

УДК 65.011.4

Автоматизированная генерация решений по планировке цеха для токарных операций на основе оптимизации себестоимости продукции

Петухов Егор Денисович

Подчасов Евгений Олегович (научный руководитель)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены вопросы автоматизированного построения планировочных решений цехов токарной обработки на базе оптимизации себестоимости изделия. Предложена модель себестоимости, включающая затраты на механическую и термическую обработку, внутрицеховую транспортировку и хранение. Представлен алгоритм оптимизации расположения оборудования в цеху на основе дискретного разбиения цеха на участки стандартного размера. Рассмотрен алгоритм перестройки и сравнения проектных решений и элементы его реализации.

Ключевые слова: механическая обработка, техническое нормирование, производственный участок, планировка цеха, оптимальное проектирование

Введение. Рост промышленного производства в Российской Федерации за 2024 год по данным Росстата составил 4,6 %. Для обеспечения дальнейшего повышения интенсивности роста производства необходимо создание новых промышленных предприятий, в том числе заготовительных. Новые производства должны строиться на принципах оптимальности реализуемых технологических процессов, обеспечивая максимальную производительность, минимальную себестоимость или требуемое их сочетание. Разработка таких проектов требует согласованной работы группы инженеров различного профиля — от технологов до специалистов по организации труда.

Дефицит инженерных кадров на российском рынке труда по оценкам исследователей составляет порядка 600 тысяч вакансий, из них порядка 60 тысяч — инженеры-проектировщики и инженеры-технологии. Такой кадровый дефицит вызывает необходимость применения высокоэффективных средств автоматизации проектирования новых производств, их цехов и технологических линий.

Задача проектирования производственных участков и цехов включает в себя выбор типа и количества оборудования, схемы расположения участков и их оптимального взаиморасположения.

Допущения, принимаемые для проектирования цеха. Прототипирование системы автоматизированного проектирования цеха для модельной задачи, определяемой следующими допущениями:

– рассматривается технологический процесс получения правленых цилиндрических заготовок; все формообразующие операции представлены только продольным точением;

– технологические операции изготовления деталей разделены на три категории: формообразующие, термические, транспортные; каждая из операций выполняется на своем участке. В дополнение к участкам для выполнения операций, вводятся складские участки, для накопления заготовок для перекрывающихся операций;

– участки размещения технологического оборудования приняты равными по размеру, равномерно распределенными по помещению цеха. Размер участка нормируется по рабочей области участка механической обработки; за образец приняты типовые механообрабатывающие участки, описанные в работе [1]. Таким образом, всем производственным участкам присваивается равный размер 4×4 метра.

Оптимизация экономических параметров цеха. Расчет параметра цеха базируется на сокращении себестоимости получения изделия. Себестоимость изделия $C_{\text{изд}}$ складывается из себестоимости отдельных операций, таким образом

$$C_{\text{изд}} = C_{\text{мо}} + C_{\text{терм}} + C_{\text{трансп}} + C_{\text{хран}},$$

где $C_{\text{изд}}$ — себестоимость изделия; $C_{\text{мо}}$ — себестоимость механической обработки; $C_{\text{терм}}$ — себестоимость термической обработки; $C_{\text{трансп}}$ — себестоимость транспортировки; $C_{\text{хран}}$ — себестоимость хранения.

Себестоимость механической обработки рассчитывается по методике, приведенной в работе [2] и зависит от операционного времени получения изделия (включающего время рабочих и холостых ходов инструмента и время установки заготовки, в том числе и на использование подъемно-транспортного оборудования и промышленных роботов), доли штучно-калькуляционного времени, приходящегося на деталь (от установки инструмента, определяемое нормировочным справочником [3, 4], от времени технического обслуживания оборудования и времени отдыха, определяемых в долях от штучно-калькуляционного времени по стандартам), минутных ставок рабочих и среднетехнического персонала, а также включает амортизацию оборудования и стоимость электроэнергии.

Себестоимость термической обработки определяется стоимостью электроэнергии, потребной на проведение нагрева, и амортизации оборудования за время термической обработки, включая время нагрева до температуры рекристаллизационного отжига, время выдержки, и время остывания с печью.

Себестоимость транспортных операций определяется длиной траектории промышленного транспорта, его скоростью и номинальной скоростью транспортировки; тип применяемого транспорта при этом лимитируется массой детали.

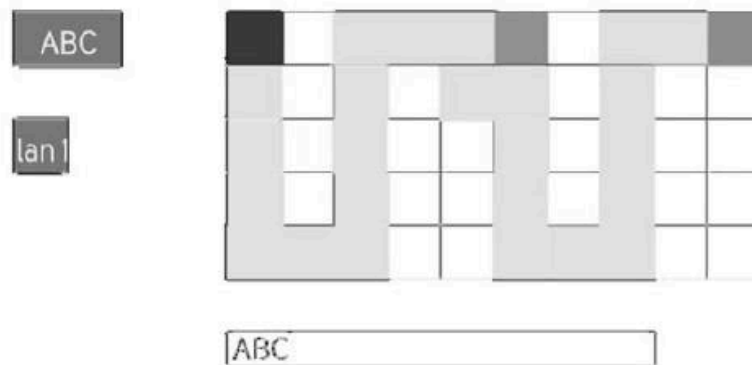
Себестоимость хранения изделий определяется числом задействованных зон хранилища и стоимостью обслуживания одной зоны.

