов лет [8–11, 16, 17].

Все эффективные (сокращающие полный перебор) методы решения задачи коммивояжера – методы эвристические. В большинстве эвристических методов находится не самый эффективный маршрут, а его приближенное решение – базовый маршрут. На следующем этапе это приближенное решение улучшают.

Для решения задачи коммивояжера используют различные группы простейших методов: полный и случайный перебор (метод Монте-Карло), жадный, деревянный алгоритмы, метод ближайшего соседа, метод включения ближайшего города, метод самого дешевого включения, метод минимального остовного дерева. К приближенным алгоритмам решения задачи, широко применяющимся в практике решения инженерных задач, относятся: генетический, метод имитации отжига, Прима-Эйлера, «иди в ближний» (модифицированный жадный алгоритм) [11, 16, 17].

Также получили распространение различные модификации более эффективных методов, таких как метод ветвей и границ (метод Литтла), модифицированный метод Литтла, метод генетических алгоритмов, а также алгоритм муравьиных колоний [10, 11, 16–18].

К методам улучшения базового маршрута можно отнести: метод перестановок; метод разворота петель; комбинированный метод [15].

В [11] был проведен сравнительный анализ: простейших методов (жадного, деревянно-

го алгоритмов и метод случайного перебора (метод Монте-Карло); методов улучшения базисных маршрутов, полученных на основе простейших методов (перестановок, разворота петель, комбинированного); приближенных алгоритмов (генетического, метода имитации отжига, Прима-Эйлера, модифицированного жадного алгоритма); алгоритма на основе метода ветвей и границ (Литтла) и алгоритма муравьиных колоний.

Для проведения сравнительного анализа и последующего выбора наиболее эффективного метода для решения задачи коммивояжера в [11] был разработан алгоритм и программа на языке Паскаль в программной среде Delphi 7. Программа проводит решение задачи коммивояжера на основе следующих методов и алгоритмов: жадного, жадного модифицированного, деревянного, Монте-Карло, муравьиных колоний, Литтла. При этом маршрут может быть рассчитан не менее чем для 100 вершин (точек) маршрута, но при наличии соответствующих вычислительных ресурсов. Реально на практике не требуется осуществлять обход более 40 точек маршрута, поэтому для анализа расчеты проводились именно для 40 точек. Оценка временных параметров работы алгоритмов проводилась на персональном компьютере Intel Core i5-3470 3.2GHz с ОЗУ 4Gb и с операционной системой Windows 8.1 (x64). Результаты моделирования на основе созданной программы приведены на рисунке 1.

Лучший результат показал алгоритм Литтла. При малом количестве вершин (до 15) он входит в число лучших, а при дальнейшем увеличении количества вершин выходит на первое место, но требует больше вычислительных ресурсов, чем другие алгоритмы. Алгоритм муравьиных колоний также входит в число лучших алгоритмов. Модификация жадного алгоритма оказалась в среднем на 37 % лучше жадного алгоритма, но при этом выполняется в несколько раз дольше. Алгоритм Монте-Карло показал худшие результаты, поэтому использовать его на практике не рекомендуется.

Время, затрачиваемое на выполнение решения по жадному алгоритму, близко к нулю, поэтому и время расчетов по жадному модифицированному алгоритму также очень мало. Время, затрачиваемое на решение задачи коммивояжера на основе алгоритмов: Монте-Карло, деревянного, жадного и жадного модифицированного, примерно одинаково.

