

*Костенко Дмитрий Андреевич*¹,

аспирант;

*Хохловский Владимир Николаевич*²,

канд. техн. наук, доцент;

*Хрусталева Ирина Николаевна*³,

канд. техн. наук, доцент;

*Шкодырев Вячеслав Петрович*⁴,

директор высшей школы киберфизических систем и управления,

д-р техн. наук, профессор

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

^{1, 2, 3, 4} Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,

² hohlovskij_vn@spbstu.ru; ³ hrustaleva_in@spbstu.ru; ⁴ shkodyrev@mail.ru

Аннотация. Цель данной работы — предложить методику построения моделей производства, готовых для проведения дальнейшей многокритериальной оптимизации в автоматизированном режиме. На конкретных примерах показаны декомпозиция и оптимизация технологических процессов производства. Научная новизна состоит в применении существующих алгоритмов в комбинации с новым подходом к анализу предметной области. В результате составлено описание методики оптимизации сборочного и других типов производств.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, математическая модель, сборочное производство, эволюционные алгоритмы, операционные затраты, производительность, фронт Парето.

*Dmitriy A. Kostenko*¹,

Doctoral Candidate;

*Vladimir N. Khokhlovskiy*²,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

*Irina N. Khrustaleva*³,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

*Vyacheslav P. Shkodyrev*⁴,

Head of the Higher School of Cyber-Physical Systems and Control,

Doctor of Technical Sciences, Professor

MODELS AND ALGORITHMS OF MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION FOR AN ASSEMBLY WORKSHOP

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia, ² hohlovskij_vn@spbstu.ru; ³ hrustaleva_in@spbstu.ru;
⁴ shkodyrev@mail.ru

Abstract. The purpose of this work is to propose a methodology for constructing production models that are ready for further multi-objective optimization in an automated mode. Specific examples show the decomposition and optimization of

technological processes of production. The scientific novelty lies in the application of existing algorithms in combination with a new approach to the analysis of the subject area. As a result, a description of the methodology for optimizing assembly and other types of production has been compiled.

Keywords: multi-criteria optimization, mathematical model, assembly production, evolutionary algorithms, operational costs, productivity, Pareto frontier.

Введение

Для моделирования сборочного производства технологический процесс разбивается на минимальные структурные единицы — шаги. Для корректного конфигурирования технологических процессов и дальнейшей их оптимизации все шаги должны быть разделены на три категории [1, 2]: основные шаги (например, маркирование детали, закручивание болта, запрессовывание деталей), вспомогательные шаги (например, снятие/установка изделия в приспособление, очистка деталей/узлов от загрязнения, осмотр деталей перед сборкой), и обслуживающие шаги (например, транспортирование).

Первый этап работы, включающий разделение шагов на категории, позволяет провести детальный анализ технологического процесса на следующем за ним этапе многокритериальной оптимизации.

Основной задачей оптимизации является определение таких параметров технологического процесса, при которых доля вспомогательного времени в общем объеме производственного процесса была бы минимальной. Одним из основных параметров шага должно быть время его выполнения в зависимости от используемого инструмента и персонала.

1. Принципы построения моделей

Работа с моделями основана на следующих правилах, которые уточняют подход к разработке информационно-управляющей системы на основе унифицированного процесса проектирования [3]:

1. Отделение описания модели объекта управления от любых управляющих воздействий, которые связаны с реализацией функций управления.

2. Иерархичность моделей.

3. Альтернативность описания сущностей в рамках одной модели.

4. Отложенная интерпретация параметров и частичные вычисления над параметрами.

В стандарте [4] рассматриваются модели процедурного управления, реализующие процесс управления производственным процессом, физические модели, представляющие цеха и установки, а также технологические модели, определяющие технологический процесс. Физические модели представлены в виде иерархии «Предприятие — производственный объект — область производства — производственный цех — технологическая установка — блок оборудования — блок управления».

Вводятся следующие определения:

Сущность (целостный объект) оборудования (equipment entity): совокупность физической обработки управляющего оборудования, средств управления работой оборудования, сгруппированных вместе для выполнения отдельных функций управления или целостного набора функций управления.

Блок оборудования (equipment module): функциональная группа оборудования, выполняющая конечное число особых производственных действий нижнего уровня. Примеры действий: дозирование, взвешивание.

