
DOI: 10.53078/20778481_2021_4_37

УДК 621.95.01

М. Н. Миронова

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ СВЕРЛЕНИИ ОТВЕРСТИЙ

M. N. Mironova

TOOL PATH OPTIMIZATION WHEN DRILLING HOLES

Аннотация

Рассмотрены вопросы оптимизации траектории перемещения инструмента при сверлении отверстий. Для повышения производительности технологического процесса обработки отверстий разработан алгоритм поиска оптимальной траектории перемещения сверл, обеспечивающий сокращение вспомогательного времени, затрачиваемого на холостые перемещения. Для управления технологическим процессом сверления отверстий создана интеллектуальная система.

Ключевые слова:

оптимизация, сверление, траектория, холостой ход.

Для цитирования:

Миронова, М. Н. Оптимизация траектории перемещения инструмента при сверлении отверстий / М. Н. Миронова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – № 4 (73). – С. 37–44.

Abstract

The issues of tool path optimization when drilling holes are considered. To increase the productivity of the technological process of drilling holes, an algorithm has been developed to find the optimal drill tool path, which reduces the auxiliary time spent on idle movements. An intelligent system has been created to control the technological process of drilling holes.

Keywords:

optimization, drilling, tool path, idle movement.

For citation:

Mironova, M. N. Tool path optimization when drilling holes / M. N. Mironova // The Belarusian-Russian university herald. – 2021. – № 4 (73). – P. 37–44.

Введение

Управляя процессом механической обработки деталей машин необходимо принимать во внимание, что одним из важных критериев оптимизации является время, затрачиваемое на технологическую операцию. Для повышения экономической эффективности и производительности необходимо не только сокращать время выполнения рабочих ходов,

но и находить оптимальную траекторию перемещения режущего инструмента, уменьшая при этом вспомогательное время на холостые перемещения и смену инструмента.

С целью повышения производительности технологического процесса обработки отверстий перемещения инструментов должны выполняться по наиболее выгодному маршруту, при движении по которому вспомогательное

время, затрачиваемое на холостые перемещения, минимально.

Таким образом, задача оптимизации общей стратегии обработки представляет собой поиск оптимальной последовательности, по которой холостые движения, затрачиваемые на переход инструмента от отверстия к отверстию и на смену инструмента, привели бы к минимуму затрат времени с учетом минимального холостого перехода инструмента от одного участка к другому без смены сверла.

Однако следует отметить, что порядок обработки поверхностей заготовки, последовательность смены инструмента до сих пор определяются на основе личного опыта без применения современных методов моделирования и оптимизации. Зачастую количество вариантов последовательностей выполнения переходов значительно. Без применения специальных алгоритмов и программных средств перебор большого количества вариантов с полным анализом последствий выбора осуществить невозможно. С такой задачей легко могут справиться компьютерные программы, использующие технологии искусственного интеллекта.

Результаты и их анализ

В общем виде перемещения инструментов при обработке отверстий могут быть представлены в виде схемы (рис. 1). Из рис. 1 следует, что сверло перемещается с увеличенной скоростью подачи от точки O смены инструмента к начальной точке подхода I , расположенной в плоскости безопасности ($ПБ$). После этого сверло опускается до начальной точки врезания II , в которой происходит переключение приводов на скорость подачи резания и выполняется процесс врезания. Далее процесс формообразования происходит с режимами движения резания III . По завершении процесса резания сверло отводится из конечной позиции резания IV и переходит

в начальную точку возврата V с увеличенной скоростью подачи. При переходе к другому отверстию без смены инструмента (точка VI) сверло поднимается вертикально на «расстояние безопасности» в плоскость $ЛП$ над обрабатываемой поверхностью и находится по горизонтали на «расстоянии безопасности» от островов, полостей или стенок, которое обеспечивает работу шпинделя и инструмента без столкновений с заготовкой. При необходимости смены инструмента происходит подъём сверла в плоскость безопасности и его перемещение к точке O с увеличенной скоростью подачи.

