

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

УДК 625.089.21

DOI 10.17816/transsyst20239266-82

© Н.А. Федосеев, В.А. Свальбова, С.В. Алексеев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Россия)

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ СОСТАВЛЕНИЯ КАРТОГРАММЫ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Обоснование: Картограмма фрезерования является техническим заданием для машиниста дорожной фрезы.

Цель: Автоматизация процесса составления картограммы фрезерования.

Материалы и методы: Алгоритм поиска наилучшего варианта основан на методе обобщенного приведенного градиента. В качестве программного комплекса используется MS Excel. Источниками ограничений являются требования нормативных документов к качеству проведения работ по фрезерованию.

Результаты: Составленная модель учитывает условия для обеспечения поверхностного водоотвода, а также ограничения, предусмотренные строительными правилами. В качестве целевой функции принято расхождение фактической глубины реза с предпочтительной. Проведен анализ результатов решения и дано сопоставление ручного и автоматизированного расчетов.

Выводы: Использование описанного в статье алгоритма позволяет сократить трудозатраты на составление картограммы в два раза. Аналогично снижается степень отклонения задаваемой глубины реза от целевой, что приводит к снижению объемов перерасхода материалов при дальнейших работах.

Ключевые слова: ремонт улично-дорожной сети, оптимизационная модель, математическое моделирование, фрезерование, ремонт покрытия, картограмма, MS Excel.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© N.A. Fedoseev, V.A. Svalbova, S.V. Alekseev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

AUTOMATED ALGORITHM FOR DRAWING UP A MILLING CARTOGRAM

Background: The milling cartogram is a technical task for the driver of a road milling cutter.

Aim: Automation the process of drawing up a milling cartogram.

Materials and methods: The algorithm for finding the best option is based on the generalized reduced gradient method. MS Excel is used as a software package. The sources of restrictions are the requirements of regulatory documents for the quality of milling operations.

Results: The compiled model considers the conditions for ensuring surface drainage, as well as the restrictions provided for by the building regulations. The discrepancy between the actual cutting depth and the preferred one is accepted as the objective function. The analysis of the results of the solution is carried out and a comparison of manual and automated calculations is given.

Conclusion: The use of the algorithm described in the article makes it possible to reduce the labor costs for drawing up a cartogram by half. Similarly, the degree of deviation of the specified cutting depth from the target is reduced, which leads to a decrease in the amount of overspending of materials during further work.

Key words: repair of the road network, optimization model, mathematical modeling, milling, coating repair, cartogram, MS Excel.

ВВЕДЕНИЕ

В период содержания автомобильной дороги и проведения текущих ремонтов крайне распространенной задачей является выравнивание покрытия в продольном и поперечном направлениях. Одной из основных дорожно-строительных машин, позволяющих производить выравнивание покрытия при проведении работ по ремонту улично-дорожной сети (УДС) и автомобильных дорог, является дорожная фреза. В качестве технического задания оператору машины выдается картограмма с указанными на ней глубиной зарезания и направлением и величиной уклона фрезерного барабана в контрольных точках [1]. Для составления картограммы требуется изначально наметить траекторию движения копирной лыжи машины и расположить на ней точки, которые должны обладать тремя характеристиками – глубиной зарезания, величиной поперечного уклона и его направлением. Данные линии называются базовыми линиями (БЛ) – относительно них идет ориентация рабочего органа машины в пространстве и, при производстве работ, может определяться погрешность дорожной фрезы, что позволяет вносить своевременные корректировки в задаваемые параметры процесса (глубина зарезания, поперечный уклон).

Согласно законодательству города Санкт-Петербург в области дорожного строительства при выполнении работ по текущему ремонту УДС наличие проекта вертикальной планировки территории не является обязательным [2]. Подрядчику передается плановое положение элементов УДС, используемое для составления ведомости объемов работ. Вертикальную разбивку в таких случаях подрядные организации производят собственными силами. В силу ограниченности времени, выделяемого на выполнение работ, зачастую составление картограммы фрезерования приходится производить непосредственно во время

проведения работ, что снижает производительность звена машин – возникают простои на время проведения разбивки и разработки картограммы.

Цель работы – составление алгоритма расчета картограммы фрезерования с учетом ограничений, обоснованных технологическими характеристиками процесса и нормами строительства. Появление автоматизированного алгоритма поможет сократить продолжительность проведения подготовительных работ при частичной разборке покрытия.

Оптимизационные модели, использование которых возможно для составления алгоритма, можно разделить на несколько категорий в зависимости от метода поиска решения. Сравнение методов приведено в Табл. 1.

Таблица 1. Сравнение методов оптимизации

Метод	Характеристики метода	
	Преимущества	Недостатки
Линейное программирование [3-5]	1. Однозначное определение глобального оптимума	1. Невозможность решения нелинейных задач
Обобщенный приведенный градиент (ОПГ) [6–8]	1. Возможность решения нелинейных задач 2. Высокая эффективность вычислений при сильно выпуклой функции	1. Склонность к определению локального оптимума
Эволюционный метод [9, 10]	1. Возможность решения задач широкого спектра; 2. Высокая сходимость метода	1. Зависимость результата от настроечных параметров, подбираемых опытным путем 2. Высокая нагрузка вычислительных мощностей

Выбор программного комплекса для расчетов зависит от используемой модели оптимизации и ее сложности. Сравнительный анализ наиболее распространенных программ представлен в Табл. 2 [11–14].

