

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

УДК 338.24



**В.В. Баранов<sup>1</sup>, М.М. Молева<sup>2</sup>, М.В. Баранов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,

<sup>2</sup>Военный университет имени князя Александра Невского Министерства обороны РФ,

<sup>3</sup>Ярославский государственный технический университет

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ

В статье рассматривается задача формирования оптимальной производственной программы структурного подразделения машиностроительного предприятия. Для целей автоматизации процесса решения задачи разработан программный продукт, реализующий математическую модель и эвристический алгоритм выбора ассортиментного ряда из потенциально допустимого для включения в программу ассортимента изделий.

Машиностроительное предприятие, диверсифицированное производство, производственная программа, ассортимент, эвристический алгоритм, высокоуровневый язык Python, программный код.

В условиях усиления конкурентной борьбы российские предприятия заинтересованы в активизации факторов, обеспечивающих динамичный рост доли рынка, которая контролируется предприятием. Одним из таких факторов становится кастомизация, приводящая к расширению производственной диверсификации. Это достигается за счет воздействий на ассортиментную политику путем изменения ассортимента производимой продукции.

Однако изменение производственной диверсификации, приводящее к расширению ассортимента производимой предприятием продукции, приводит к необходимости проектирования производственных структур с высоким уровнем гибкости. В этих структурах, обладающих способностью перехода с минимально возможными затратами времени на выпуск других позиций ассортимента продукции, полезный фонд времени работы оборудования по сравнению со структурами массового и крупносерийного производства уменьшается. Это происходит вследствие увеличения суммарных затрат времени на переналадку технологического оборудования.

Поэтому в производственных структурах диверсифицированного производства возникает задача формирования оптимальной программы выпуска. Такая программа должна отвечать ряду требований. Во-первых, обеспечивать фактические коэффициенты загрузки технологического и вспомогательного оборудования структуры не ниже запланированного уровня и в то же время не приводить к перегрузке оборудования, поскольку это может отрицательно сказаться как на качестве выполняемых технологических операций, так и на конечных результатах функционирования структуры. Во-вторых, сформированная оптимальным образом производственная программа должна обеспечивать по заранее выбранным критериям наилучшее сочетание таких характеристик программы, как суммарный объем выпуска по всем

позициям ассортиментного ряда, включенного в программу, и суммарными затратами времени на переналадку технологического оборудования при переходе на обработку различных позиций ассортимента.

Поэтому задача формирования оптимальной программы выпуска для структур диверсифицированного производства является актуальной и отвечает потребностям российских предприятий, осуществляющих свою деятельность в условиях, когда гибкое реагирование на потребительские предпочтения становится ключевым фактором эффективной деятельности предприятия. Ориентация на инструментарий, позволяющий оперативно воздействовать на ассортиментную политику путем автоматизации процессов выбора позиций ассортимента для их включения в структуру производственной программы, позволяет обеспечить устойчивое функционирование предприятия в условиях высокой турбулентности и неопределенности внешней среды.

В статье предлагается математическая модель и разработанное для реализации модели программное обеспечение, позволяющее автоматизировать решение задачи выбора оптимальной программы выпуска производственной структуры машиностроительного предприятия. Данная задача рассматривается нами в предположении, что технологическое оборудование структуры, выполняя операции механообработки, производит не законченный товарный продукт, а изделия, используемые другими производственными подразделениями предприятия.

#### Существующие подходы к решению поставленной задачи

Применению математического инструментария в задачах, связанных с моделированием процессов производства и управления, посвящены труды зарубежных ученых Р. Солоу, Ч. Кобба и П. Дугласа, Дж.М. Кейнса, Е. Домара и Р. Харрода, П. Самуэльсона, Д. Хикса и ряда других. Существенный вклад в развитие методов и практики применения инструментария математического

моделирования внесли такие отечественные ученые, как А.В. Колемаев, И.М. Соболев, В.Л. Макаров, А.М. Рубинов, М.И. Левин, С.А. Ашманов, А.В. Лотов, В.А. Ильина, В.В. Федоров и другие.

Отечественные и зарубежные авторы отмечают, что одной из важнейших задач планирования в условиях конкурентного рынка становится формирование производственной программы. Решение этой задачи предполагает определение ассортимента и объема продукции, которая должна быть произведена. В работе [1] отмечается, что в ситуации, когда предприятие ориентировано на максимизацию прибыли, при выборе ассортимента приоритет необходимо отдавать таким видам продукции, выпуск которых требует минимально возможного количества оборудования различных типов и обеспечивает минимизацию времени обработки.