Результаты работы алгоритмов

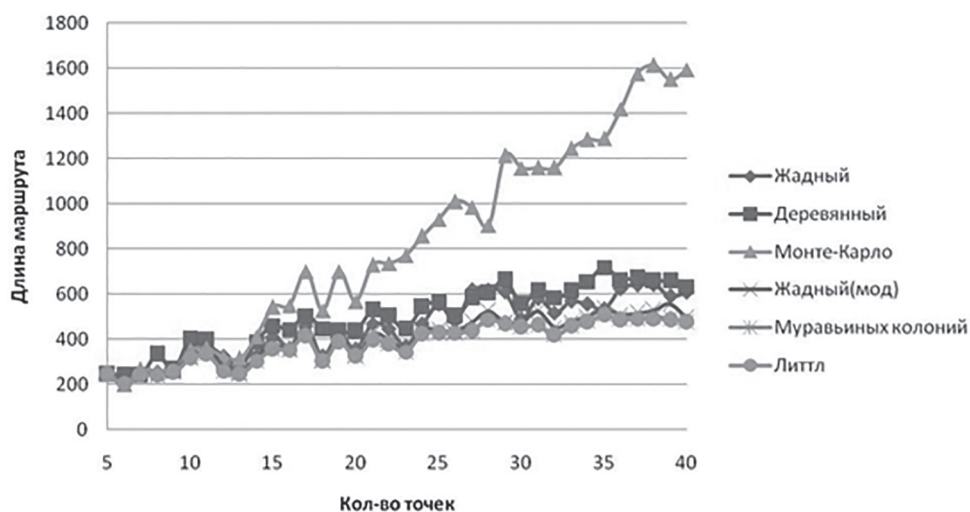


Рис. 1. Результаты моделирования работы алгоритмов

При этом время на решение задачи с помощью алгоритмов Литтла и муравьиных колоний значительно больше по сравнению со временем расчета уже перечисленных алгоритмов; в частности по алгоритму муравьиных колоний для 40 вершин оно составляет почти 0,023 с. Но по сути дела эти временные показатели также незначительные, т.к. не превышают даже 1 с. Поэтому, если количество вершин (точек) маршрута невелико (менее 15) и вычислительные мощности ограничены и оптимальность решения не очень критична, то рекомендуется использовать модифицированную версию жадного алгоритма. В том случае когда, вычислительные ресурсы не ограничены, количество вершин (точек, которые необходимо пройти при выполнении маршрута) значительно (выше 15), то для решения задачи лучше использовать алгоритм Литтла или алгоритм муравьиных колоний.

Кроме того, применение алгоритмов Литтла и муравьиных колоний не требует дальнейшего улучшения полученных с помощью этих алгоритмов маршрутов. Следовательно, для решения задачи оптимизации перемещений автомобильного транспорта при участии его в производственном процессе крупных машиностроительных предприятий необходимо использовать либо алгоритм Литтла, либо алгоритм муравьиных колоний. Кратко опишем их.

Алгоритм Литтла [18, 19], основан на методе ветвей и границ и строит дерево решений для перебора вариантов маршрута (циклов

обхода) с отсечением. Отсекаются такие частично построенные маршруты, у которых оценка снизу длины маршрута больше или равна длине ранее построенного полного наилучшего маршрута. При построении оценки снизу на каждом этапе работы алгоритма матрица расстояний подвергается такому преобразованию с трудоемкостью порядка $O(n^2)$, чтобы в каждой ее строке и каждом столбце появился хотя бы один нуль. Более точную оценку снизу можно получать, решая задачу о назначениях на матрице расстояний за время $O(n^3)$, при этом улучшается эффективность отсечений в дереве решений.

Одним из методов искусственного интеллекта является алгоритм муравьиных колоний (муравьиный алгоритм) Марко Дориго [10]. Основная идея алгоритма подсмотрена в природе и имитирует движение колонии муравьев. По форме этот алгоритм похож на жадный и в некоторой степени является его обобщением. Если в алгоритме ближайшего соседа выбор дальнейшего пути производится исходя из минимального расстояния до очередной вершины, то здесь выбором управляет случайная функция, направляющая движение от текущего положения с большей вероятностью в вершину j , в которой наибольшее значение некоторой функции (где i – номер вершины, в которой производится выбор, k – номер муравья, движущегося по дугам графа). Во время движения создается список пройденных вершин, что позволяет избежать преждевременного заикливания. В [10] при-

ведена функция, управляющая переходом из данной вершины i в вершину j :

$$P_{ij,k} = \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_m \tau_{im}^\alpha \eta_{im}^\beta}, \quad (5)$$

где τ_{ij} – количество феромона (pheromon), оставленного муравьями на дуге $[i, j]$; η_{ij} – величина, обратная весу (длине) дуги $[i, j]$; α, β – эмпирические коэффициенты. Функция $P_{ij,k}$ подсказывает муравью номер вершины j , в которую он должен направиться. В знаменателе стоит нормирующий коэффициент – такой, что $0 \leq P_{ij,k} \leq 1$. Индекс m в сумме пробегает по всем непройденным вершинам, смежным с i .