Таблица 2. Сравнительный анализ программ

Параметр		Значение параметра для программы		
		MS Excel 2019; «Поиск решения»	Mathcad 15	Matlab R2014; «Optimization toolbox»
Максимальное количество структурных элементов модели	неизвестные переменные	200	∞	∞
	прямые ограничения	400	∞	∞
	непрямые ограничения	100	∞	∞

Параметр		Значение параметра для программы		
		MS Excel 2019; «Поиск решения»	Mathcad 15	Matlab R2014; «Optimization toolbox»
Используемые алгоритмы реализации моделей	линейные модели	1. Симплекс-метод; 2. Метод ветвей и границ;	1. Симплекс-метод	1. Симплекс-метод; 2. Метод ветвей и границ
	нелинейные модели	1. ОПГ; 2. Эволюционный метод	1. ОПГ; 2. Алгоритм Левенберга-Маркуарда; 3. Квази-метод Ньютона	1. ОПГ; 2. Последовательное квадратичное программирование; 3. Метод внутренней точки

Разработка расчетного комплекса производится в программе MS Excel. Данная программа имеет достаточный функционал для решения нелинейных оптимизационных моделей, а также поддерживает установку на смартфон, что повышает доступность расчетного комплекса для инженерно-технических работников, находящихся непосредственно на производственной линии. Расчетный алгоритм должен обеспечивать условия водоотвода и соблюдение требований к проектированию УДС, минимизируя отклонение глубин зарезания рабочего органа в контрольных точках от целевого значения.

ДАННЫЕ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В первую очередь, для формирования системы ограничений, производится сбор данных для проектирования и анализ технологии работ.

Показатели допустимых поперечных и продольных уклонов устанавливаются СП 396.1325800.2018 [14]. Минимальный поперечный уклон – 5 ‰, максимальный – 30 ‰ (в сложных градостроительных условиях и при проведении работ по реконструкции).

Помимо нормативных ограничений присутствуют технологические – движение машины в процессе фрезерования прямолинейное. БЛ должны быть взаимно параллельны, так как поперечный уклон формируется перпендикулярно по отношению к направлению движения машины.

В местах примыкания к существующему покрытию или бортовому камню глубина зарезания должна соответствовать проектной толщине покрытия.

Результат фрезерования в общем случае – плоскость, параллельная плоскости проектируемого покрытия и лежащая ниже на толщину

проектного слоя. Задача сводится к проектированию плоскости с соблюдением вводимых ограничений. Результат расчета алгоритма – поверхность в виде набора точек, представленная на Рис. 1, с постоянными (заранее известными) координатами X и Y (плановое положение) и переменной координатой Z (высотой). Координата Z – неизвестная переменная.