В работе [2] анализируется ассортиментная политика машиностроительного предприятия и выявляются внешние и внутренние факторы, влияющие на спрос машиностроительной продукции. Ассортиментную политику авторы предлагают рассматривать не изолированно, а как составляющую конкурентной стратегии предприятия, включая анализ производственного процесса, портфеля заказов, уровня использования основных и оборотных средств и т.д.

Вопросы автоматизации производственных и управленческих процессов российских производственных предприятий на основе использования информационных систем различных классов, включая ERP- и MES-системы, рассматриваются в работах Е.Б. Андреева, Е.В. Немурова, С.И. Пестрецова и ряда других отечественных авторов. В работе [3] дается анализ возможностей MES-систем и их влияния на устойчивость развития промышленного предприятия, в работе [4] исследуются возможности применения различных информационных систем в рамках ИПИ(CALS)-стратегии машиностроительного предприятия, а в работе [5] рассматривается применение информационных систем класса Business Intelligence на современных высокотехнологичных предприятиях.

Однако несмотря на достаточно широкое применение математического моделирования и информационного менеджмента в сфере решения задач управления производственной деятельностью, для промышленного предприятия актуальной является задача создания прикладного информационного обеспечения, учитывающего специфику формирования производственной программы структурными подразделениями предприятия.

#### **Применяемый метод решения поставленной задачи**

Задача формирования оптимальной программы выпуска изделий производственным подразделением машиностроительного предприятия в статье рассматривается как задача дискретного программирования. Задачи подобного класса предполагают нахождение оптимального значения функции на конечном множестве. Для решения рассматриваемой в статье задачи предложены математическая модель и эвристический алгоритм, позволяющий получить квазиоптимальное решение, которое является достаточно близким к оптимальному варианту. Для целей автоматизации решения поставленной задачи с использованием высокоуровне-

вого языка программирования общего назначения Python разработан программный код. Его применение позволяет сократить время формирования программы для производственного подразделения машиностроительного предприятия.

#### **Математическая модель выбора оптимальной программы выпуска изделий производственной структуры машиностроительного предприятия**

В идеале сформированная оптимальным образом производственная программа должна обеспечить максимальный объем выпуска продукции (в пределах имеющегося у технологического оборудования производственной структуры фонда времени) и минимальную величину суммарных затрат времени на переналадку этого оборудования [6]. Однако в реальной ситуации одна и та же позиция ассортимента может характеризоваться как максимальным значением объема выпуска, так и максимальным значением затрат времени на переналадку оборудования. Поэтому при формировании программы выпуска необходим поиск компромисса между этими характеристиками продукции, претендующей на включение в производственную программу.

Программа выпуска изделий отдельной производственной структуры определяется исходя из портфеля заказов на продукцию машиностроительного предприятия в целом, а затраты времени на переналадку являются функцией характеристик технологического оборудования, входящего в состав этой структуры. Поскольку производимые структурой изделия не являются законченным товарным продуктом, стоимостные показатели изделий в предлагаемой нами математической модели не учитываются.

Суммарная величина выпуска изделий технологическим оборудованием производственной структуры в данной задаче рассматривается как функция нескольких переменных. В качестве этих переменных выступают ассортимент изделий и объем их выпуска по каждой позиции ассортимента, а также затраты времени на переналадку технологического оборудования структуры. Варьируя эти переменные, можно управлять производительностью структуры и коэффициентами загрузки ее производственных мощностей.

Согласно предлагаемой в статье математической модели, сформированную для производственной структуры машиностроительного предприятия программу выпуска изделий следует считать оптимальной, если она позволяет в рамках имеющегося у оборудования фонда времени достичь наилучшего соотношения между суммарными величинами объема выпуска изделий и затратами времени на переналадку оборудования. Для выбора такого соотношения предлагается использовать эвристический алгоритм, применение которого дает возможность получить квазиоптимальное решение рассматриваемой задачи.