Длина холостых перемещений l_i определяется расстоянием возврата сверла из конечной точки отвода к локальной поверхности безопасности, длиной обхода и длиной подвода в начальную точку следующего обрабатываемого отверстия (рис. 2).

Тогда длина l_i i -го холостого перемещения инструмента из конечной точки T_1 отвода V (см. рис. 2) с координатами (x_i, y_i, z_i) при обработке отверстия в начальную точку T_2 врезания (II) с координатами (x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}) следующего отверстия рассчитывается по формуле [1]

$$l_i = 2z_{lp} - z_i - z_{i2} + l_{xy_i}, \quad (1)$$

где z_{lp} – высота, на которой находится локальная плоскость безопасности; l_{xy_i} – расстояние между центрами обрабатываемых отверстий в плоскости XOY ,

$$l_{xy_i} = \sqrt{(x_i - x_{i2})^2 + (y_i - y_{i2})^2}, \quad (2)$$

где x_i, y_i – координаты x и y конечной точки отвода сверла соответственно; x_{i2}, y_{i2} – координаты x и y начальной точки врезания сверла при обработке следующего отверстия соответственно.

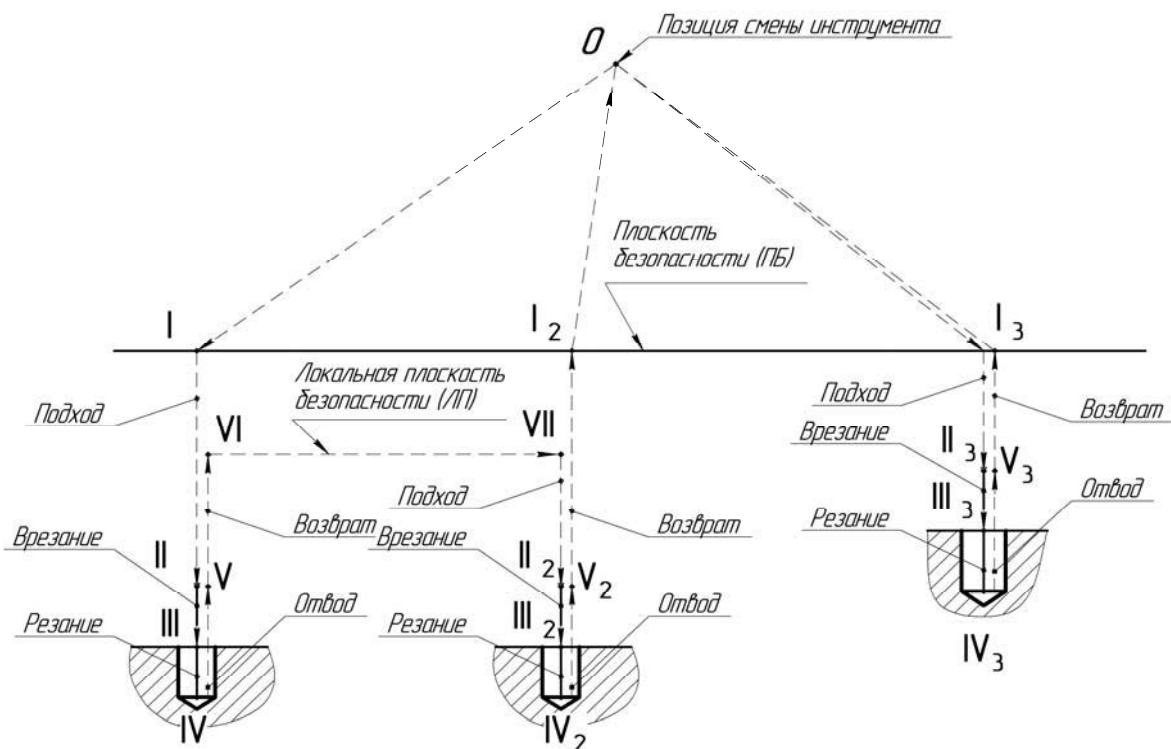


Рис. 1. Схема перемещений инструмента при обработке отверстий: O – позиция смены инструмента; $ПБ$ – плоскость безопасности, расположенная выше самой высокой области в геометрии детали; $ЛП$ – локальная плоскость безопасности, расположенная между двумя последовательно обрабатываемыми участками; $Подход$ (I) – перемещение инструмента с увеличенной скоростью подачи от плоскости безопасности в точку начала врезания II; $Врезание$ (II) – перемещение инструмента со скоростью подачи резания из конечной точки врезания в начальную точку резания