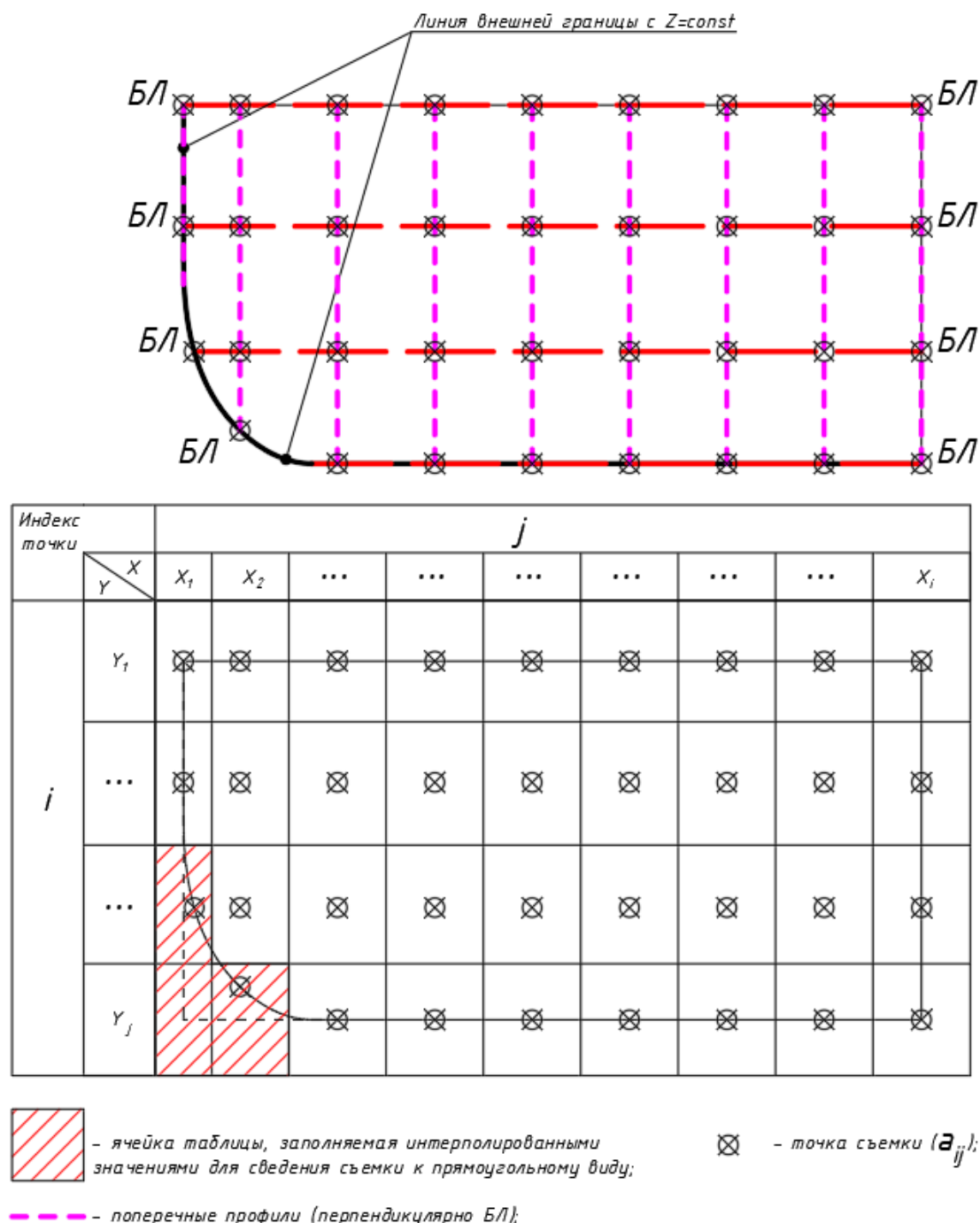


Рис. 1. Плановое изображение поверхности и ее табличная интерпретация

Исходными данными для алгоритма является съемка существующей поверхности (фактические высотные отметки точек съемки – a_{ij} ; плановое положение точек съемки – X_j и Y_i).

Оценка оптимальности проектной поверхности осуществляется с помощью показателя глубины зарезания рабочего органа машины относительно существующей поверхности. Для точки находится как:

$$h_{ij} = a_{ij} - (x_{ij} - \delta) \quad (1)$$

где x_{ij} – проектная высотная отметка точки, м;

δ – толщина устраиваемого слоя асфальтобетонного покрытия согласно проекту, см.

Определим условия, соблюдение которых необходимо для выполнения ограничений глубины реза в местах примыкания к бортовому камню:

$$a_{i1} = x_{i1}; i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (2)$$

$$a_{ij} = x_{ij}; i = n; j = 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

Для обеспечения соответствия проектных уклонов нормативным требованиям составлены следующие неравенства:

$$\max \left\{ \frac{x_{ij} - x_{i-1,j}}{|Y_i - Y_{i-1}|}; \frac{x_{ij} - x_{i+1,j}}{|Y_i - Y_{i+1}|}; \frac{x_{ij} - x_{i,j-1}}{|X_j - X_{j-1}|}; \frac{x_{ij} - x_{i,j+1}}{|X_j - X_{j+1}|} \right\} \geq I^{\min} \quad (4)$$

где $x_{i-1,j}$; $x_{i+1,j}$; $x_{i,j-1}$; $x_{i,j+1}$ – проектная высотная отметка точек, соседних для точки x_{ij} , м;

Y_i ; Y_{i-1} ; Y_{i+1} – координата по оси Y для соответствующих БЛ, м;

X_j ; X_{j-1} ; X_{j+1} – координата по оси X для соответствующих поперечных профилей, м;

I^{\min} – минимально допустимый уклон в любой точке покрытия, %.

$$\max \left\{ \frac{x_{ij} - x_{i-1,j}}{|Y_i - Y_{i-1}|}; \frac{x_{ij} - x_{i+1,j}}{|Y_i - Y_{i+1}|}; \frac{x_{ij} - x_{i,j-1}}{|X_j - X_{j-1}|}; \frac{x_{ij} - x_{i,j+1}}{|X_j - X_{j+1}|} \right\} \leq I^{\max} \quad (5)$$

где I^{\max} – максимально допустимый уклон в любой точке покрытия, %.

Схема, поясняющая выражения (4) и (5), указана на Рис. 2.

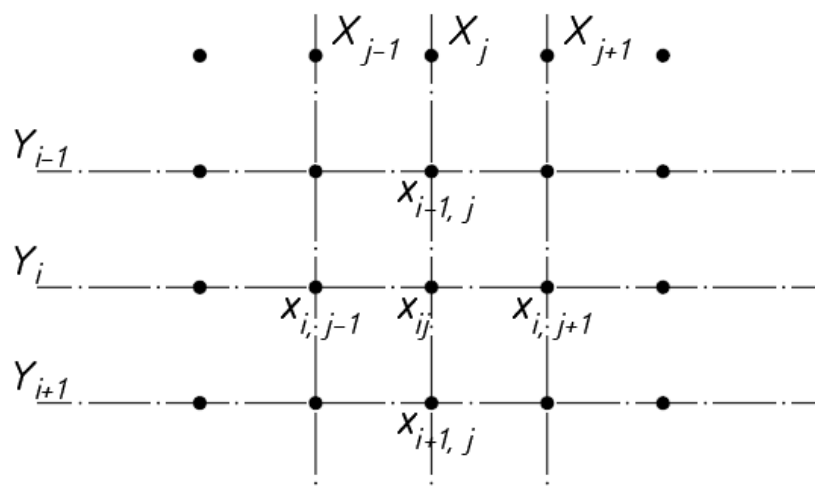


Рис. 2. Схема к определению уклона

После формирования ограничений определяется выражение, описывающее целевую функцию. Так как объект моделирования – площадной, то глубину зарезания стоит рассматривать как средневзвешенную по окрестным для точек площадям (Рис. 3).