Математическая модель основана на распределении фонда времени технологического оборудования производственной структуры машиностроительного предприятия на две составляющие. Первая составляющая отражает затраты времени на выпуск изделий, а вторая составляющая характеризует временные затраты на переналадку оборудования структуры. В модели номер ассортимента производимого изделия

обозначен индексом  $i$ , а весь ассортимент – индексом  $I$ . Объем выпуска изделий по  $i$ -ой позиции ассортимента представлен в модели величиной  $W_i$ , а затраты времени на переналадку оборудования, обусловленные переходом на выпуск  $i$ -ой позиции ассортимента, –  $T_i^{пер}$ . При разработке модели нами сделано предположение, что такт выпуска изделий ( $T^{вып}$ ) не зависит от их позиции в ассортиментном ряде ( $i$ ). Для формализации включения изделий ( $W_i$ ) и затрат времени на переналадку оборудования ( $T_i^{пер}$ ) использована логическая булева функция ( $\beta$ ). Значение этой функции равно единице для тех позиций ассортиментного ряда, которые включаются в программу выпуска, для остальных позиций ассортимента значение логической булевой переменной равно нулю. Суммарный фонд времени оборудования структуры машиностроительного предприятия в модели обозначен параметром  $F$ .

Тогда математическая модель, отражающая соотношение между временными параметрами функционирования технологического оборудования производственной структуры машиностроительного предприятия, будет иметь следующий вид:

$$T^{вып} \sum_{l=1}^I \beta_l W_l + \sum_{l=1}^I \beta_l T_l^{пер} \leq F. \quad (1)$$

Используя это соотношение, для структуры машиностроительного предприятия требуется выбрать ассортимент изделий, включение которых в производственную программу обеспечит максимум затрат времени, связанных с изготовлением этих изделий. Это будет означать максимизацию производственных возможностей рассматриваемой структуры, что предполагает достижение максимума целевой функции следующего вида:

$$\sum_{l=1}^I \beta_l W_l \rightarrow \max. \quad (2)$$

Практическая реализация эвристического алгоритма предусматривает анализ потенциального потока заказов на изделия, которые могут быть произведены производственной структурой машиностроительного предприятия на имеющемся технологическом оборудовании. По результатам анализа формируется упорядоченное (по объемам выпуска и затратам времени на переналадку оборудования) множество ассортимента изделий.

Упорядоченное множество ассортимента изделий представляет собой столбец, элементы которого формируются на основе двух встречных процессов «сверху вниз» и «снизу вверх». Процесс «сверху вниз» реализуется путем включения в упорядоченное множество позиций ассортимента, исходя из приоритета максимального объема выпуска изделий. При реализации процесса «снизу вверх» приоритет отдается максимальному значению затрат времени на переналадку оборудования структуры машиностроительного предприятия.

Тогда первым элементом упорядоченного множества будет являться изделие с максимальным объемом выпуска (при этом затраты времени на переналадку оборудования значения не имеют). Последним элементом из оставшегося множества будет изделие, об-

работка которого характеризуется максимальными затратами времени на переналадку оборудования (при этом объем выпуска этого изделия значения не имеет). После того как будут рассмотрены все элементы исходного множества ассортимента изделий, формирование упорядоченного множества прекращается.

На основе упорядоченного множества ассортимента изделий для структуры машиностроительного предприятия формируется оптимальная программа выпуска. Процесс формирования предполагает включение в программу элементов упорядоченного множества до того момента, пока в соответствии с формулой (1) для имеющегося у структуры оборудования не будет исчерпан фонд времени его работы.

### **Программное обеспечение решения задачи выбора оптимальной программы выпуска изделий производственной структуры машиностроительного предприятия**

Созданная математическая модель была положена в основу разработки программного продукта, который, используя несколько массивов исходных данных, позволяет автоматизировать процесс формирования программы выпуска изделий производственным подразделением машиностроительного предприятия. Программный продукт обеспечивает перебор потенциально допустимых вариантов программы выпуска изделий, их сравнение и выбор наилучшего варианта программы. Существенным достоинством программного продукта является простота использования и кроссплатформенность. Благодаря консольному виду программы ее запуск возможен на большинстве видов современных ЭВМ.

Для решения задачи автоматизации формирования производственной программы использован высокоуровневый язык программирования общего назначения Python [7]. Использование этого языка дает возможность программному продукту функционировать на разных платформах, включая Windows, Linux, MacOS и т.д. Необходимым условием запуска программного продукта является наличие консоли.