Технологическая установка (unit): Совокупность ассоциированных блоков управления и/или блоков оборудования (другого производственного оборудования), в которой могут быть реализованы одно или несколько главных производственных действий. Примеры действий: вступить в химическую реакцию, кристаллизоваться, раствориться.

Предполагается, что технологическая установка может быть задействована в одно и то же время только для изготовления одной партии изделий. Технологические установки функционируют независимо друг от друга.

Рассмотрим сущность оборудования, как показано на рисунке 1.

```
СУЩНОСТЬ_ОБОРУДОВАНИЯ Имя
  Свойство1: ТИП1;
  ...
  Операция1 (Параметр1:ТИП_ПАР1;...):ТИП_ВОЗВРАЩАЕМОГО_ЗНАЧЕНИЯ1;
  ...
ЗАВЕРШЕНИЕ_ОПИСАНИЯ_СУЩНОСТИ_ОБОРУДОВАНИЯ;
```

Рис. 1. Сущность оборудования

Описание может быть сделано на основе общих идей объектно-ориентированного проектирования и может включать имя сущности, ее свойства и операции. Сущность может включать альтернативы, которые оказываются доступны при реализации разных вариантов процедурного управления, как показано на рисунке 2.

```
СУЩНОСТЬ_ОБОРУДОВАНИЯ Имя
  Свойство1: ТИП1; // общие свойства
  ...
  ВЫБОР_ИЗ:
    АЛЬТ1:
      АльтСвойство1: АльтТИП1;
      ...
      АльтОперация1() :...
    ЗАВЕРШЕНИЕ_АЛЬТ1;
  ...
  Операция1 (Параметр1: ТИП_ПАР1;...):ТИП_ВОЗВРАЩАЕМОГО_ЗНАЧЕНИЯ1;
  ...
ЗАВЕРШЕНИЕ_ОПИСАНИЯ_СУЩНОСТИ_ОБОРУДОВАНИЯ;
```

Рис. 2. Альтернативы для сущности оборудования

Правило альтернативного описания сущности оборудования состоит в составлении конечного перечня разных возможностей реализации сущности физической модели. Поясним его на примере «Сверления», рисунок 3.

Наиболее важные для изложения части описания выделены жирным шрифтом. Последнее из указанных выше правил (отложенная интерпретация параметров и частичные вычисления над параметрами) [5] иллюстрируется выражением в вычислении параметра *ДлительностьОперации* = 5 * *Глубина* для альтернативы 1 и *ДлительностьОперации* = 1 * *Глубина* для альтернативы 2.

```

СУЩНОСТЬ_ОБОРУДОВАНИЯ Сверление
    Диаметр: INT;
    ТочностьПоДиаметру: INT;
    Глубина: INT;
    ТочностьПоГлубине: INT;
    ВЫБОР ИЗ:
        АЛЬТ1 РучнаяДрель1
            ДиаметрМин: INT; // параметры показывают возможности оборудования
            ДиаметрМах: INT;
            ТочностьПоДиаметру: INT;
            ДлительностьОперации: INT = 5 * Глубина;
            СтоимостьОборудования: INT = 5400;
            ВероятностьБрака: REAL = 0.04;
            КвалификацияРабочего: РАЗРЯД = 4;
        ЗАВЕРШЕНИЕ_АЛЬТ1;
        АЛЬТ2 СверлильныйСтанок1
            ДиаметрМин: INT; // параметры показывают возможности оборудования
            ДиаметрМах: INT;
            ТочностьПоДиаметру: INT;
            ДлительностьОперации: INT = 1 * Глубина;
            СтоимостьОборудования: INT = 1000 * КурсДоллара;
            ВероятностьБрака: REAL = 0.01;
            КвалификацияРабочего: РАЗРЯД = 4;
        ЗАВЕРШЕНИЕ_АЛЬТ2;
ЗАВЕРШЕНИЕ_ОПИСАНИЯ_СУЩНОСТИ_ОБОРУДОВАНИЯ;

```

Рис. 3. Правило альтернативного описания оборудования

Так как на этапе составления физической модели сверления длительность выполнения операции не фиксирована и зависит от параметра *Глубина*, в модель включено выражение, вычисление которого отложено и которое будет вычислено, когда на этапе составления алгоритма процедурного управления для конкретного технологического процесса будет известно значение глубины сверления. Как двойственную возможность для отложенного вычисления мы можем рассматривать частичные вычисления, пример которых показан в выражении для стоимости сверлильного станка: 1000 * *КурсДоллара*. Если зафиксирован курс доллара, то стоимость станка можно вычислить на данном этапе интерпретации физической модели.