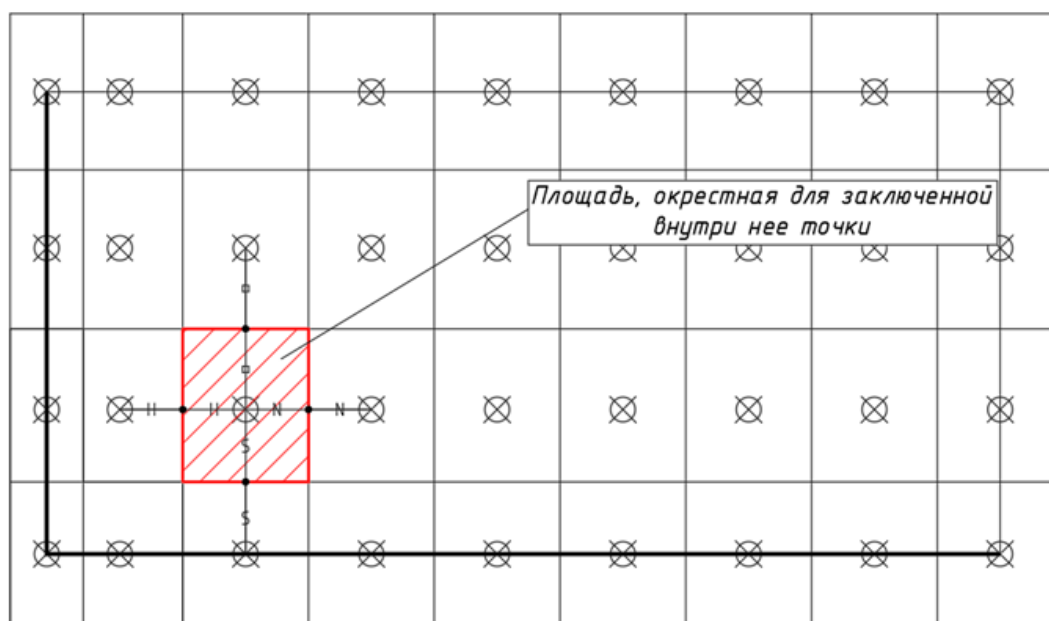


Рис. 3. Схема к определению площади, окрестной для точки

Вес каждой из точек рассчитывается исходя из ее окрестной площади [15]:

$$\sigma_{ij} = \frac{s_{ij}}{S_{\text{общ}}} \quad (6)$$

где s_{ij} – площадь, окрестная для точки съемки a_{ij} , м^2 ;

$S_{\text{общ}}$ – площадь всей площадки, м^2 .

$$s_{ij} = 0,25 \cdot (X_{j+1} - X_{j-1}) \cdot (Y_{i+1} - Y_{i-1}) \quad (7)$$

где X_{j+1} ; X_{j-1} – координата по оси X для соответствующих поперечных профилей, м;

Y_{i+1} ; Y_{i-1} – координата по оси Y для соответствующих БЛ, м.

$$S_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m s_{ij} \quad (8)$$

Критерий оптимальности отображает отклонение фактической глубины зарезания от предпочтительной:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sigma_{ij} \cdot (h_{ij} - \lambda)^2 \rightarrow \min \quad (9)$$

где λ – предпочтительная глубина зарезания, задаваемая пользователем, см.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В Табл. 3 приводятся элементы математической модели.

Таблица 3. Элементы математической модели

№ п/п	Наименование элемента исходных данных / неизвестной переменной	Ед. изм	Обозначение
1	Общие исходные данные – характеристики структуры объекта		
1.1	Количество поперечных профилей	ед.	m
1.2	Количество БЛ	ед.	n
1.3	Индекс поперечных профилей	-	J
1.4	Индекс БЛ	-	i
2	Исходные данные – характеристики проектируемой поверхности		
2.1	Фактическая высотная отметка точки, лежащей на БЛ i в рамках поперечного профиля J , $i = 1, 2, \dots, n$; $J = 1, 2, \dots, m$	м	a_{ij}
2.2	Координаты поперечного профиля J , $J = 1, 2, \dots, m$	м	X_J
2.3	Координаты БЛ i , $i = 1, 2, \dots, n$	м	Y_i
2.4	Проектная толщина слоя покрытия	см	δ
2.5	Минимальный нормативный уклон	%	I^{\min}
2.6	Максимальный нормативный уклон	%	I^{\max}
2.7	Предпочтительная глубина зарезания	см	λ

№ п/п	Наименование элемента исходных данных / неизвестной переменной	Ед. изм	Обозначение
3	Неизвестные переменные		
3.1	Проектная высотная отметка точки, лежащей на БЛ i в рамках поперечного профиля J , $i = 1, 2, \dots, n; J = 1, 2, \dots, m$	м	x_{ij}
4	Расчетные характеристики		
4.1	Максимальный уклон ребер поверхности, лежащих между точкой a_{ij} и соседними для нее точками, $i = 1, 2, \dots, n; J = 1, 2, \dots, m$	%	$maxI_{ij}$
4.2	Площадь, окрестная для точки a_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n; J = 1, 2, \dots, m$	м ²	s_{ij}
4.3	Общая площадь площадки	м ²	$S_{общ}$
4.4	Вес точки a_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n; J = 1, 2, \dots, m$	-	σ_{ij}
5.5	Глубина зарезания в точке a_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n; J = 1, 2, \dots, m$	см	h_{ij}
5	Критерий оптимальности		
5.1	Суммарное отклонение расчетной глубины зарезания от предпочтительной	см ²	$\sum_{i=1}^n \sum_{J=1}^m \sigma_{ij} \cdot (h_{ij} - \lambda)^2$