В реальности муравей оставляет след (феромон) во время прохождения пути, и чем чаще он возвращается в исходную точку (а это возможно, если он выбирает оптимальные пути), тем четче след. В математической же модели функция τ_{ij} увеличивается только по завершении маршрута на величину, обратно пропорциональную длине маршрута. При $\alpha = 0$ алгоритм совпадает с жадным алгоритмом – муравей руководствуется только длиной пути. При $\beta = 0$ основой для выбора пути является только опыт (количество феромона, или «глубина следа») предыдущих муравьев-исследователей. Важно отметить еще одно отличие от жадного алгоритма. Выбор пути производится не по максимуму функции $P_{ij,k}$, а случайным образом, но на случай, конечно, влияет значение $P_{ij,k}$.

Приведем постановку задачи оптимизации перемещений автомобильного транспорта при участии его в производственном процессе крупных машиностроительных предприятий.

Постановка задачи. Автомобилю для обеспечения технологических процессов изготовления изделий требуется перевезти заготовки (полуфабрикаты), последовательно заезжая в различные цехи предприятия. Он должен начать работу со склада, затем заехать по одному разу в n цехов в любом порядке и вернуться на склад. Координаты цехов (расстояния между ними) известны. Требуется определить порядок объезда цехов, чтобы замкнутый маршрут перемещения автомобиля по территории предприятия был кратчайшим.

Математическая постановка задачи описывается формулами (1)–(4).

Предлагаемая процедура расчетов включает следующие шаги решения задачи.

Ввод исходных данных в виде координат цехов и склада.

Выбор метода (алгоритма) решения задачи.

Определение маршрута с помощью выбранного метода и расчет длины маршрута.

Вывод схемы маршрута.

Построение графика результатов моделирования.

Результаты

В качестве примера рассмотрен случай транспортировки автомобилем заготовок для 11 цехов ОАО ХК «Коломенский завод» со склада заготовок и полуфабрикатов ($n = 1$ – начало маршрута). Координаты всех цехов и склада известны, что позволяет разработанной программе «Задача коммивояжера» вычислить матрицу расстояний между ними. Требуется определить кратчайший маршрут для перемещения автомобиля.

При расчетах использовалась разработанная на языке Паскаль в программной среде Delphi 7 компьютерная программа «Задача коммивояжера».

В результате расчетов с помощью алгоритма Литтла получен следующий кратчайший маршрут: 1–3–5–6–7–11–12–10–8–9–4–2–1; длина маршрута – 3024 м.

Как указывалось ранее, применение алгоритма Литтла не требует дальнейшего улучшения маршрута. Схема маршрута, полученная на основе алгоритма Литтла, представлена на рисунке 2. При этом общая протяженность маршрута составила около 3024 м.

Заключение

На основе методов жадного, жадного модифицированного, деревянного, Монте-Карло, муравьиных колоний, Литтла разработаны алгоритм и компьютерная программа «Задача коммивояжера» для решения задачи оптимизации перемещений автомобильного транспорта при участии его в производственном процессе крупных машиностроительных предприятий. При этом для решения указанной задачи рекомендуется использовать алгоритм Литтла или алгоритм муравьиных колоний.