III; $Резание$ (III) – перемещение со скоростью подачи резания, при котором инструмент имеет контакт с поверхностью заготовки; $Отвод$ (IV) – перемещение инструмента из конечной точки резания IV в начальную точку возврата V со скоростью подачи резания; $Возврат$ (V) – перемещение инструмента с увеличенной скоростью подачи из конечной точки отвода V в плоскость безопасности $ПБ$ или в локальную плоскость безопасности $ЛП$; $Обход$ (VI) – горизонтальное перемещение инструмента с увеличенной скоростью подачи от конечной точки возврата VI

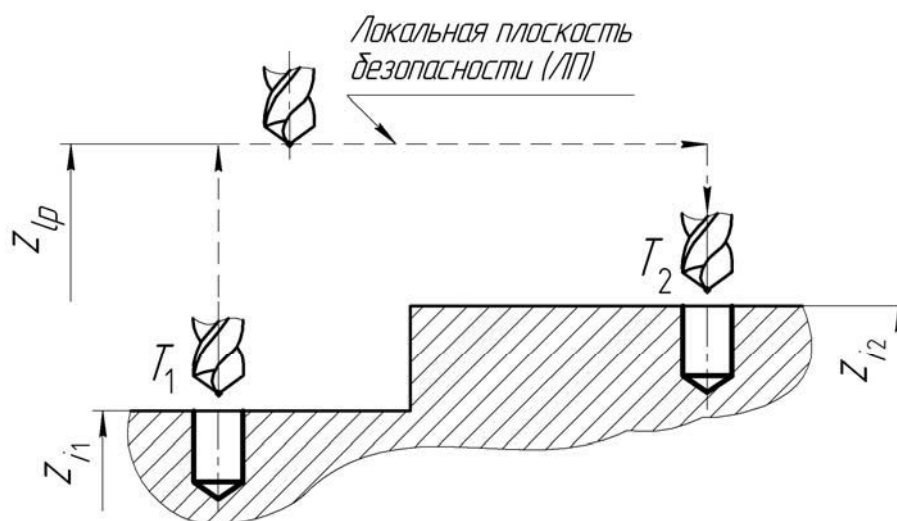


Рис. 2. Схема перемещений сверла при обработке нескольких отверстий

Очевидно, что управлять величиной l_i возможно за счет минимизации высоты z_{lp} .

Тогда минимальное значение l_i может быть выражено зависимостью

$$l_{i_{\min}} = 2z_{lp_{\min}} - z_{i_1} - z_{i_2} + \sqrt{(x_{i_1} - x_{i_2})^2 + (y_{i_1} - y_{i_2})^2}. \quad (3)$$

При обработке отверстий на станках с ЧПУ длина холостого перемещения при переходе инструмента от одного обрабатываемого отверстия к другому зависит от локальной безопасной высоты, на которую инструмент должен подняться. Безопасная высота обеспечивает осуществление перехода инструмента от участка к участку без столкновения инструмента с заготовкой или обработанной поверхностью детали.

Минимальное значение локальной безопасной высоты

$$z_{lp_{\min}} = z_k + h_z \quad (4)$$

где z_k – координата z вершины сверла при касании инструмента с заготовкой, мм; h_z – запасная высота, обеспечивающая отсутствие столкновений сверла с заготовкой или обработанной поверхностью детали, мм.