На основании Табл. 3 составлена система выражений, являющаяся оптимизационной моделью.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \sum_{J=1}^m \sigma_{ij} \cdot (h_{ij} - \lambda)^2 \rightarrow \min, i = 1, 2, \dots, n; J = 1, 2, \dots, m \quad (9) \\ h_{ij} = a_{ij} - (x_{ij} - \delta), i = 1, 2, \dots, n; J = 1, 2, \dots, m \quad (1) \\ x_{i1} = a_{i1}; i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (2) \\ x_{ij} = a_{ij}; i = n; J = 2, 3, \dots, m \quad (3) \\ maxI_{ij} \geq I^{min}, i = 1, 2, \dots, n; J = 1, 2, \dots, m \quad (10) \\ maxI_{ij} \leq I^{max}, i = 1, 2, \dots, n; J = 1, 2, \dots, m \quad (11) \\ maxI_{ij} = \max \left\{ \frac{x_{ij} - x_{i-1,J}}{|Y_i - Y_{i-1}|}, \frac{x_{ij} - x_{i+1,J}}{|Y_i - Y_{i+1}|}, \frac{x_{ij} - x_{i,J-1}}{|X_J - X_{J-1}|}, \frac{x_{ij} - x_{i,J+1}}{|X_J - X_{J+1}|} \right\} \quad (12) \\ i = 1, 2, \dots, n; J = 1, 2, \dots, m \\ x_{ij} \geq 0, i = 1, 2, \dots, n; J = 1, 2, \dots, m \quad (13) \\ \sigma_{ij} = \frac{0,25 \cdot (X_{J+1} - X_{J-1}) \cdot (Y_{i+1} - Y_{i-1})}{\sum_{i=1}^n \sum_{J=1}^m 0,25 \cdot (X_{J+1} - X_{J-1}) \cdot (Y_{i+1} - Y_{i-1})}, \quad (14) \\ i = 1, 2, \dots, n; J = 1, 2, \dots, m \end{array} \right.$$

Критерий оптимальности и расчетные характеристики раскрыты через исходные данные и неизвестные переменные [16].

Сформированная модель нелинейная – целевая функция и ограничения (10) и (11) нелинейные. Переход к линейному виду невозможен. Применение симплекс-метода не даст решения.

Использование метода ОПГ в общем случае чревато попаданием в локальный оптимум. С учетом сложности ограничений (10) и (11) метод необходимо до начала расчетов вносить предварительные высотные отметки в поле вывода результата. Так как технология фрезерования не предполагает сильного отличия формируемой поверхности от фактической, то в качестве предварительных высотных отметок может быть использована съемка фактической поверхности.

Использование эволюционного метода требует ввода дополнительных исходных данных, сильно влияющих на результат вычислений. Подбор этих данных производится опытным путем, что повышает трудоемкость решения.

С учетом всех факторов выбранный метод решения модели – ОПГ.

РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ В MS EXCEL

Для проверки адекватности модели использована картограмма площадки, расположенной на объекте текущего ремонта УДС по адресу пересечение улиц Литовской и Грибалевой. Нивелирная съемка и прочие исходные данные указаны на Рис. 4.


	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Поле ввода исходных данных							
2	Таблица 1 - Исходные данные (результат съемки), м							
3	Индекс		1	2	3	4	5	6
4	точки		0	5	10	15	20	25
5	1	0	9,76	9,94	9,79	9,86	9,95	10,01
6	2	4	9,77	9,91	9,85	9,8	9,86	9,97
7	3	7	9,76	9,87	9,9	9,88	9,92	9,86
8	4	9,5	9,76	9,77	9,78	9,84	9,87	9,92
9								
10	Таблица 2 - Технологические характеристики процесса							
11	Толщина устраиваемого слоя а/б по проекту, см							4
12	Предпочтительная средняя глубина зарезания, см							2
13	Минимально допустимый уклон для обеспечения водоотвода, %:							0,5
14	Максимально допустимый уклон, %							3
15								
16	Цветовое обозначение ячеек							
17	Ввод данных на основании нивелирной съемки							
18	Ввод данных на основании разбивки на БЛ и поперечники							
19	Ввод значений технологических характеристик процесса							
20	Результаты расчета алгоритма							

Рис. 4. Исходные данные

Результат расчета алгоритма приведен на Рис. 5 и 6.

	A	B	C	D	E	F	G	H
18								
19	Таблица 3 - Проектные отметки верха покрытия (результат расчетов), м							
20	Индекс		1	2	3	4	5	6
21	точки		0	5	10	15	20	25
22	1	0	9,760	9,910	9,890	9,888	9,969	10,029
23	2	4	9,770	9,920	9,870	9,868	9,893	9,991
24	3	7	9,760	9,845	9,855	9,853	9,945	9,933
25	4	9,5	9,760	9,770	9,780	9,840	9,870	9,920
26								
27	Таблица 4 - Глубина зарезания, см							
28	Индекс		1	2	3	4	5	6
29	точки		0	5	10	15	20	25
30	1	0	4,000	7,000	-6,000	1,250	2,060	2,078
31	2	4	4,000	3,008	2,000	-2,750	0,750	1,894
32	3	7	4,000	6,500	8,500	6,750	1,500	-3,250
33	4	9,5	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000

