
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 517.977

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-71-78

Разработка программно-инструментальных средств для оптимизации процессов логистики производственного предприятия пищевой промышленности

Г. А. Благодатский, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

М. М. Горохов, доктор физико-математических наук, профессор,
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Д. Е. Докучаев, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В статье рассматривается автоматизация логистической деятельности производственного предприятия, занимающегося производством и доставкой пищевых продуктов. В частности, оптимизация маршрутов доставки продукции до покупателей. Для доставки изделий по городу используются малотоннажные транспортные средства. Рассматривается оптимизация маршрута транспортного средства, которое осуществляет доставку продукции до точек отгрузки, находящихся в городской черте. Особенностью маршрута является неравномерное распределение точек отгрузки на карте и ограниченные времена доставки.

Предприятие осуществляет доставку готовой продукции до магазинов ежедневно, уменьшение стоимости и времени доставки позволит повысить не только прибыль предприятия, но и удовлетворенность покупателей, потому что они смогут получать товары раньше, товары будут более свежими, что дает предприятию конкурентное преимущество. Задачи по оптимизации маршрутов доставки актуальны для всех предприятий сферы производства или торговли, имеющих в своей структуре автопарки для доставки продукции, или предприятий, для которых доставка является основным видом деятельности. Сложность поиска оптимального маршрута при составлении плана перевозок существенно возрастает с увеличением количества конечных точек доставки и их удаленности друг от друга в пределах сложной дорожной сети города. Увеличение количества покупателей увеличивает количество возможных маршрутов, среди которых отыскать оптимальный маршрут без использования методов оптимизации становится сложной задачей. В статье предложен алгоритм минимизации плана доставки продукции за счет уменьшения длины маршрута. Проводится сравнение изменений управляемой величины U с зафиксированным планом производства Q , а также с изменением плана производства Q и плана доставки $D(R)$ для анализа выгоды доставки продукции.

Ключевые слова: моделирование, бизнес-процессы, логистика, пищевая промышленность, маршрутизация, транспорт.

Введение

Объектом исследования является производственное предприятие, занимающееся производством продуктов питания: выпуск хлеба и хлебобулочных изделий в широком ассортименте. Архитектура предприятия рассматривалась ранее в работах [1, 2]. В данной статье исследуется часть бизнес-процессов предприятия, связанных с доставкой готовой продукции до покупателей. Доставка осуществляется ежедневно в соответствии с заявкой покупателей. Сроки годности готовой продукции крайне малы, в связи с чем бизнес-процессы доставки являются важным элементом функционирования предприятия. Осуществление доставки должно происходить в соответствии с заявкой покупателей и в минимальные сроки, для повышения конкурентоспособности предприятия и повы-

шения удовлетворенности покупателей. В ходе исследования было установлено, что на текущий момент построение маршрутов доставки осуществляется менеджером или водителем с опорой на собственный опыт. Менеджер формирует для водителя путевой лист, который составлен исходя из собственного опыта, на глазок. Водитель выполняет доставку в соответствии с данными путевыми листами, при этом вкладывая в маршрут свое понимание данного вопроса. В результате происходит перерасход топливных и временных ресурсов. Для устранения данных отклонений необходимо провести автоматизацию данного процесса путем решения задачи нахождения оптимального плана перевозок [3–7].

Цель работы заключается в уменьшении издержек на доставку продукции до точек отгруз-

ки. Уменьшение издержек позволит увеличить прибыль предприятия, сократив времена доставки, расходы на топливо, ремонт, обслуживание и амортизацию транспортных средств. Дополнительным требованием является использование одного транспортного средства на маршруте.

При планировании разработки программно-инструментальных средств проведено исследование предметной области [8] для построения технической системы.

Нахождение оптимального маршрута доставки

Поиск оптимального маршрута рассматривается на примере части дневного маршрута одного транспортного средства, осуществляющего доставку. На данной части маршрута водитель должен выехать на транспортном средстве с места погрузки и осуществить доставку продукции в 16 точек-получателей, после доставки продукции водитель возвращается на производство, чтобы произвести выгрузки тары для доставки. То есть на пути следования водитель должен заехать в каждую точку по одному разу, при этом объехав все точки маршрута по кратчайшему пути и вернуться на производство.

Задача решается для n магазинов на территории города Ижевск. Пусть $x_{ij} = 1$, если водитель едет из i -го магазина в j -й магазин, и $x_{ij} = 0$ в случае непосещения магазина. Введем пункт $n+1$, который будет являться местом погрузки на производстве и совпадать с пунктом, из которого начинается маршрут. Расстояние от пункта погрузки $n+1$ до любого магазина равно расстоянию от магазина до пункта погрузки. Маршрут начинается с места погрузки и заканчивается там же.