Проанализируем положение инструмента при движении на высоте z_k при касании обрабатываемой поверхности в точке $C(x_c, y_c, z_c)$.

При сверлении отверстий в сплошном металле высота z_k равна высоте точки касания C (рис. 3). Таким образом,

$$z_k = z_d = z_c. \quad (5)$$

Применительно к рассверливанию расчет z_k производится на основе построений, представленных на рис. 4.

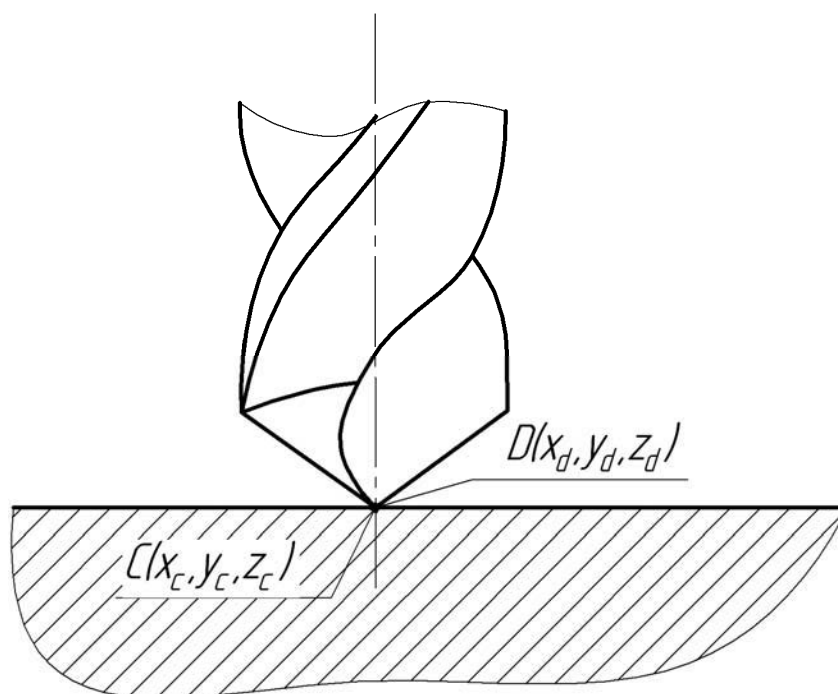


Рис. 3. Схема определения расчетной высоты точки касания инструмента с заготовкой

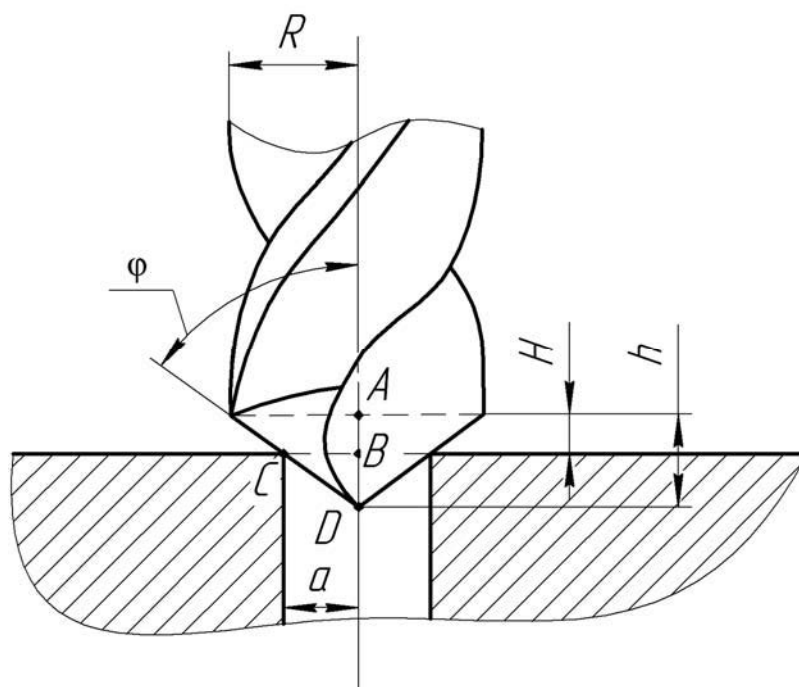


Рис. 4. Схема определения расчетной высоты вершины сверла при рассверливании отверстия: R – радиус сверла; H – расстояние от плоскости, в которой перемещается точка C , до вершины; h – высота конуса сверла; a – расстояние от точки C до оси вращения сверла; φ – угол в плане сверла