Предлагаемый подход к решению задачи оптимизации перемещений автомобильного транспорта при участии его в производственном процессе крупных машиностроительных предприятий позволяет сократить время на транспортировку заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий между цехами и складами предприятий, т.е. сократить время на вспомога-

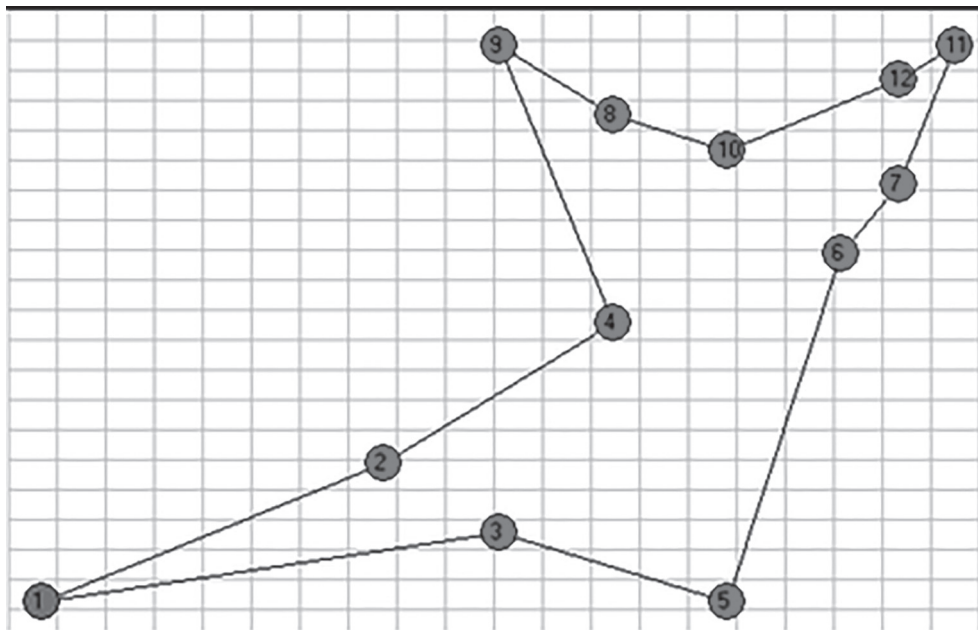


Рис. 2. Схема маршрута, полученная на основе алгоритма Литтла

тельные операции, и, как следствие, повысить производительность и снизить себестоимость выпускаемой продукции. Кроме того, сокращение маршрута перемещений автомобильного транспорта снижает эксплуатационные затраты на содержание автомобилей (снижение расхода топливно-смазочных материалов, уменьшение пробега автомобиля за смену и т.п.).

Литература

1. Схиртладзе А.Г., Воронов В.Н., Борискин В.П. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник / А.Г. Схиртладзе, В.Н. Воронов, В. П. Борискин. Старый Оскол: ТНТ. 2013. 600 с.
2. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: Учеб. пособие / Под ред. Н.М. Капустина. М.: Машиностроение. 2007.
3. Волчкевич Л.И. Автоматизация производственных процессов: Учеб. пособие. М.: Машиностроение. 2005. 380 с.
4. Романов П.С. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. Часть 1. Производственные процессы и их автоматизация. Учебное пособие. Коломна: КИ (ф) МГМУ (МАМИ). 2014. 118 с.
5. Романов П.С. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. Часть 3. Проектирование автоматизированных процессов изготовления деталей. Комплексная автоматизация. Учебное пособие. Коломна: КИ (ф) МГОУ. 2009. 152 с.
6. Сайт <http://www.kolomnadiesel.com/about/production>.
7. Логистика и управление цепями поставок. Теория и практика. Основы логистики: учебник / под ред. Б. А. Аникина и Т. А. Родкиной. М.: Проспект. 2013. 344 с.
8. Маркова Е.В., Лисенков А.Н. Комбинаторные планы в задачах многофакторного эксперимента. М.: Наука. 1979. 345 с.
9. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций, 7-е издание: Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс". 2005. 912 с.
10. М. Тим Джонс. Программирование искусственного интеллекта в приложениях. М.: ДМК Пресс. 2004. 312 с.
11. Романов П.С., Романова И.П., Каменский И.А. Выбор метода решения задачи коммивояжера для определения оптимальной траектории перемещения инструмента // Комплексные проблемы развития науки, образования и экономики региона: Научно-практический журнал Коломенского института (филиала) МГМУ (МАМИ). 2014. № 2(5). С. 71–81.
12. Романова И.П., Романов П.С. Математическое моделирование процессов в машиностроении. Часть 1. Математические модели и методы в машиностроении: учебное пособие / И.П. Романова, П.С. Романов; под общ. ред. Романова П.С. Коломна: КИ (ф) МГМУ (МАМИ). 2014. 124 с.
13. Романова И.П., Романов П.С. Математическое моделирование процессов в машиностроении. Часть 2. Оптимизационные методы в машиностроении: учебное пособие / И.П. Романова, П.С.