Задача формулируется следующим образом: дан полный взвешенный граф $G(X, V)$ порядка n , где $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – множество вершин, $V \subseteq X \times X$ – множество ребер, в нем необходимо найти Гамильтонов цикл, имеющий наименьший суммарный вес входящих в него ребер:

$$D(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad 1 \leq j \leq n,$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad 1 \leq i \leq n, \quad (2)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad 1 \leq i, j \leq n.$$

где c_{ij} – вес ребра (i, j) .

Единичные элементы матрицы X определяют порядок включения точек в маршрут $R = (i_1, i_2, \dots, i_{|R|})$ – последовательность объезда потребителей [9–11].

Управляемой величиной является функция $U(R)$:

$$U(R) = \frac{Q - (Q_b + Q_R)}{D(R)} = \frac{Q - (Q_b + Q_R)}{\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{l_k} D(R, A_l^k)}, \quad (3)$$

где Q – объем продукции; Q_b – объем брака продукции; Q_R – объем возврата продукции.

Постановка задачи нахождения оптимального плана перевозок представлена в статье [12].

Для увеличения управляемой величины необходимо минимизировать стоимость плана перевозок $D(R)$ при зафиксированном объеме перевозок груза: $Q - (Q_b + Q_R)$.

В качестве метода для решения задачи условной минимизации функции в работе используется генетический алгоритм по схеме, приведенной в [13]:

$$D^* = D(\bar{r}^*) = \min_{x \in G} D(\bar{r}), \quad (4)$$

где \bar{r}^* – оптимальное решение; $D^* = D(\bar{r}^*)$ – наибольшее значение критерия оптимальности среди всех значений критерия D в области поиска G . Выражение (4) является математической записью модели принятия решения, называемой экстремальной задачей однокритериального выбора. В том случае, когда область поиска G состоит из счетного числа решений, принято говорить о задаче (4) как о задаче дискретной оптимизации.

Наименьшей неделимой единицей биологического вида, подверженной действию факторов эволюции, является особь a_k^t (индекс k обозначает номер особи, а индекс t – некоторый момент времени эволюционного процесса). В качестве аналога особи a_k^t в экстремальной задаче однокритериального выбора (4) примем произвольное допустимое решение, которому присвоено имя a_k^t .

Каждая особь характеризуется n генами, а структуру строки $R = (i_1, i_2, \dots, i_n)$ можно интерпретировать хромосомой, содержащей n сцепленных между собой генов, которые следуют друг за другом в строго определенной последовательности. Хромосому особи a_k^t будем обозначать χ_k^t , т. е.

$$\begin{aligned} \chi_k^t = \chi(a_k^t) &= (\chi_1(a_k^t), \chi_2(a_k^t), \dots, \chi_n(a_k^t)) = \\ &= R_k = (i_1, i_2, \dots, i_n). \end{aligned} \quad (5)$$

Согласно хромосомной теории наследственности передача генетической информации будет осуществляться через хромосомы от «родителей» к «потомкам».

При взаимодействии особи с внешней средой ее генотип порождает совокупность внешне наблюдаемых количественных признаков (характеристик $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m$), называемых фенотипом $\gamma(a_k^t)$. По аналогии с популяционной генетикой будем говорить, что реализуется «принцип генного контроля», когда множество генотипов взаимно однозначно отображается на множество фенотипов. С математической точки зрения этот принцип реализуется в силу взаимно однозначного отображения множеств D и S друг в друга. В случае рассматриваемой задачи эта последовательность вершин отображается на координатную плоскость.

Алгоритм поисковой оптимизации, начинается с начальной популяции p^0 (совокупности кодировок $(\chi_1^0, \chi_2^0, \dots, \chi_v^0)$) и итеративно выполняет следующий цикл операций:

– вычисляем значения функции приспособленности для любой кодировки $\chi \in S$;

– выберем из популяции $P^t, t = 0, 1, \dots$ репродукционного множества R^t (подмножества кодировок $R^t \subseteq P^t$);

– генерируем из репродукционного множества R^t новых кодировок с помощью комбинаций следующих операций: копирование – создание тождественных копий некоторых или всех кодировок из R^t ; скрещивание – конструирование новых кодировок путем сцепления подстрок тех

кодировок, которые выбираются путем копирования из R^t ; мутация – конструирование новых кодировок путем подстановки символов из алфавита B в выбранные позиции одной из кодировок $\chi \in R^t$; формируем на очередном шаге (поколении) новой популяции P^{t+1} путем замены некоторых или всех кодировок $\chi \in P^t$.

Требования:

– все кодировки $\chi \in S$ имеют одну и ту же длину L ;

– каждая популяция $P^t, t = 0, 1, \dots$ имеет постоянную численность n ;

– мощность репродукционного множества $|R^t| = 2$; элементы $\chi', \chi'' \in R^t$, называемые родителями, выбираются из популяции P^t случайным образом с вероятностями, пропорциональными значениям функции приспособленности;

– скрещивание осуществляется с помощью одноточечного кроссовера, когда символы $(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_i)$ i в новой кодировке χ , называемой потомком, являются символами кодировки $\chi' \in R^t$, а символы $(\chi_{i+1}, \chi_{i+2}, \dots, \chi_L)$ переходят от кодировки $\chi'' \in R^t$; индекс i , называемый точкой кроссовера, выбирается случайным образом с равной вероятностью из интервала $[1, L - 1]$;

– мутации являются стохастическими операциями и обычно не зависят от значений функции приспособленности;

– замена сводится к исключению из популяции P^t особи с наименьшим значением функции приспособленности и включению в нее одной из новых кодировок с наибольшим значением функции приспособленности [13, 14].