Для перехода сверла в безопасную зону при его смене или при переходе от одного отверстия к другому необходимо знать расстояние H (см. рис. 4), рассчитываемое по формуле

$$H = AD - BD = \frac{R}{\operatorname{tg}\varphi} - \frac{a}{\operatorname{tg}\varphi} = \frac{R - a}{\operatorname{tg}\varphi}. \quad (6)$$

При рассверливании отверстий координата z вершины сверла при касании инструмента с заготовкой

$$z_k = z_D = z_C - BD = z_C + AB - AD = z_C + H - h. \quad (7)$$

Подобным образом приводится расчет z_{kj} во всех случаях касания сверла с каждой из точек, принадлежащих контролируемой геометрии, в результате чего может быть определено множество $\{z_{kj}\}$. Далее определяется максимальное значение из множества $\{z_{kj}\}$,

которое является значением высоты z_k :

$$z_k = \max\{z_{kj}\}. \quad (8)$$

Таким образом, на основании найденной критической высоты, на которой сверло касается обрабатываемой поверхности, может быть определено минимальное значение длины l_i i -го холостого перемещения инструмента из конечной точки отвода обработанного отверстия в начальную точку врезания на последующем участке (см. рис. 2).

Применяя математическую модель, позволяющую определять положение локальной плоскости безопасности, можно получить множество минимальных значений длин холостых перемещений сверл при моделировании переходов обработки отверстий.

Очевидно, что управлять величиной l_i возможно за счет минимизации высоты z_{lp} .

Анализируя формулу (1), можно сделать вывод о том, что сократить время

на холостые перемещения инструмента возможно также за счет уменьшения расстояния между центрами обрабатываемых отверстий l_{xy_i} (см. рис. 2).

Расстояния между центрами обрабатываемых отверстий l_{xy_i} возможно минимизировать, управляя последова-

тельностью обработки отверстий.

Задача поиска оптимальной последовательности обработки отверстий может быть описана графом $G = (V, E)$ с множествами вершин $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ и ребер $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ (рис. 5).

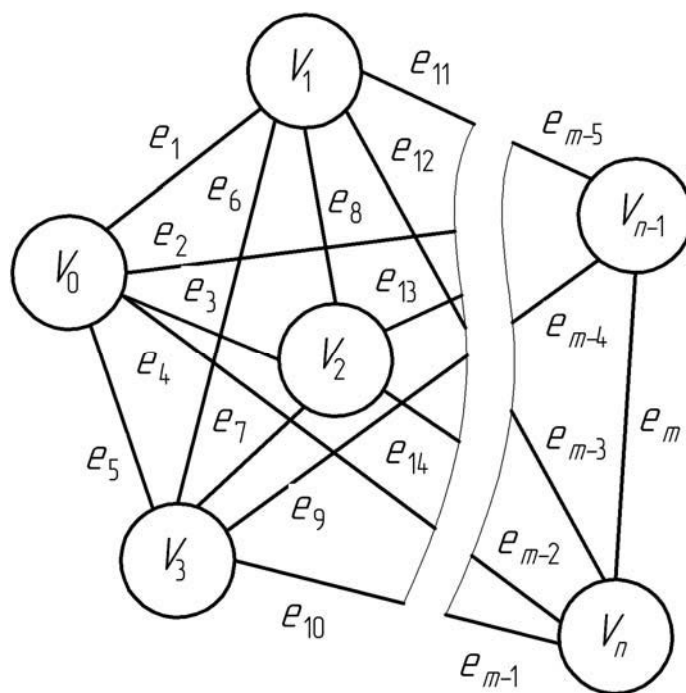


Рис. 5. Схема к решению задачи маршрутизации инструментов

При этом v_0 может ассоциироваться с позицией смены инструмента; v_1, \dots, v_n – обрабатываемые отверстия. Длины ребер e_1, e_2, \dots, e_m соответствуют расстояниям холостого перемещения между отверстиями.