Романов; под общ. ред. Романова П.С. Коломна: КИ (ф) МГМУ (МАМИ). 2015. 64 с.

14. Романов П.С., Романова И.П. Математическое моделирование процессов в машиностроении. Часть 1. Математические модели и методы в машиностроении: учебное пособие (лабораторный практикум) / П.С. Романов, И.П. Романова; под общ. ред. Романова П.С. Коломна: КИ (ф) МГМУ (МАМИ). 2015. 54 с.
15. Романов П.С., Романова И.П. Математическое моделирование процессов в машиностроении. Часть 2. Оптимизационные методы в машиностроении: учебное пособие (лабораторный практикум) / П.С. Романов, И.П. Романова; под общ. ред. Романова П.С. Коломна: КИ (ф) МГМУ (МАМИ). 2015. 136 с.
16. Кафиев И.Р., Романов П.С., Романова И.П. Определение оптимального маршрута перемещения группы эксплуатации и ремонта при проведении планового осмотра трансформаторных подстанций в сельской местности // В сборнике: «Актуальные проблемы экономики труда в сельском хозяйстве». Материалы международной научно-практической конференции. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Башкирский государственный аграрный университет, Кафедра организации и менеджмента; редкол.: А.Р. Кузнецова, В.А. Ковшов. 2014. С. 186–199.
17. Кафиев И.Р., Романов П.С., Романова И.П. Определение оптимального маршрута перемещения группы эксплуатации и ремонта при проведении планового осмотра трансформаторных подстанций в сельской местности // Российский электронный научный журнал. 2014. № 8. С. 54–66.
18. Рейнгольд Э., Нивергельт Ю., Део Н. Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика: пер. с англ. М.: Мир. 1980. 478 с.
19. Little J. D. C., Murty K. G., Sweeney D. W., and Karel C. An algorithm for the Traveling Salesman Problem // Operations Research. 1963. No 11, pp. 972–989.
20. Romanov P.S., Romanova I.P. Matematicheskoe modelirovaniye protsessov v mashinostroenii [Automation of manufacturing processes in mechanical engineering]. Staryy Oskol. TNT Publ. 2013. 600 p.
21. Romanov P.S., Romanova I.P. Matematicheskoe modelirovaniye protsessov v mashinostroenii. Chast' 1. Matematicheskie modeli i metody v mashinostroenii [Automation of manufacturing processes in mechanical engineering. Part 1. Mathematical models and methods in mechanical engineering]. Kolomna. KI (f) MGOU (MAMI) Publ. 2014. 118 p.
22. Romanov P.S., Romanova I.P. Matematicheskoe modelirovaniye protsessov v mashinostroenii. Chast' 2. Matematicheskie modeli i metody v mashinostroenii [Automation of manufacturing processes in mechanical engineering. Part 2. Mathematical models and methods in mechanical engineering]. Kolomna. KI (f) MGOU (MAMI) Publ. 2014. 118 p.
23. Romanov P.S., Romanova I.P. Matematicheskoe modelirovaniye protsessov v mashinostroenii. Chast' 3. Proektirovaniye avtomatizirovannykh protsessov izgotovleniya detaley. Kompleksnaya avtomatizatsiya [Automation of manufacturing processes in industry. Part 3: Design of automated processes of manufacturing parts. Integrated automation. Textbook]. Kolomna. KI (f) MGOU Publ. 2009. 152 p.
24. <http://www.kolomnadiesel.com/about/production>.
25. Logistika i upravlenie tsepyami postavok. Teoriya i praktika. Osnovy logistiki [Logistics and Supply Chain Management. Theory and practice. Fundamentals of Logistics: Textbook]. Pod red. B.A. Anikina i T.A. Rodkinoy. Moscow. Prospekt Publ. 2013. 344 p.
26. Markova E.V., Lisenkov A.N. Kombinatornyye plany v zadachakh mnogofaktornogo eksperimenta [Combinatorial plans in multivariate experiment problems]. Moscow. Nauka Publ. 1979. 345 p.
27. Takha, Khemdi A. Vvedenie v issledovanie operatsiy [Introduction to operations research]. 7-e izdanie. Per. s angl. Moscow. Izdatel'skiy dom "Vil'yame" Publ. 2005. 912 p.
28. Tim Dzhons. Programmirovaniye iskusstvennogo intellekta v prilozheniyakh [Programming artificial intellect in applications]. Moscow. DMK Press Publ. 2004. 312 p.
29. Romanov P.S., Romanova I.P., Kamenskiy I.A. Selecting a method for solving the traveling salesman problem to determine the optimal tool path. Kompleksnyye problemy razvitiya nauki, obrazovaniya i ekonomiki regiona. Nauchno-prakticheskiy zhurnal [Complex problems of development of science, education and economy of the region: Scientific journal] Kolomenskogo instituta (filiala) MGOU (MAMI) Publ. 2014. No 2(5), pp. 71–81.
30. Romanova I.P., Romanov P.S. Matematicheskoe modelirovaniye protsessov v mashinostroenii. Chast' 1. Matematicheskie modeli i metody v mashinostroenii [Mathematical modeling of processes in mechanical engineering. Part 1. Mathematical models and methods in mechanical engineering]. Kolomna. KI (f) MGOU (MAMI) Publ. 2014. 118 p.