Для уточнения решения дополнительно используется метод обобщенного градиента [15, 16].

Алгоритм визуализации маршрута представлен на рис. 1.

В текущей ситуации водитель получает путевой лист, в соответствии с которым выполняет движение по маршруту. Маршрут движения водителя в путевом листе получен эмпирическим путем. Магазины в путевой лист добавлялись по мере заключения с ними контрактов, оптимизация маршрута не проводилась.

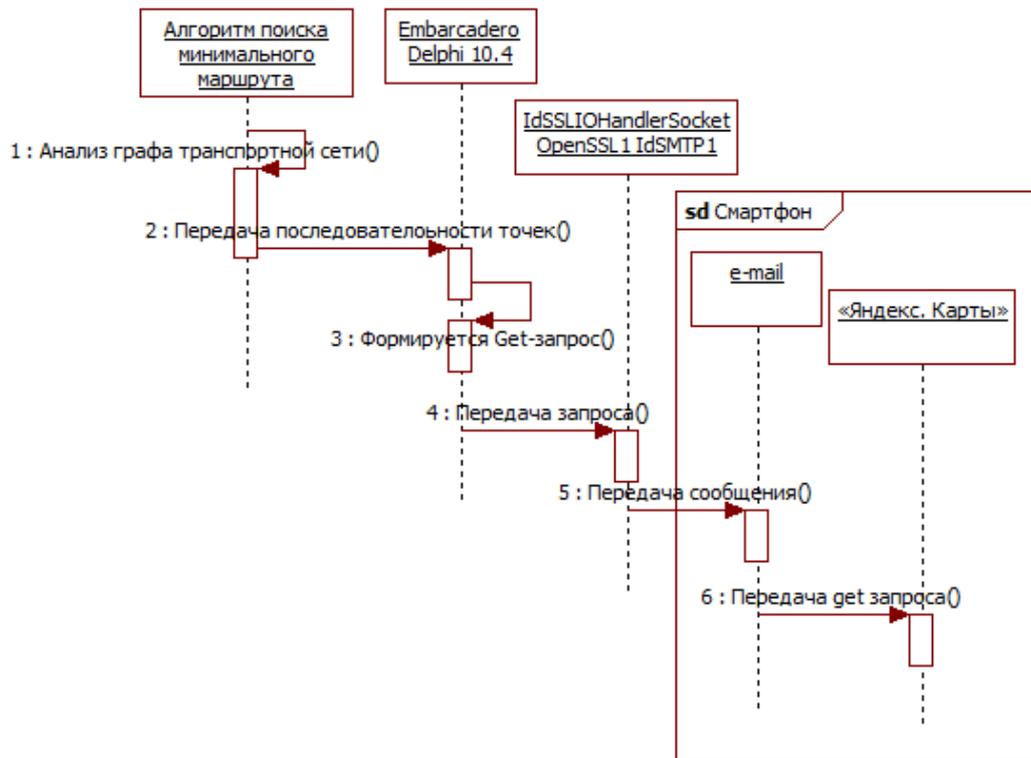


Рис. 1. Алгоритм визуализации

Fig. 1. Visualization algorithm

Для построения наиболее выгодного маршрута доставки продукции предлагается оптимизировать длину маршрута объезда магазинов.

Для этого была собрана информация об адресах точек доставки и расстояниях по улицам города между этими точками. На основании полученной информации был построен маршрут, по которому двигается водитель для осуществления доставки.

Посчитав конечную протяженность маршрута, получаем что длина маршрута, построенного водителем, составляет 104,3 километра. Водитель посещает точки маршрута в следующем порядке: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 0. Маршрут объезда точек водителем до оптимизации маршрута представлен на рис. 2. На рис. 2–4 вдоль линии маршрута цифрами обозначен порядок объезда магазинов, автоматически проставляемый в навигаторе, который отличается от обозначения номеров магазинов при оптимизации и позволяет наглядно показать отличия в маршрутах до и после оптимизации.

В качестве начального приближения возьмем маршрут 1, по которому водитель следует в соответствии с путевым листом. Используя генетический алгоритм для решения задачи и уменьшения длины маршрута, получим, что

наиболее оптимальным маршрутом следования будет маршрут между точками в следующем порядке: 0, 7, 10, 4, 6, 9, 3, 8, 11, 2, 5, 1, 12, 14, 15, 16, 13, 0. При длине маршрута принимает значение 73,33. Таким образом, за счет изменения порядка посещения точек маршрута удалось уменьшить расстояние, которое преодолевает водитель с 104,3 до 73,3 км. Оптимизированный маршрут представлен на рис. 3.