В процессе реализации программного кода был создан ряд функций, которые отвечают за сбор, формализацию данных, их обработку и последующий вывод в консоль. Для удобства ввода значений программный продукт реализует поэтапный диалог с пользователем (рис. 1).

введите фонд времени

3200

введите такт работы оборудования

0.5

введите ассортимент изделий

10

Рис. 1. Поэтапный диалог с пользователем

В процессе диалога у пользователя запрашиваются значения таких параметров, как ассортимент потенциально допустимых для включения в программу выпуска изделий, фонд времени и такт работы технологического оборудования. На каждом этапе при вводе некорректного значения программный продукт выводит ошибку и просит ввести значение заново (рис. 2).

```

введите фонд времени

23sd3

Введено некорректное значение, повторите ввод

```

Рис. 2. Анализ введенных данных

После этого пользователю предлагается в соответствии с указанным ассортиментом через пробел

ввести объем выпуска изделий для каждой позиции ассортимента и затраты времени на переналадку технологического оборудования. Каждое введенное пользователем значение анализируется на корректность. После чего функция инициализации разбивает введенные через пробел данные по двум массивам. Фрагмент кода представлен на рисунке 3.

На следующем этапе пользователь проверяет введенные им данные и в случае обнаружения ошибок может либо удалить строку целиком, либо исправить обнаруженные ошибки (рис. 4).

В соответствии с введенной цифрой в консоль будут выполняться соответствующие функции. Для цифры 1 – delete(), для 2 – repl(). В первом случае вводится строка, которую нужно убрать, после чего соответствующие значения удаляются из массива. Во втором случае в выбранной пользователем строке будут записаны новые значения, введенные в терминал через пробел. Фрагменты кода представлены на рисунках 5 и 6.

```

1  def initialization(i):
2
3      while len(Q) < i:
4          print('\nчерез пробел введите объем выпуска продукции и затраты времени на переналадку \n')
5          data = input().split(" ")
6
7          try:
8              T.append(float(data[1]))
9              Q.append(int(data[0]))
10         except ValueError:
11             print('Введено некорректное значение, повторите ввод\n')
12         except IndexError:
13             print('Введено некорректное значение, повторите ввод\n')
14

```

Рис. 3. Функция initialization()

```

проверьте введенные вами значения:

1 500 40.0
2 570 32.0
3 620 18.0
4 660 56.0
5 320 74.0
6 790 31.0
7 910 48.0
8 240 59.0
9 527 63.0
10 934 88.0

если хотите удалить строку введите 1, если хотите заменить строку введите 2, если все введено верно - введите 0

```

Рис. 4. Проверка пользователем введенных значений

```

19
20 def delete():
21     print('\nвведите номер строки, которую хотите удалить \n')
22
23     while ok:
24         try:
25             a = int(input())
26         except ValueError:
27             print('\nвведено некорректное значение, повторите ввод\n')
28         else:
29             break
30
31     Q.pop(a - 1)
32     T.pop(a - 1)
33     print('строка номер', a, 'удалена\n')
34

```

Рис. 5. Функция delete()

```

36 def repl():
37     print('введите номер строки: ')
38     while ok:
39         try:
40             a = int(input())
41         except ValueError:
42             print('\nвведено некорректное значение, повторите ввод\n')
43         else:
44             break
45     print('через пробел введите новые значения объема выпуска продукции позиции и затрат времени на переналадку: \n')
46     while ok:
47         b = input().split(" ")
48         try:
49             T[a - 1] = float(b[1])
50             Q[a - 1] = int(b[0])
51         except ValueError:
52             print('введено некорректное значение, повторите ввод\n')
53         except IndexError:
54             print('введено некорректное значение, повторите ввод\n')
55         else:
56             break
57     print('строка номер', a, 'заменена')

```

Рис. 6. Функция repl()

Формирование программы выпуска происходит после того, как пользователь вводит ноль в окно консоли, что эквивалентно команде «рассчитать». Алгоритм создает два массива, связанных между собой по значениям индексов. Первый массив состоит из данных, отражающих объемы выпуска по каждой позиции ассортимента, а второй массив характеризует затраты времени на переналадку технологического оборудования при его переходе на изготовление изделий по другой позиции ассортимента.

Затем алгоритм реализует операции поочередного нахождения максимальных значений в каждом из этих массивов. При выявлении в первом массиве «дубликатов» (совпадающих значений) в соответствии с заложенным в программный продукт алгоритмом анализируется второй массив. Путем сравнения значений по индексам найденных дубликатов находится минимаксное решение. Аналогичная операция может выполняться и для второго массива.