References

1. Skhirtladze A.G., Voronov V.N., Boriskin V.P. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii [Automation of manufacturing processes in mechanical engineering]. Staryy Oskol. TNT Publ. 2013. 600 p.
2. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii [Automation of manufacturing processes in mechanical engineering]. Pod red. N.M. Kapustina. Moscow. Mashinostroenie Publ. 2007.
3. Volchkevich L.I. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov [Automation of manufacturing processes]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 2005. 380 p.
4. Romanov P.S. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii. Chast' 1. Proizvodstvennyye protsessy i ikh avtomatizatsiya [Automation of manufacturing processes in mechanical engineering Part 1. Manufacturing processes and its automation]. Kolomna. KI (f) MGOU (MAMI) Publ. 2014. 118 p.
5. Romanov P.S. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii. Chast' 3. Proektirovaniye avtomatizirovannykh protsessov izgotovleniya detaley. Kompleksnaya avtomatizatsiya [Automation of production processes in industry. Part 3: Design of automated processes of manufacturing parts. Integrated automation. Textbook]. Kolomna. KI (f) MGOU Publ. 2009. 152 p.
6. <http://www.kolomnadiesel.com/about/production>.
7. Logistika i upravlenie tsepyami postavok. Teoriya i praktika. Osnovy logistiki [Logistics and Supply Chain Management. Theory and practice. Fundamentals of Logistics: Textbook]. Pod red. B.A. Anikina i T.A. Rodkinoy. Moscow. Prospekt Publ. 2013. 344 p.
8. Markova E.V., Lisenkov A.N. Kombinatornyye plany v zadachakh mnogofaktornogo eksperimenta [Combinatorial plans in multivariate experiment problems]. Moscow. Nauka Publ. 1979. 345 p.
9. Takha, Khemdi A. Vvedenie v issledovanie operatsiy [Introduction to operations research]. 7-e izdanie. Per. s angl. Moscow. Izdatel'skiy dom "Vil'yame" Publ. 2005. 912 p.
10. Tim Dzhons. Programmirovaniye iskusstvennogo intellekta v prilozheniyakh [Programming artificial intellect in applications]. Moscow. DMK Press Publ. 2004. 312 p.
11. Romanov P.S., Romanova I.P., Kamenskiy I.A. Selecting a method for solving the traveling salesman problem to determine the optimal tool path. Kompleksnyye problemy razvitiya nauki, obrazovaniya i ekonomiki regiona. Nauchno-prakticheskiy zhurnal [Complex problems of development of science, education and economy of the region: Scientific journal] Kolomenskogo instituta (filiala) MGOU (MAMI) Publ. 2014. No 2(5), pp. 71–81.
12. Romanova I.P., Romanov P.S. Matematicheskoe modelirovaniye protsessov v mashinostroenii. Chast' 1. Matematicheskie modeli i metody v mashinostroenii [Mathematical modeling of processes in mechanical engineering. Part 1. Mathematical models and methods in mechanical engineering]. Kolomna. KI (f) MGOU (MAMI) Publ. 2014. 118 p.