Рис. 5. Проектная поверхность и значения глубин зарезания

9,760	←	3,0	9,910	0,4	→	9,890	0,05	→	9,888	←	1,6	9,969	←	1,2	10,029
↑			↑			0,5			0,5			1,9			1,0
0,2			0,2			↓			↓			↓			↓
9,770	←	3,0	9,920	1,0	→	9,870	0,05	→	9,868	←	0,5	9,893	←	2,0	9,991
0,3			2,5			0,5			0,5			↑			2,0
↓			↓			↓			↓			1,8			↓
9,760	←	1,7	9,845	←	0,2	9,855	0,05	→	9,853	←	1,9	9,945	0,25	→	9,933
0,0			3,0			3,0			0,5			3,0			0,5
0,0			↓			↓			↓			↓			↓
9,760	←	0,2	9,770	←	0,2	9,780	←	1,2	9,840	←	0,6	9,870	←	1,0	9,920

Рис. 6. Проектная поверхность с обозначением величины уклонов и их направлением

Из Рис. 6 видно, что БЛ, формируемые алгоритмом, не всегда являются плавными. Но, в то же время, сгладить БЛ методами, предложенными в [4–6], не представляется возможным, так как в указанных работах один числовой ряд, а в данной статье обработке должны подвергаться несколько взаимосвязанных рядов. Для подбора оптимального коэффициента сглаживания каждой БЛ в отдельности и их соотношения между собой необходимо затратить большое количество

времени. В этой работе сглаживание полученных результатов предлагается проводить вручную после завершения работы алгоритма.

На Рис. 7 представлен график сопоставления результатов, полученных в ходе расчета, обработанных вручную после расчета и полученных полностью ручным способом.



Рис. 7. Графики сопоставления продольных профилей по БЛ №1-№3, полученных различными способами

На Рис. 8 представлены графики, отображающие частоту появления отклонений глубин зарезания от диапазона 0–4 см (4 см – толщина устраиваемого покрытия по проекту; выход глубины зарезания из данного диапазона ведет к перерасходу асфальтобетонной смеси).