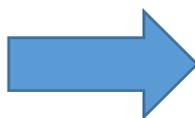
После сортировки по описанному в статье правилу формируется оптимальная программа выпуска изделий производственного подразделения машиностроительного предприятия. Результаты сформированной программы выводятся на экран, и пользователь получает уведомление о завершении работы программного продукта. Пример входных и выходных данных представлен на рисунках 7, 8 (фонд времени = 3200 ч, такт работы = 0,5 ч).

Созданный программный продукт представляет собой информационную систему с перспективой дальнейшего функционального развития. Эта система обладает возможностью реализации функции масштабирования при появлении у машиностроительного предприятия новых задач. Такие задачи возникают, как правило, в случае реализации предприятием стратегии цифровой трансформации путем проведения комплексной инновационной модернизации с использованием методов реинжиниринга бизнес-процессов.

проверьте введенные вами значения:

1	500	40.0
2	570	32.0
3	620	18.0
4	660	56.0
5	320	74.0
6	790	31.0
7	910	48.0
8	240	59.0
9	527	63.0
10	934	88.0

Рис. 7. Входные данные



оптимальный выбор:

934	88.0
910	48.0
790	31.0
660	56.0
620	18.0
570	32.0
500	40.0
240	59.0

программный код выполнен успешно

Рис. 8. Выходные данные

В рамках перехода к стратегии инновационной модернизации предприятие создает совокупность интеллектуальных высокоавтоматизированных производств, что достигается путем интеграции в структуру этих производств различных роботизированных систем. Для этих систем становятся актуальными такие задачи, как задача определения оптимального соотношения между уровнем гибкости и производительности, а также задача оптимизации соотношения между количеством технологического и вспомогательного оборудования структуры.

#### Литература

1. Хлынин, Э. В. Основные этапы формирования рациональной производственной программы предприятия / Э. В. Хлынин // Известия Тульского государственного университета. – 2018. – № 1-1. – С. 105–115.
2. Галкина, А. Ю. Управление ассортиментной стратегией машиностроительного предприятия / А. Ю. Галкина, А. В. Антоничев // Вестник Саратов-

ского социально-экономического университета. – 2010. – № 3 (32). – С. 58–60.

3. Андреев, Е. Б. MES-системы: взгляд изнутри / Е. Б. Андреев, И. В. Куцевич, Н. А. Куцевич. – Москва : РТСофт, 2015. – 240 с.

4. Пестрецов, С. И. CALS-технологии в машиностроении: основы работы в CAD/CAE-системах : учебное пособие / С. И. Пестрецов. – Тамбов : ИД ТГТУ, 2010. – 104 с.

5. Немуров, Е. В. Актуальность внедрения Business Intelligence-систем на предприятиях в условиях современного рынка / Е. В. Немуров, Е. Б. Золотухина // Теория. Практика. Инновации. – 2018. – № 2 (26). – С. 15–22.

6. Яковлев, А. В. Управление производством: планирование и диспетчеризация / А. В. Яковлев. – Москва : ООО «1С-Паблишинг», 2018. – 219 с.

7. Ахо, А. В. Структуры данных и алгоритмы : перевод с английского / А. В. Ахо, Д. Э. Хопкрофт, Д. Д. Ульман. – Москва : Вильямс, 2018. – 400 с.

*V.V. Baranov<sup>1</sup>, M.M. Moleva<sup>2</sup>, M.V. Baranov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Moscow State Technological University STANKIN*

<sup>2</sup>*Military University named after Prince Alexander Nevsky of the Ministry of Defense of the Russian Federation*

<sup>3</sup>*Yaroslavl State Technical University*

### MATHEMATICAL MODELING AND SOFTWARE FOR SOLVING PROBLEM OF SELECTING OPTIMAL PRODUCTION PROGRAM

The article deals with the problem of forming an optimal production program for a structural subdivision of a machine-building enterprise. For the purpose of automating the process of solving the problem, a software product has been developed that implements a mathematical model and a heuristic algorithm for choosing an assortment range from a range of products potentially acceptable for inclusion in the program.

Machine-building enterprise, diversified production, manufacturing program, range, heuristic algorithm, high-level language Python, program code.