С учетом возможностей сущностей физических моделей алгоритмы процедурного управления могут быть представлены как ориентированные графы, представляющие собой тот или иной технологический про-

цесс. Граф процедурного управления должен иметь один исток, один сток и не иметь циклов. Любое полное упорядочение вершин графа задаст цепочку операций и действий для распределения между технологическими установками. На этой базе может быть поставлена и решена задача многокритеральной оптимизации (МКО — по Парето).

2. Конфигурирование моделей

Блок логики и его программная реализация, ответственные за определение начальных вариантов структур моделей, называются Конфигуратором модели. Конфигуратор производит определение начальных вариантов структур производственных участков для следующих организационных форм (таблица 1) [1].

Таблица 1

Организационные формы производственного участка

Тип производства				
Единичное	Мелкосерийное	Среднесерийное	Крупносерийное	Массовое
Постовая сборка без расчленения сборочных работ		Постовая сборка с расчленением сборочных операций	Многопредметная поточная линия	
Постовая сборка с расчленением сборочных операций		Многопредметная поточная линия	Однопредметная поточная линия	

Для серийного производства большое значение имеют так называемые online и offline-подборки. Online-подборки собираются в процессе работы по основному техпроцессу, а offline-подборки собираются заранее и хранятся на складе.

Моделирование начинается с определения номенклатуры подборок, необходимых на каждой станции. Расчет суммарного времени изготовления подборок на всех уровнях выполняется по формуле 1:

$$T_l^{\text{сум}} = \sum_{j=1}^m t_i^m, \quad (1)$$

где i — номер уровня подборки; m — номер подборки i -го уровня;
 t — время изготовления m -й подборки i -го уровня.

Имея общее время изготовления подборок, по формуле (2) можно проверить возможность изготовления подборок для каждой станции online:

$$T_{\text{сум}}^i \cdot s \leq r \cdot l. \quad (2)$$

Здесь T — суммарное время изготовления подборок на i -й станции для одного изделия; r — ритм поточной линии; s — уровень распараллеливания i -й станции основной сборки; l — уровень распараллеливания i -й станции узловой сборки.

Если левая часть формулы (2) меньше или равна правой, все под сборки изготавливаются online.

В обратном случае из суммарного времени изготовления подборок на i -й станции исключается суммарное время изготовления подборок низшего уровня для рассматриваемой станции. Далее алгоритм повторяется до тех пор, пока левая часть формулы не станет меньше или равна правой. Подборки низшего уровня, исключенные из расчета, будут являться подборами offline. Данный расчет необходимо повторить для каждой станции.

Для полученного списка offline-подборок выполняется поиск оптимальной партии запуска по формуле (3):

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot S}{h}}, \quad (3)$$

где D — объем потребления ресурса (необходимое количество деталей/изделий) в плановом периоде; h — затраты, обусловленные хранением единицы запаса в течение всего планового периода; S — затраты на переналадку технологического оборудования.

Процесс конфигурирования структуры производственного участка состоит из нескольких этапов.

Ввод исходных данных. Для производства, проектируемого с нуля, это технологический процесс, общее количество станций для сборки, стоимость ресурсов (CAPEX, OPEX) и объем выпускаемой продукции. Для реинжиниринга существующего производства к вышеперечисленным добавляется количество ветвлений для каждого типа оборудования (иначе говоря, число станций, которые могут выполнять сборку параллельно).

Предварительный этап конфигурирования. Здесь принимаются в расчёт объем выпускаемой продукции, затраты на логистику и затраты на переналадку технологического оборудования. На основании этого выполняются следующие расчёты:

1. Определение типа производства,
2. Определение организационных форм производственного участка в зависимости от выбранного типа производства,
3. Расчет оптимальной партии запуска.

Основной этап конфигурирования. Используется оптимальный размер партии запуска, рассчитанный на предыдущем этапе, и данные из базы данных по длительности шагов техпроцесса.