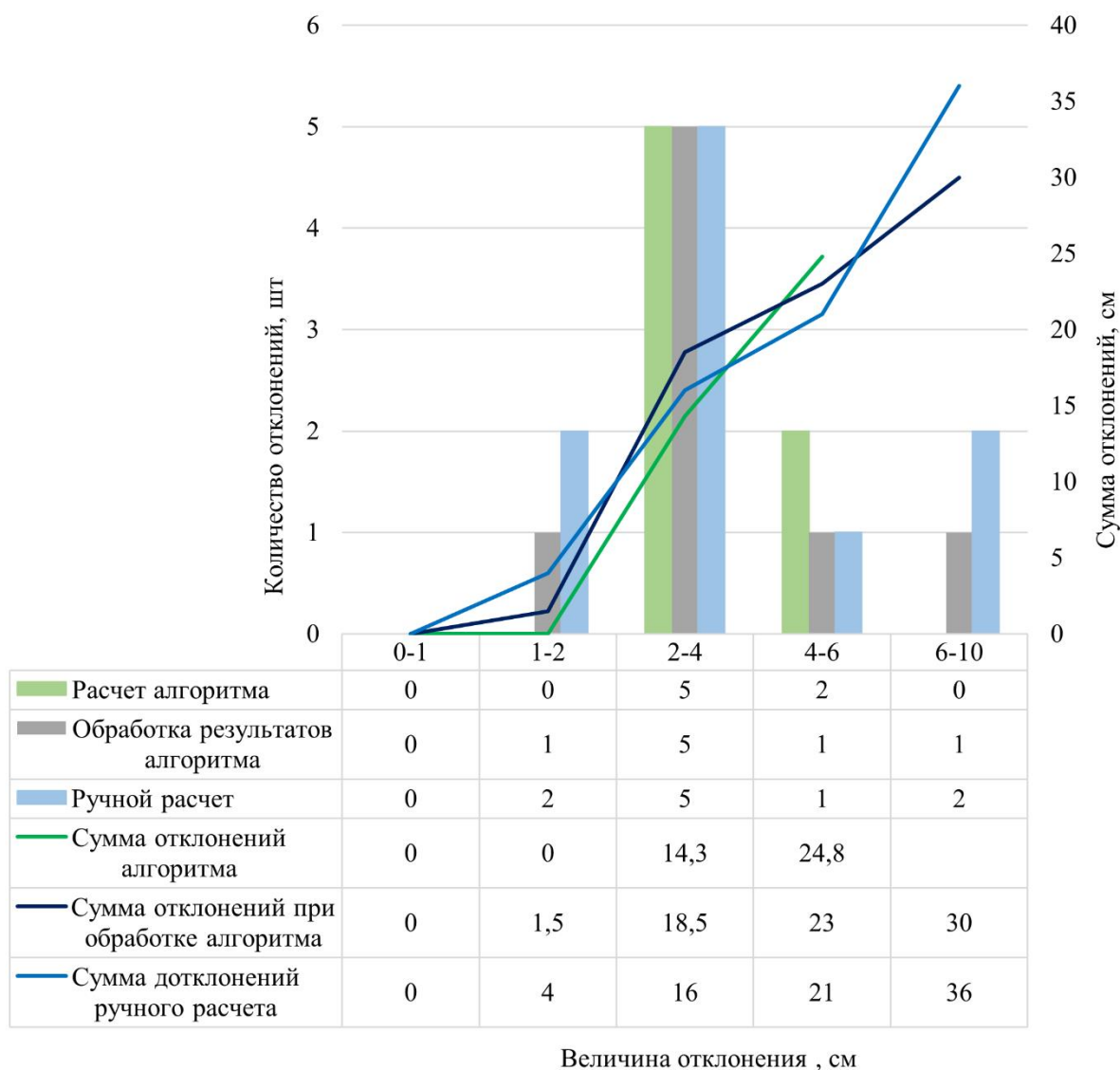


Рис. 8. Частота отклонений глубины реза от диапазона [0–4] см в зависимости от способа составления картограммы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в статье модель составления картограммы фрезерования работает в полуавтоматическом режиме: первоначальный результат расчетов стоит обрабатывать для получения более гладкой плоскости. Однако даже с учетом этого алгоритм ускоряет рабочий процесс – составление картограммы в полностью ручном режиме заняло 31 минуту, ввод данных в программу с последующей ручной корректировкой

результата занял 12 минут. Объем сокращения рабочего времени в данном случае составил 61,3 %.

Из Рис. 7 видно, что после обработки результатов расчета, полученные продольные профили находятся в промежуточном положении между результатами расчета алгоритма и ручного расчета. Следовательно, результат работы алгоритма стоит воспринимать как наиболее выгодный с точки зрения глубин зарезания вариант картограммы, однако неровный и требующий дальнейшей обработки (Рис. 6, 7). Обработанные результаты расчета кардинальным образом не отличаются от предложенных алгоритмом, а значит, на этап обработки не требуется отводить значительное количество времени. Полностью ручной расчет требует от лица, решающего задачу, самостоятельно определить наиболее предпочтительные способы водоотвода и места расположения переломов профиля (линии лотков и водоразделов).

Из Рис. 8 следует, что при ручном расчете суммарное отклонение глубины зарезания наибольшее – 36 см. Суммарное отклонение при обработке результатов алгоритма составляет 30 см, что близко к среднеарифметическому значению результатов полностью ручного расчета и полностью автоматизированного (30,4 см), и на 16,7 % меньше, чем при ручном расчете. При ручном способе расчета отклонения распределяются наиболее равномерно, при автоматическом способе – наименее, т.к. алгоритм позволяет отклонение от диапазона только в местах, где это необходимо для соблюдения условий водоотвода.

Таким образом, полуавтоматическое построение картограммы с использованием приведенной модели представляет собой компромиссное решение, сочетающее в себе одновременно гладкость поверхности и минимизацию отклонений глубины реза от целевого диапазона и при этом экономящее время, необходимое для проведения подготовительных работ.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Васильев К.А., Бирюков О.Р., Алексеев С.В. Выбор способа устройства поперечного уклона проезжей части при ремонте автомобильной дороги / Материалы всероссийской конференции «Неделя науки ИСИ». 26–30 апреля 2021; СПб. ФГАОУ «СПбПУ», 2021. – С. 297–299. [Vasil'ev KA, Birjukov OR, Alekseev SV. Vybor sposoba ustrojstva poperechnogo uklona proezzhej chasti pri remonte avtomobil'noj dorogi. Materials of the All-Russian Conference "Nedelja nauki ISI". 2021 Apr 26-30; St. Petersburg. FGAOU SPbPU, 2021. pp. 297-299. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46294849> Ссылка активна на 29.04.2023.

2. Закон Санкт-Петербурга №163-34 от 11 апреля 2013 г. «О порядке ремонта и содержания автомобильных дорог в Санкт-Петербурге (с изменениями на 18 марта 2020 года)» [Law of St. Petersburg № 163-34 of 11 April 2013. “O porjadke remonta i sodержanija avtomobil'nyh dorog v Sankt-Peterburge (s izmenenijami na 18 marta 2020 goda)”. (In Russ.)]. Дата обращения: 29.04.2023. Режим доступа: <https://nra.gov.spb.ru/SpbGovSearch/Document/2079.html>
3. Лебедева А.К. Моделирование систем методами линейного программирования / Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Прикладная математика: современные проблемы математики, информатики и моделирования». 18–23 апреля 2022 года; Краснодар. Краснодар: ФГБУ "РЭА" Минэнерго России Краснодарский ЦНТИ – филиал ФГБУ "РЭА" Минэнерго России, 2022. – С. 317–321. [Lebedeva AK. Modelirovanie sistem metodami linejnogo programmirovaniya. Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists “Prikladnaja matematika: sovremennye problemy matematiki, informatiki i modelirovaniya”. 2022 Apr 18–23; Krasnodar. Krasnodar: FGBU "REA" Min`energo Rossii Krasnodarskij TsNTI – filial FGBU "REA" Min`energo Rossii 2022. pp. 317-321. (In Russ.)]. Ссылка активна на 29.04.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49529423>
4. Chew EP, Goh CJ, Fwa TF. Simultaneous optimization of horizontal and vertical alignments for highways. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1989; 5(23): 315–329. doi: 10.1016/0191-2615(89)90008-8
5. Artun A, Radaev AE, Badenko VL. Minimizing earthwork volumes by optimizing vertical alignment with linear programming algorithm. *Construction of unique buildings and structures*. 2019;7(82):7-13. doi: 10.18720/CUBS.82.1
6. Shewchuk J. An Introduction to the Conjugate Gradient Method Without the Agonizing Pain. 1994 Mar [cited 2023 Apr 29]. Available from: <https://people.eecs.berkeley.edu/~jrs/papers/cg.pdf>
7. Bertsekas D. P. Convex Optimization Theory. Belmont, Athena Scientific Publ., 2009. 444 p. [cited 2023 Apr 29]. Available from: http://web.mit.edu/dimitrib/www/Convex_Theory_Entire_Book.pdf
8. Нестеров Ю.Е. Методы выпуклой оптимизации. Москва: МЦНМО, 2007. [Nesterov JuE. *Metody vypukloj optimizatsii*. Moscow: MTsNMO, 2007. (In Russ.)]. Доступно по: <https://mipt.ru/dcam/upload/abb/nesterovfinal-arpgzk47dcy.pdf> Ссылка активна на: 29.04.2023.
9. Зайцев А.А., Курейчик В.В., Полупанов А.А. Обзор эволюционных методов оптимизации на основе роевого интеллекта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12 (113). – С. 7–12. [Zajtsev AA, Kurejchik VV, Polupanov AA. Obzorevoljutsionnyh metodov optimizatsii na osnove roevogo intellekta. *Izvestija JuFU. Engineering Sciences*. 2010;12(113):7-12. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_15553703_33238503.pdf Ссылка активна на: 29.04.2023.
10. Help and Documentation - MATLAB & Simulink. [Cited 2023 Apr 29]. Available from: <https://www.mathworks.com/help/simulink>
11. Справка и обучение по Excel. Ссылка активна на: 29.04.2023. Доступно по: <https://support.microsoft.com/en-us/excel>
12. Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Рыков С.А., Рыков В.А. Методы оптимизации в примерах в пакете MATHCAD 15, Часть III Многомерная оптимизация. Аналитические методы. СПб: ИТМО, 2018. [Rykov SV, Kudrjajtseva IV, Rykov SA, Rykov VA. *Metody optimizatsii v primerah v pakete MATHCAD 15, Chast'*