Оптимизированный маршрут, представленный на рис. 3, показал, что 2 магазина на данном маршруте находятся на удалении от других магазинов, было принято решение сравнить маршруты с доставкой груза в эти магазины и без их посещения. Для этого была рассчитана величина U с учетом изменения плана производства и изменения плана доставок.

С учетом посещения всех 16 магазинов, по оптимальному маршруту, величина принимает значение $U_2 = 26,08$. Рассчитав величину U для маршрута, из которого исключаются магазины, находящиеся на удалении от остальных, и из загрузки автомобиля исключим объем продукции, для этих магазинов получим величину $U_3 = 32,1$. Полученный в результате оптимизации маршрут представлен на рис. 4.

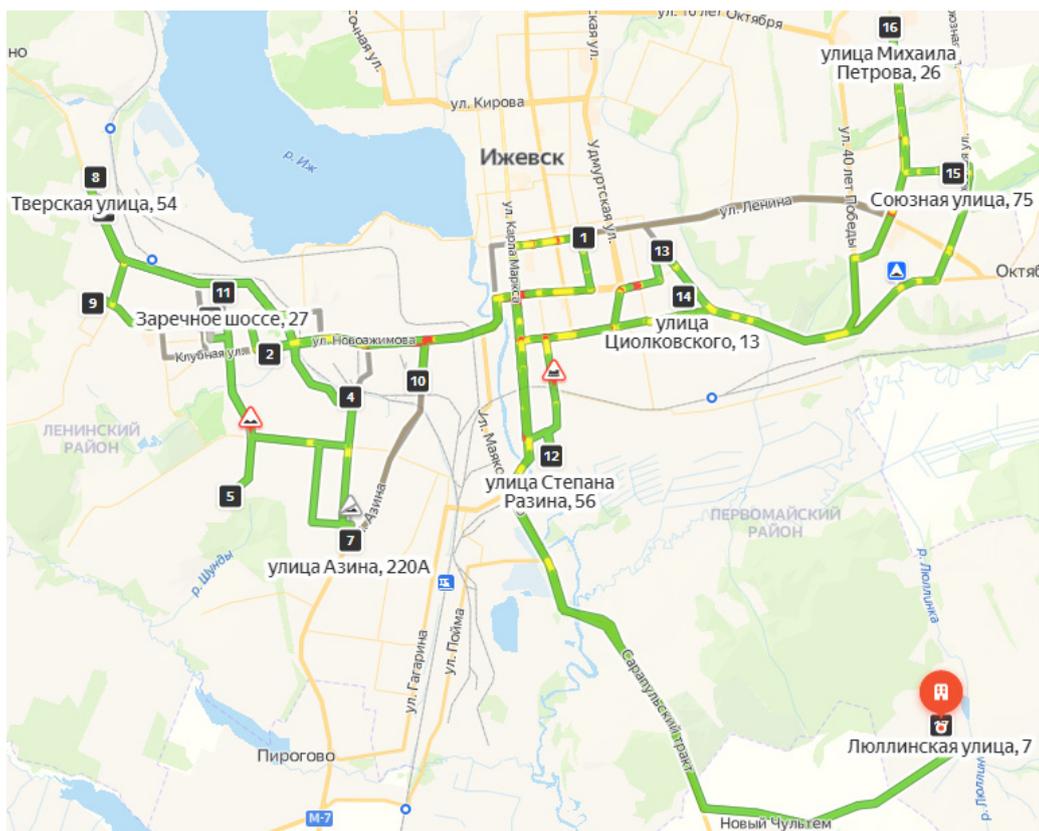


Рис. 2. Маршрут движения до оптимизации

Fig. 2. Route before optimization

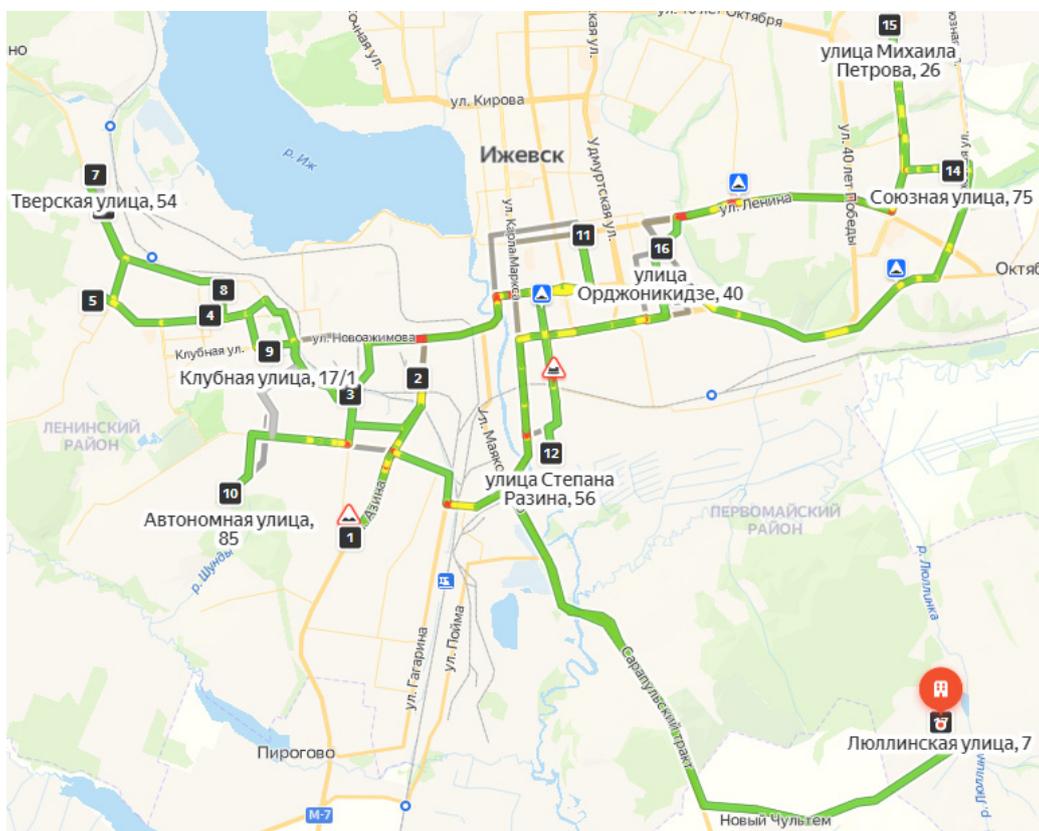


Рис. 3. Оптимизированный маршрут

Fig. 3. Optimized route

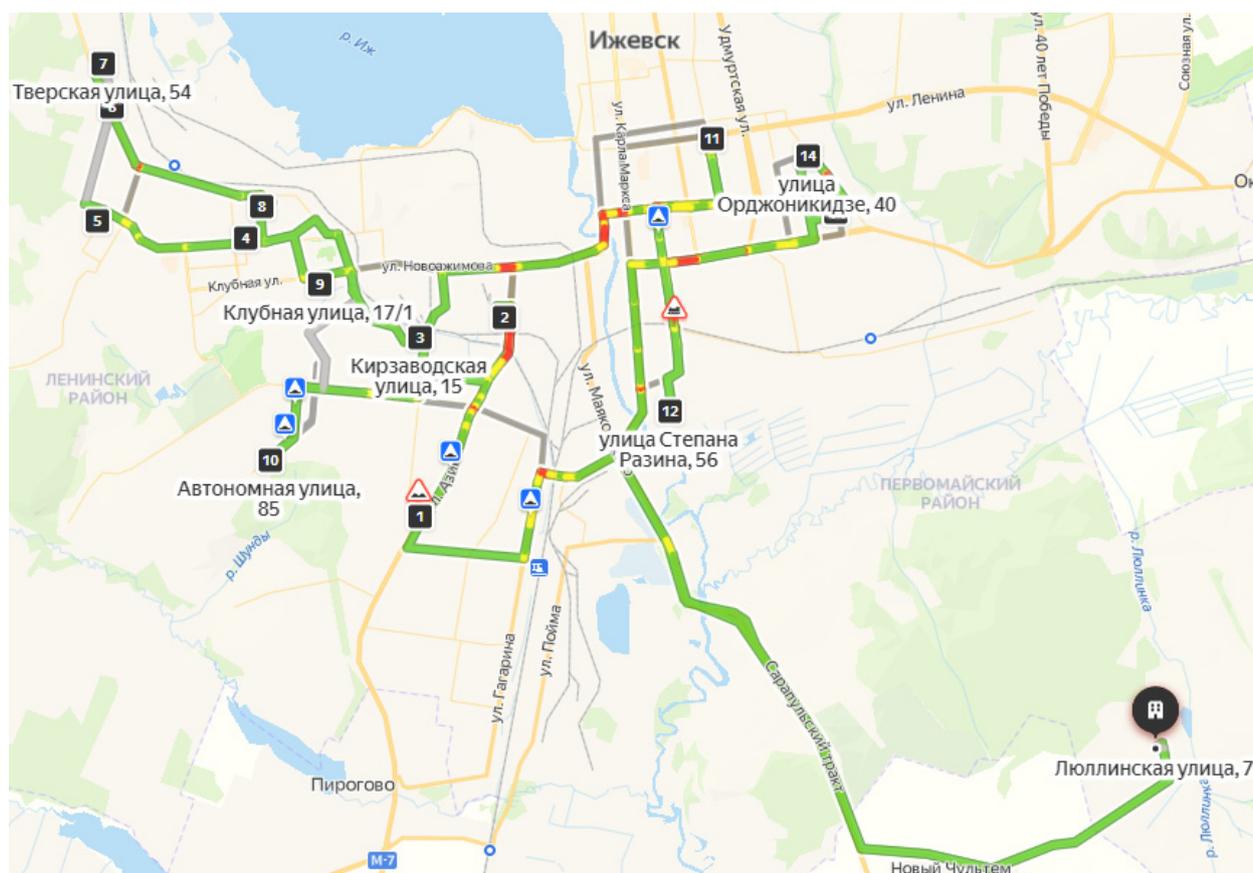


Рис. 4. Маршрут движения водителя без удаленных магазинов

В результате оптимизации и расчетов получаем, что управляемая величина (3) с изменяемым объемом продукции Q будет иметь следующие значения:

$$U_1 = 18,33 ; U_2 = 26,08 ; U_3 = 32,1.$$

U_1 – величина для маршрута, по которому совершает объезд магазинов водитель; U_2 – величина для маршрута, предложенного после оптимизации; U_3 – величина для оптимизированного маршрута, с исключением магазинов, находящихся на удалении от остальных.

Заключение

Функция (3) позволяет ранжировать маршруты. Дает возможность анализировать маршруты и оценивать их с точки зрения эффективности работы в зависимости от изменения состава магазинов на маршруте, а также в зависимости от величины заказов продукции магазинов на маршруте. Величину (3) можно увеличить до 1,5 раз на рассматриваемом маршруте, но такое изменение маршрута ограничено другими процессами взаимодействия с покупателями, которые могут ограничивать возможность отказаться от посещения магазинов в рамках маршрута.

Получившийся инструмент позволяет не только построить оптимальный маршрут следования транспортного средства, но и провести оценку и принять решение о целесообразности доставки продукции в магазин и включения его в маршрут доставки, также имеется возможность предоставить водителю точный маршрут следования с учетом загруженности дорожной сети, согласно которому доставку можно производить с наименьшими временными затратами и по оптимальному маршруту. Это позволяет сократить амортизацию транспортных средств, осуществляющих доставку. Предложенный инструмент позволяет повысить экономию на планово-предупредительных работах, обслуживании и ежедневных затратах на топливо.

Библиографические ссылки

1. Благодатский Г. А., Горохов М. М., Докучаев Д. Е. Разработка UML-модели классов для предприятий пищевой промышленности по технологии OMG RUP // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. Т. 20, № 4. С. 86–90.
2. Благодатский Г. А., Докучаев Д. Е. Разработка модели прецедентов предприятий пищевой промышленности // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. Т. 20, № 2. С. 153–165.

3. Носков, С. В., Чернова Д. В., Сосунова Л. А. Оптимизация маршрута доставки строительных материалов потребителям // Экономические науки. 2017. № 157. С. 48–50.

4. Оптимизация системы доставки строительного груза автотранспортом в компании ООО «ПКФ «Термодом» / В. А. Акимова, Э. Р. Домке, С. А. Жесткова, М. К. Капунова // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 2 (39). С. 51–62.

5. Применение классических комбинаторных методов для оптимизации маршрута доставки транспортной компании / С. Н. Борисов, Р. А. Дьяченко, С. А. Шапарь, Е. А. Шапарь // Научные труды КубГТУ : Электронный сетевой политематический журнал. 2019. № 6. С. 80–89.

6. Домке Э. Р., Жесткова С. А., Барсукова А. И. Оптимизация системы доставки массового строительного груза автомобильным транспортом // Региональная архитектура и строительство. 2020. № 3 (44). С. 152–160.

7. Ручинская Ю. С., Панкратова Е. В., Ковалева К. А. Транспортная задача и ее применение в ООО «Виктория» // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 109. С. 325–338.

8. Благодатский Г. А., Горохов М. М., Тенев В. А. Программно-инструментальные средства повышения эффективности внутренних бизнес-процессов предприятий. Ижевск : Издательство ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. 188 с.

9. Мудров В. И. Задача о коммивояжере. М. : Знание, 1969. С. 64.

10. Меламед И. И., Сергеев С. И., Сигал С. И. Задача коммивояжера. Приближенный алгоритм // Автоматика и телемеханика. 1989. № 1. С. 3–26.

11. Алгоритм для решения задачи о коммивояжере / Дж. Литл Дж., К. Мурти, Д. Суини, К. Кэрел // Экономика и математические методы. 1965. Вып 1. № 1. С. 94–107.

12. Модель информационной системы управления процессами логистики предприятий пищевой промышленности / Г. А. Благодатский, М. М. Горохов, Д. Е. Докучаев, Л. Г. Саетова // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19, № 3. С. 65–73.

13. Батищев Д. И., Неймарк Е. А., Старостин Н. В. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации. Н. Новгород : Издательство НГУ им. Лобачевского, 2007. С. 88.

14. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации. М. : ДМК «Пресс», 2020. С. 940.