Основной этап дополнительно запрашивает следующие параметры:

1. Эффективный фонд времени за плановый период (с учетом продолжительности рабочих смен, коэффициента сменности работ, праздничных и выходных дней и т. д.).

2. Количество изделий, подлежащих выпуску в плановый период времени.

На основании этого вычисляются следующие показатели:

1. Ритм поточной линии.
2. Структура производственного участка.
3. Тип движения предметов труда.
4. Величина передаточной партии.
5. Структура технологических операций (распределение шагов по станциям).
6. Количество узловых станций.
7. Перечень online-сборок и offline-сборок.
8. Величина оптимальной партии запуска каждого типа offline-сборок в производство.
9. Периодичность запуска offline-сборок.

На **заключительном этапе конфигурирования** определяются итоговые параметры нового техпроцесса, а именно длительность производственного цикла, технологическая себестоимость и качество продукции (оценочно).

3. Подход к МКО и пример

Чтобы проиллюстрировать пример реализации МКО, рассмотрим фрагмент технологии сборки, представленный в таблице 2. Более полное описание технологии может содержать несколько сотен аналогичных шагов. В таблице 2 представлены операции и предложены варианты выполнения с использованием различного оборудования.

Таблица 2

Фрагмент технологии сборки			
№ шага	Операция	Управляемый параметр	Варьируемые параметры
1	Затянуть болты	Управляемый параметр: Метод заворачивания Заворачивание гаечным ключом Заворачивание торцевым ключом Заворачивание коловоротным ключом Заворачивание многошпindelным гайковертом	Четыре параметра
2	Нанести герметик	Управляемый параметр: Метод нанесения покрытия Кисть Масленка Пульверизатор	Три параметра

Так как каждая единица оборудования обладает уникальными параметрами, влияющими на стоимость и скорость работы, оптимизация заключается в выборе наиболее подходящего инструмента для каждого шага.

Зная свойства оборудования, можно составить сводную таблицу эффективности инструментов для каждой операции (см. табл. 3).

Таблица 3

Параметры оборудования

Операция	№	Оборудование	Время выполнения (сек.)	Тех. себестоимость (руб.)	Стоимость работы с инструментом (руб.)
Затянуть болты	1	Гаечный ключ	15	75	0
	2	Торцевой ключ	10	80	30
	3	Коловоротный ключ	8	85	45
	4	Многошпиндельный гайковёрт	6	90	60
Нанести герметик	1	Кисть	20	100	0
	2	Маслёнка	12	60	5
	3	Пульверизатор	4	30	15

На основании этого можно составить список всех возможных вариантов выбора оборудования и рассчитать их стоимость и время выполнения. Так получается поле всех решений, фрагмент которого представлен в таблице 4.

Таблица 4

Фрагмент списка альтернатив инструмента

№ варианта	Комбинация	Время выполнения (сек.)	Стоимость (руб.)
1	1, 1	35	175
2	2, 1	30	210
3	2, 2	22	175
4	3, 2	20	195
5	4, 2	18	215

Подготовив таким образом исходные данные, можно использовать любой алгоритм МКО для построения фронта Парето. Для простоты проверки был использован метод прямого перебора, чтобы построить фронт Парето (рис. 4).

В связи с большой размерностью задач, представляющих практический интерес, полный перебор для их решения невозможен. Известны алгоритмы (например, NSGA-2 [6]), которые рассматриваются как эффективные в подобных задачах и которые планируются для реализации.