С целью повышения производительности технологического процесса обработки отверстий необходимо найти маршрут сверл с минимальной суммарной длиной их холостых перемещений. Эти маршруты должны начинаться и заканчиваться в позиции смены инструмента v_0 , сверло должно проходить через каждый участок v_i только один раз. Кроме того, рабочее время у каждого сверла не должно превышать её задан-

ного периода стойкости T .

Задача такого рода может быть решена с помощью методов поиска оптимальной траектории перемещения режущего инструмента, которые можно разделить на три группы – точные алгоритмы, случайные и методы улучшения базового маршрута [2].

Основными точными методами являются алгоритм полного перебора, алгоритм Дейкстры, «жадный» алгоритм, «деревянный» алгоритм и др. Данные методы требуют большого объема вычислений, что приводит к длительному процессу нахождения оптимальных параметров [3].

Для определения глобальных экс-

тремумов сложных многоэкстремальных целевых функций могут использоваться методы случайного поиска, характеризующиеся небольшой продолжительностью нахождения оптимальных решений. К таким алгоритмам можно отнести метод ветвей и границ и метод Монте-Карло [4].

Задачу нахождения оптимальной траектории перемещения режущего инструмента можно решать методами улучшения базового маршрута, такими как метод перестановок, метод разворота петель, комбинированный метод.

Для поиска оптимальной траектории перемещения режущего инструмента может применяться любой из рассмотренных методов. Однако следует учитывать, что точные методы решения пригодны в случае небольшого количества обрабатываемых отверстий и дают оптимальный вариант. Приблизительные методы решения широко распространены в случае значительного количества обрабатываемых отверстий. При их использовании получаемое решение

приближается к оптимальному.

Следует отметить, что нельзя дать исчерпывающие рекомендации по применению того или иного алгоритма, т. к. его производительность зависит от вида целевой функции. Это означает, что необходимо проводить дополнительные исследования и отыскивать тот оптимизационный метод, который обеспечивает наибольшую эффективность с точки зрения точности решения и производительности поиска.

Для управления процессом сверления отверстий была создана интеллектуальная система DrillControl, состоящая из двух модулей (рис. 6):

- модуля определения оптимальных режимов резания, т. е. нахождения такого сочетания подачи и скорости резания, при котором обработка заготовки выполняется наиболее экономично при соблюдении требований к точности обработанных поверхностей [5];
- модуля оптимизации траектории холостых перемещений инструмента при обработке отверстий.