Оптимизация топологии цеха. Начальным условием проектирования является размер цеха, вводимый пользователем (длина, ширина). Указанные размеры делятся на шаг ячейки с округлением вниз, что задает размерность

цеха $m \times n$. По заданной размерности цеха генерируется матрица ввода-вывода результатов.

Пользователь описывает технологический процесс, заполняя позиции в графическом окне (рисунок):

- 1) путем ввода значений параметров заготовки и детали в текстовые поля; нажатия на соответствующие ячейки в графическом окне в интерактивной форме для размещения технологических участков, интерактивно указывая ячейки прохождения маршрута транспортных операций;
- 2) указания препятствий на плане цеха.



Прототип окна планирования цеха

Указанные данные интерпретируются программно. Для интерпретации выполняются проверки на наличие минимального количества участков каждого типа для реализации операции и возможность размещения оптимального количества участков в заданном цеховом помещении.

В случае, если пользовательские данные соответствуют условиям проверки, они используются как начальное приближение в решении оптимизационной задачи.

Начальным условием выступает правило, что все технологические зоны должны быть связаны между собой ячейками транспортных операций, а линия транспортной операции не должна иметь внутренних разрывов. Размещенные в матрице цеха участки механообработки и термической обработки учитываются количественно, их число сохраняется в соответствующие константы программы, в рамках работы это количество при оптимизации цеха рассматривается как ограничение сверху. Данные о числе транспортных и складских ячеек сохраняются в памяти, но не используются в рамках оптимизации непосредственно как ограничения.

Для введенного пользователем оборудования проводится анализ его соответствия задействованной в процессе номенклатуре оборудования. В случае, если число единиц оборудования, введенных пользователем, является недостаточным для линейной организации тех процесса, пользователю выдается всплывающее окно с предупреждением о невозможности расчета

и просьбой добавить оборудование. Если рациональное число рабочих участков меньше, чем введенное пользователем количество рабочих мест, то лишние зоны, с максимальной суммой по координатам X и Y , удаляются с графического отображения и информация об их расположении и наличии стирается из матрицы.

Оптимизация расположения оборудования и линий транспортных операций производится путем уменьшения занимаемых зон цеха. Для поиска наикратчайшего пути зон транспортных операций реализован алгоритм BFR. Алгоритм последовательно проверяет все соседние клетки, начиная со стартовой позиции, и распространяется «волной» во всех направлениях. Это гарантирует, что первый найденный путь до цели будет иметь минимальное количество шагов. Найденное число шагов используется в качестве метрики размещения. Оптимальным считается такой вариант расположения оборудования, для которого значение метрики будет минимальным.

Заключение. В результате выполнения работы предложен алгоритм решения задачи оптимального построения цеха токарной обработки. Полученный алгоритм позволяет минимизировать одновременно себестоимость изделия и занимаемые цеховые площади. Его применение должно привести к снижению времени проектирования новых предприятий и повысить их рентабельность. Дальнейшее развитие работы заключается в совершенствовании программной реализации с целью возможности внедрения пользовательских баз данных оборудования, повышение быстродействия на задачах больших размерностей и расширения области применения на технологические процессы, отличные от токарной обработки [5].

Литература

- [1] Горохов В.А., Беляков Н.В., Схиртладзе А.Г. *Проектирование механосборочных участков и цехов*. Минск, Новое знание, 2014, 540 с.
- [2] Даниленко Б.Д., Зубков Н.Н. *Выбор режимов резания. Продольное точение. Сверление спиральными сверлами. Фрезерование концевыми фрезами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, 51 с.
- [3] Рюмцев А.А., Мурашко В.С. Информационное обеспечение решения задачи технического нормирования станочных работ на базе электронного каталога. *Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях. XVI Респуб. науч. конф.: матер.* Гомель, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, 2013, ч. 1, с. 218–219.
- [4] Рюмцев А.А. Разработка электронного каталога для решения задачи технического нормирования станочных работ в среднесерийном и крупносерийном производстве. *Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления. XIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых: материалы*. Гомель, Гомельский гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого, 2013, с. 37–40.
- [5] Афанасьев А.Н., Войт Н.Н. Автоматизация проектирования потоков работ в условиях промышленного предприятия. *Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2018). XVIII Междунар. молодеж. конф.: тр.* Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2018, с. 265–267.

Automated generation of workshop layout solutions for turning operations based on product cost optimization

Petukhov Egor Denisovich

Podchasov Evgeny Olegovich (*scientific advisor*)

BMSTU, Moscow, Russia

The study examines the automated development of workshop layout solutions for turning operations, optimizing product cost. A cost model is proposed, incorporating expenses related to machining, heat treatment, intra-workshop transportation, and storage. An algorithm for optimizing equipment placement within the workshop is presented, based on discretizing the workshop into standard-sized sections. Additionally, the paper discusses an algorithm for restructuring and comparing design solutions, along with key aspects of its implementation.

Keywords: lathe machining, scientific management, manufacturing unit, workshop layout, optimal design