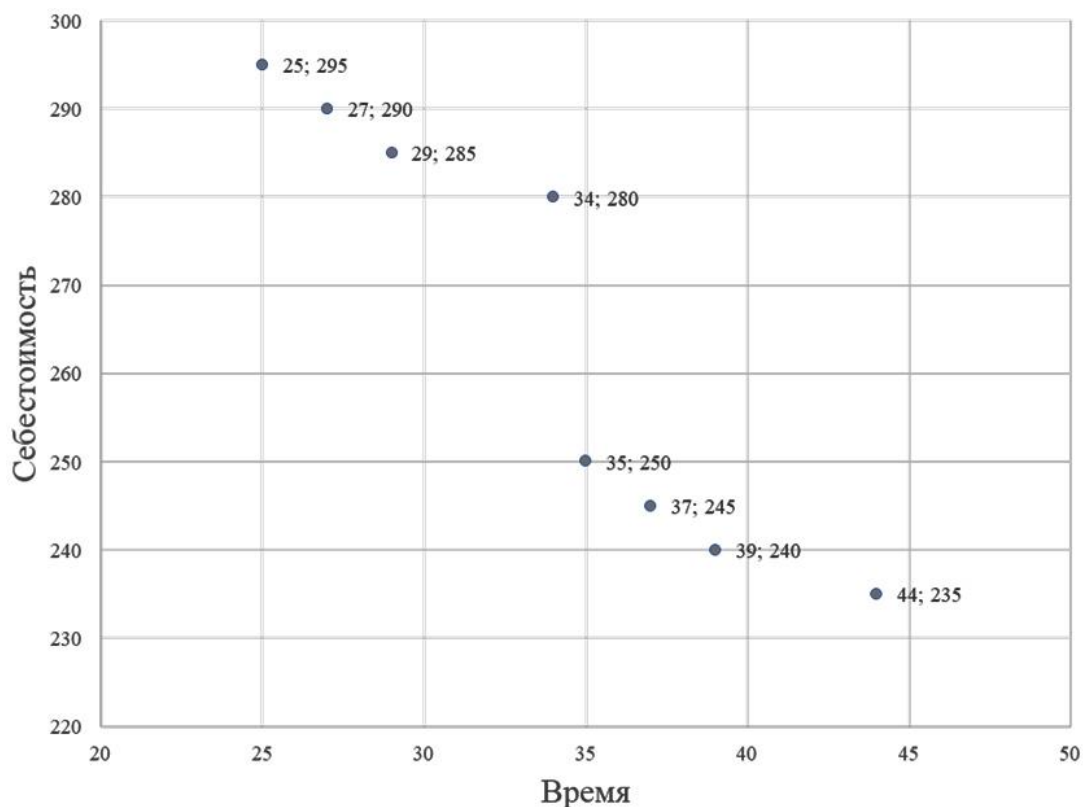


Рис. 4. Фронт Парето

Заключение

Как показали проведенные эксперименты, предложенная методика позволяет эффективно провести декомпозицию производственного процесса, отразить его в компьютерных моделях и на основе полученных моделей выполнить многокритериальную оптимизацию. МКО выполнялась методом прямого перебора, но он может быть заменен на более быстрые алгоритмы, такие как NSGA-2.

Хотя параметры, необходимые для учета времени сборки и количества произведенных единиц, могут быть учтены и переданы для обработки без лишних затруднений, ряд показателей, таких как качество производимой продукции, не могут быть получены для анализа просто и однозначно. Вопросы, связанные с расширением возможностей МКО и включением более двух целевых функций, будут отражены в последующих публикациях.

Список литературы

1. Хрусталева И.Н., Любомудров С.А., Романов П.И. Имитационная модель технологической подготовки производства цеха механической обработки // Научно-технические ведомости СПбПУ. Сер.: Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 23, № 2 – 8 с.

2. Козарь И.И., Колодяжный Д.Ю., Радкевич М.М., Цимко Т.А. Математическая модель погрешности при точении труднообрабатываемых сплавов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – №2(195). – С.194–201.

3. Khokhlovskiy V., Oleinikov V., Shkodyrev V. Development of control automation for energy objects based on the unified process approach // A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov (eds.) Advances in Automation II. RusAutoConf 2020. Lecture Notes in Electrical Engineering. – Springer, 2021. – Vol. 729.

4. ГОСТ Р МЭК 61512-1-2016. Национальный стандарт Российской Федерации. Управление серийным производством. Часть 1. Модели и терминология.

5. Нариньяни А.С. Введение в недоопределенность // Проблемы информатики, Ч. 1. 2018. – №3. – С. 1–21; Ч. 2. 2019. – № 1. – С.61–82.

6. Kazimipour B., Li Xiaodong, Qin Kai. A review of population initialization techniques for evolutionary algorithms // Proceedings of the 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2014. July 6-11, 2014, Beijing, China. – IEEE, 2014. – Pp. 2585–2592. – DOI: 10.1109/CEC.2014.6900618.