15. Шор Н. З. Обобщенные градиентные методы минимизации негладких функций и их применение к задачам математического программирования (обзор) // Экономика и математические методы. 1976. Т. 12, № 2. С. 337–356.

16. Альбер Я. И., Шильман С. В. Метод обобщенного градиента: сходимость, устойчивость и оценки погрешности // Вычислительная математика и математическая физика. 1982. Т. 22, № 4. С. 814–823.

References

1. Blagodatsky G.A., Gorokhov M.M., Dokuchaev D.E. [Development of a UML class model for food industry enterprises using OMG RUP technology]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*. 2017. No. 4. Pp. 86–90 (in Russ.).

2. Blagodatsky G.A., Dokuchaev D.E. [Development of a precedent model for food industry enterprises]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*. 2017. No. 2. Pp. 153–165 (in Russ.).

3. Noskov S.V., Chernova D.V., Sosunova L.A. [Optimization of the route of delivery of building materials to consumers]. *Jekonomicheskie nauki*. 2017. No. 157. Pp. 48–50 (in Russ.).

4. Akimova V.A., Domke E.R., Zhestkova S.A., Kapunova M.K. [Optimization of the system for the delivery of construction cargo by road in the company "LLC PKF Termodom"]. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo*. 2019. No. 2. Pp. 51–62 (in Russ.).

5. Borisov S.N., Dyachenko R.A., Shapar S.A., Shapar E.A. [Application of classical combinatorial methods to optimize the delivery route of a transport company]. *Nauchnye trudy KubGTU : Jelektronnyj setevoj politematicheskij zhurnal*. 2019. No. 6. Pp. 80–89 (in Russ.).

6. Domke E.R., Zhestkova S.A., Barsukova A.I. [Optimization of the system for the delivery of mass construction cargo by road]. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo*. 2020. No. 3. Pp. 152–160 (in Russ.).

7. Ruchinskaya Yu.S., Pankratova E.V., Kovaleva K.A. [Transport task and its application in ООО "Victoria"]. *Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015. No. 109. Pp. 325–338 (in Russ.).

8. Blagodatsky G.A., Gorokhov M.M., Tenenev V.A. *Programmno-instrumental'nye sredstva povyshenija jeffektivnosti vnutrennih biznes-processov predpriyatij* [Software and tools for improving the efficiency of internal business processes of enterprises]. Izhevsk: Publishing house of IzhGTU named after M.T. Kalashnikova, 2015. 188 p. (in Russ.).

9. Mudrov V.I. *Zadacha o kommivojazhere* [The traveling salesman problem]. Moscow, Znanie Publ., 1969. P. 64 (in Russ.).

10. Melamed, I.I., Sergeev S.I., Sigal S.I. [The traveling salesman problem. Approximate algorithm]. *Avtomatika i telemehnika*. 1989. No. 11. Pp. 3–26 (in Russ.).

11. J. Little J., Murthy C., Sweeney D., Carel K. [Algorithm for solving the traveling salesman problem]. *Jekonomika i matematicheskie metody*. 1965. Issue 1. No. 1. Pp. 94–107 (in Russ.).

12. Blagodatsky G.A., Gorokhov M.M., Dokuchaev D.E., Saetova L.G. [Model of the information system for managing the logistics processes of food industry enterprises]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2021. Vol. 19, no. 3. Pp. 65–73 (in Russ.).

13. Batishchev D.I., Neimark E.A., Starostin N.V. *Primenenie geneticheskikh algoritmov k resheniju zadach diskretnoj optimizacii* [Application of genetic algorithms

to solving discrete optimization problems]. Nizhny Novgorod: Publishing house of the NSU. Lobachevsky, 2007. P. 88 (in Russ.).

14. Simon D. *Algoritmy jevoljucionnoj optimizacii* [Algorithms of evolutionary optimization]. Moscow: DMK Press, 2020. P. 940 (in Russ.).

15. Shore N.3. [Generalized Gradient Methods for Minimizing Nonsmooth Functions and Their Application

to Mathematical Programming Problems (Review)]. *Jekonomika i matematicheskie metody*. 1976. Vol. 12, no. 2. Pp. 337-356 (in Russ.).

16. Alber Ya.I., Shilman S.V. [The generalized gradient method: convergence, stability and error estimates]. *Vychislitel'naja matematika i matematicheskaja fizika*. 1982. Vol. 22, no. 4. Pp. 814-823 (in Russ.).

Development of Software and Tools to Optimize a Manufacturing Enterprise Logistics in Food Industry

G. A. Blagodatsky, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Information Systems Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

M. M. Gorokhov, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Department Head of Information Systems, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

D. E. Dokuchaev, Head Office, Senior Lecturer, Department of Information Systems, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The article discusses the logistics automation for a manufacturing enterprise engaged in food production and delivery. In particular, optimization of product delivery routes to customers. Light vehicles are used to deliver products around the city. Vehicle route optimization that delivers loads to the shipment terminal within the city. Routes are specified with maldistribution of shipment terminals on the map and limited delivery time.