- textbook]. Pod obshch. red. Romanova P.S. Kolomna. KI (f) MG MU (MAMI) Publ. 2014. 124 p.
13. Romanova I.P., Romanov P.S. Matematicheskoe modelirovanie protsessov v mashinostroenii. Chast' 2. Optimizatsionnye metody v mashinostroenii [Mathematical modeling of processes in mechanical engineering. Part 2. Optimization methods in engineering: textbook]. Pod obshch. red. Romanova P.S. Kolomna. KI (f) MG MU (MAMI) Publ. 2015. 64 p.
14. Romanov P.S., Romanova I.P. Matematicheskoe modelirovanie protsessov v mashinostroenii. Chast' 1. Ma-tematicheskie modeli i metody v mashinostroenii [Mathematical modeling of processes in mechanical engineering. Part 1 Mathematical models and methods in mechanical engineering: textbook]. Pod obshch. red. Romanova P.S. Kolomna. KI (f) MG MU (MAMI) Publ. 2015. 54 p.
15. Romanov P.S., Romanova I.P. Matematicheskoe modelirovanie protsessov v mashinostroenii. Chast' 2. Optimizatsionnye metody v mashinostroenii [Mathematical modeling of processes in mechanical engineering. Part 2 Optimization methods in engineering: textbook]. Pod obshch. red. Romanova P.S. Kolomna. KI (f) MG MU (MAMI) Publ. 2015. 136 p.
16. Kafiev I.R., Romanov P.S., Romanova I.P. Determining the optimal route of moving the group operation and maintenance during a scheduled inspection of transformer substations in the countryside. V sb. «Aktual'nye problemy ekonomiki truda v sel'skom khozyaystve». Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Ministerstvo sel'skogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii, Bashkirskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, Kafedra organizatsii i menedzhmenta; redkol. A.R. Kuznetsova, V.A. Kovshov [In the collection «Actual problems of agriculture labor economy.» Proceedings of the international scientific-practical conference. The Ministry of Agriculture of the Russian Federation, the Bashkir State Agrarian University, Department of Organization and Management]. 2014, pp. 186–199.
17. Kafiev I.R., Romanov P.S., Romanova I.P. Determining the optimal route of moving the group operation and maintenance during a scheduled inspection of transformer substations in the countryside.. Rossiyskiy elektronnyy nauchnyy zhurnal [Russian electronic scientific journal]. 2014. No 8, pp. 54–66.
18. Reyngol'd E., Nivergel't Yu., Deo N. Kombinatornye algoritmy. Teoriya i praktika [Combinatorial algorithms. Theory and practice]. Per. s angl. Moscow. Mir Publ. 1980. 478 p.
19. Little J.D.C., Murty K.G., Sweeney D.W., and Karel C. An algorithm for the Traveling Salesman Problem // Operations Research. 1963. No 11. pp. 972–989.