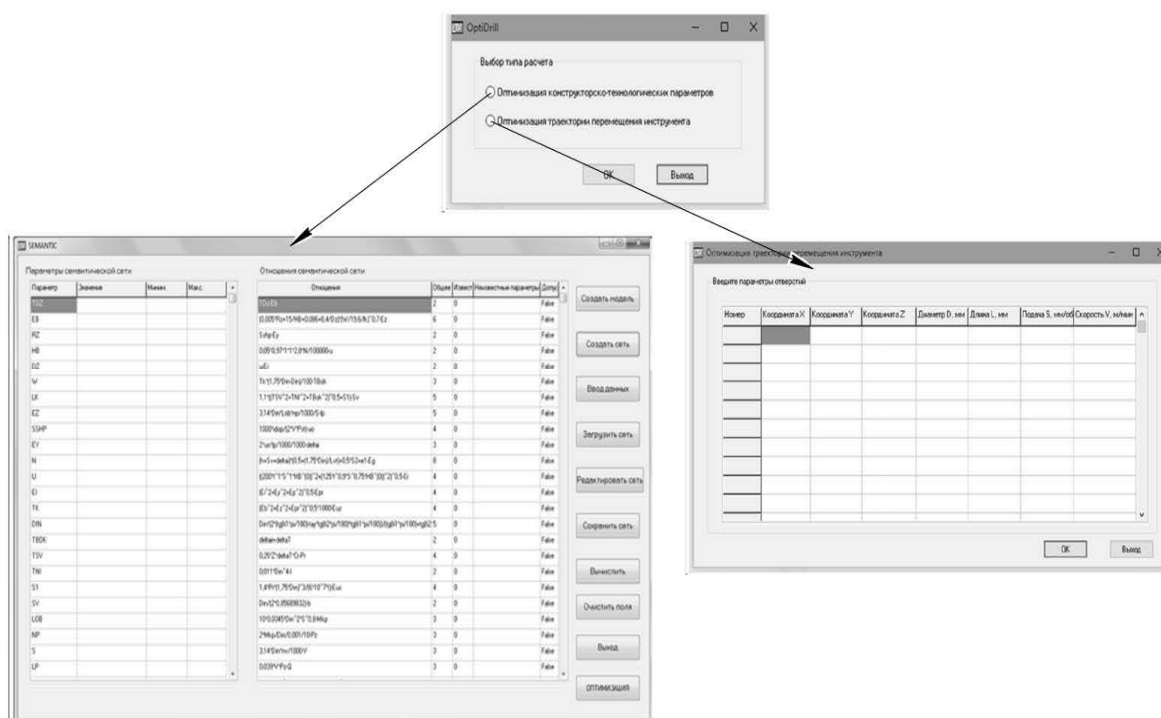


Рис. 6. Диалоговые окна интеллектуальной системы DrillControl

Для работы модуля оптимизации траектории холостых перемещений инструмента при обработке отверстий необходимо иметь входные данные, которые должны включать информацию о размерах режущего инструмента и о массиве точек с координатами (x, y, z) обрабатываемых отверстий.

Заключение

Для повышения производительности технологического процесса обработки отверстий разработан алгоритм поиска оптимальной траектории перемещения сверл, обеспечивающий сокращение вспомогательного времени, затрачиваемого на холостые перемещения.

При определении оптимального маршрута сверл вначале осуществляется поиск минимального холостого перемещения с учетом положения локальной плоскости безопасности для обрабатываемых отверстий, а затем определяется наиболее выгодная последовательность их обработки.

Использование разработанной системы позволяет исключить недопустимые варианты и выделить наиболее удачные решения, вследствие чего повысится их научная и инженерная обоснованность, а также качество управления технологическим процессом сверления отверстий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нгуев, В. Н.** Оптимизация холостых перемещений инструмента при фрезеровании сложных поверхностей на трехкоординатных станках с ЧПУ: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / В. Н. Нгуев. – Иркутск, 2015. – 164 с.
2. **Ефременко, А. И.** Алгоритмы оптимизации траектории перемещения режущего инструмента / А. И. Ефременко, М. Н. Миронова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 29–30 окт. 2020 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 34.
3. **Левитин, А. В.** Алгоритмы. Введение в разработку и анализ / А. В. Левитин. – Москва: Вильямс, 2006. – 576 с.
4. **Галкина, В. А.** Дискретная математика. Комбинаторная оптимизация на графах / В. А. Галкина. – Москва: Гелиос АРВ, 2003. – 232 с.
5. **Пашкевич, В. М.** Функциональные семантические сети для обеспечения точности механической обработки / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2015. – 200 с.

Статья сдана в редакцию 15 октября 2021 года

Марина Николаевна Миронова, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет.
E-mail: MironovaMN16@mail.ru.

Marina Nikolaevna Mironova, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University.
E-mail: MironovaMN16@mail.ru.