- III Mnogomernaja optimizatsiya. Analiticheskie metody.* St. Petersburg: ITMO, 2018. (In Russ.]. Доступно по: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/2359.pdf> Ссылка активна на: 29.04.2023.
13. Хабарова Д.С. Обзор программных комплексов многокритериальной оптимизации // Прикладная информатика. – 2013. – № 2(44). – С. 102–112. [Habarova DS. Obzor programmnykh kompleksov mnogokriterialnoy optimizatsii. *Prikladnaya informatika*. 2013;2(44):102-112. (In Russ.]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_18946985_85841042.pdf Ссылка активна на: 29.04.2023.
14. Свод правил №396.1325800.2018 от 1 августа 2018 г. «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования (с Изменениями N 1, 2)». [Body of rules №396.1325800.2018 of 1 August 2018. “Ulitsy i dorogi naselennykh punktov. Pravila gradostroitel'nogo proektirovaniya (s Izmenenijami N 1, 2)”. (In Russ.]. Дата обращения: 29.04.2023. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/81f/SP-396.pdf>
15. Ермошин Н.А., Романчиков С.А., Аверьянов Д.А. Имитационное моделирование риска разрушения дорожных конструкций в межремонтный период // Путевой навигатор. – 2022. – № 50(76). – С. 30–41. [Ermoshin NA, Romanchikov SA, Averianov DA. Imitatsionnoye modelirovaniye riska razrusheniya dorozhnykh konstruktсий v mezhremontnyy period. *Putevoy navigator*. 2022;50(76):30-41. (In Russ.]. Ссылка активна на: 29.04.2023. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48202390_88032815.pdf
16. Вавилов В.Е. Математическая модель гибридных систем магнитной левитации энерговырабатывающего оборудования автономных систем электроснабжения // Транспортные системы и технологии. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 97–108. [Vavilov VE. Matematicheskaya model gibridnykh sistem magnitnoy levitacii energovyabatyvayushchego oborudovaniya avtonomnykh sistem elektrosnabzheniya. *Transportation Systems and Technology*. 2016;2(3):97-108. (In Russ.]. doi: 10.17816/transsyst20162397-108

Сведения об авторах:

Федосеев Никита Александрович, магистрант, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 6857-7057; ORCID: 0000-0001-6104-9674;
E-mail: fedoseev.na@edu.spbstu.ru

Свальбова Вера Алексеевна, магистрант, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 7383-9132; ORCID: 0000-0002-3726-9359;
E-mail: svalbova.va@edu.spbstu.ru

Алексеев Сергей Викторович, кандидат военных наук, доцент, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;
E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

Information about the authors:

Fedoseev A. Nikita, master's degree student;
eLibrary SPIN: 6857-7057; ORCID: 0000-0001-6104-9674;
E-mail: fedoseev.na@edu.spbstu.ru

Svalbova A. Vera, master's degree student;
eLibrary SPIN:7383-9132; ORCID: 0000-0002-3726-9359;
E-mail: svalbova.va@edu.spbstu.ru

Alekseev V. Sergey, candidate of military sciences, associate professor,
eLibrary SPIN:6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;
E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

Цитировать:

Федосеев Н.А., Свальбова В.А., Алексеев С.В. Автоматизированный алгоритм составления картограммы фрезерования // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 66–82. doi: 10.17816/transsyst20239266-82

To cite this article:

Fedoseev NA, Svalbova VA, Alekseev SV. Automated algorithm for drawing up a milling cartogram. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):66-82. doi: 10.17816/transsyst20239266-82