The enterprise delivers finished products to stores daily, reducing the cost and time of delivery will increase not only the profit of the enterprise, but also customer satisfaction, because they will be able to receive goods earlier, the goods will be fresher, which gives the enterprise a competitive advantage. The tasks of optimizing delivery routes are relevant for all enterprises in the sphere of production or trade that have in their structure fleet vehicles for the delivery of products, or enterprises for which delivery is the main activity. The complexity of finding the optimal route when drawing up a transportation plan increases significantly with the increase in the number of delivery terminals and their distance from each other within the complex road network of the city. An increase in the number of buyers increases the number of possible routes, finding the optimal route without using optimization methods becomes a difficult task. The article proposes an algorithm for minimizing the product delivery plan by reducing the length of the route. A comparison of changes in the controlled variable U with a fixed production plan Q , as well as with a change in the production plan Q and delivery plan $D(R)$ to analyze the profitability of product delivery is made.

Keywords: modeling, business processes, logistics, food industry, routing, transport.

Получено: 07.12.22

Образец цитирования

Благодатский Г. А., Горохов М. М., Докучаев Д. Е. Разработка программно-инструментальных средств для оптимизации процессов логистики производственного предприятия пищевой промышленности // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 71–78. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-71-78.

For Citation

Blagodatskii G.A., Gorokhov M.M., Dokuchaev D.E. [Development of Software and Tools to Optimize a Manufacturing Enterprise Logistics in Food Industry]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 71-78 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-71-78.

УДК 621.658.012.531

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-79-87

Программное обеспечение управления ветротурбиной в составе ветроэлектростанции на базе учета вибрационной нагруженности привода и своевременной подготовки процесса принятия управляющих решений при разных режимах эксплуатации энергоагрегата

В. И. Буюльский, кандидат технических наук, Севастопольский государственный университет,
Севастополь, Россия

Обоснована актуальность оптимизации временной схемы доступа к устройству изменения положения лопастей со стороны предложенного и основного методов принятия решений по управлению на основе критического анализа своевременной подготовки системы к внешним возмущающим воздействиям.

Произведена оптимизация интервала времени выборки измеренных значений случайного процесса за счет уменьшения промежутка времени упреждения на 50 %, в основе разработки которого лежит организация согласованной работы предложенного и существующего методов управления ветроэлектрическим агрегатом. Работа обусловлена разграничением времени доступа к двигателю привода угла питча лопасти со стороны рассматриваемых способов выработки управляющих воздействий, которое составляет $\Delta t = 5$ с. Это позволит учесть оптимальное время, необходимое для подготовки системы к внешним возмущениям, и с целью повышения точности ожидаемых значений внешних воздействий обеспечит минимальный промежуток времени упреждения $\Delta t > 0$, нахождения реализации процесса в момент времени $\tau + \Delta t = t_{i+1}$. Для минимизации времени контроля выходных параметров со стороны основного метода принятия управляющих решений, а также повышения точности оценки скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии, характеризующейся как случайный процесс с программной реализацией, когда измеренные значения могут храниться в файле с дальнейшим использованием для последующих интервалов упреждения, предложен подход решения задачи по уменьшению времени контроля выходных, управляемых параметров на 50 %, так как на начальном этапе такой контроль осуществляется на отрезке времени $\Delta t'_1 = 60$ с, а в последующих интервалах составит $\Delta t'_2 = 10$ с.

Разработан программный комплекс автоматизации управления ветроэнергетической установкой в составе ветроэлектростанции, обеспечивающий учет вибрационной нагруженности привода и своевременную подготовку системы принятия управляющих решений при разных режимах эксплуатации энергоагрегата.

Ключевые слова: оптимизация, ветротурбина, оценка времени, компьютерная программа, автоматизация, система управления.

Введение

Современная технология производства электроэнергии путем использования энергии ветра имеет ряд проблем, которые негативным образом влияют на повышение эффективности преобразования энергии. Широко используемые методы управления ветроэнергетической установкой в условиях быстро изменяющихся ветровых и электрических нагрузок не обеспечивают должной стабильности частоты вращения ротора ветротурбины, что отрицательно влияет на надежность и продолжительность безаварийной работы ветроэлектрических агрегатов, экономии производимой электроэнергии при собственном потреблении, а также на эффективность использования энергии ветра. Решение этих проблем возможно лишь при наличии эф-

фективного автоматизированного управления ветроэнергетической установкой [1–9].

Цель выполненных исследований – оптимизация временной схемы доступа к устройству изменения положения лопастей со стороны предложенного и основного способов управления и программная реализация методов учета вибрационной нагруженности привода и своевременной подготовки процесса принятия управляющих решений при разных режимах эксплуатации энергоагрегата на основе разработанных математических алгоритмов динамического поведения системы для модификации автоматизированного управления ветротурбиной, которая обеспечивает уменьшение вибраций всех элементов роторных систем, что способствует улучшению показателей надежности составляющих частей современных ветрогенераторов.