

УДК 519.8

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ДАННЫХ

Л.Г. Афраимович

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Россия, 603022, Нижний Новгород, Гагарина пр., 23
E-mail: lev.afraimovich@itmm.unn.ru

В.Е. Костюков

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Россия, 603022, Нижний Новгород, Гагарина пр., 23
E-mail: v.e.kostyukov@unn.ru

М.С. Куликов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Россия, 603022, Нижний Новгород, Гагарина пр., 23
E-mail: m.s.kulikov@unn.ru

М.Х. Прилуцкий

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Россия, 603022, Нижний Новгород, Гагарина пр., 23
E-mail: pril@iani.unn.ru

Н.В. Старостин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Россия, 603022, Нижний Новгород, Гагарина пр., 23
E-mail: nvstar@iani.unn.ru

Ключевые слова: производственное планирование, NP-трудность, неполнота данных, планирование в условиях неполноты.

Аннотация: рассматривается задача производственного планирования. Сформулирована проблема восполнения неполных данных при неполном описании технологических процессов новых изделий с помощью полных технологических процессов базы данных предприятия. Задача восполнения ставится как оптимизационная задача. Предлагаемая схема восполнения неполных данных позволяет использовать восполненные технологии в рамках общей математической модели производственного планирования.

1. Введение

Эффективная организация производственных процессов требует применения интеллектуальных подходов к решению задач производственного планирования. На содержательном уровне задача связана с построением расписания выполнения заданного комплекса взаимозависимых работ при помощи заданного множества ресурсов таким образом, чтобы оптимизировать выбранную меру эффективности [1].

При исследовании задач производственного планирования был разработан адаптивный фронтальный подход [1-5], позволяющий решать широкий класс задач производственного планирования: оперативное планирование, стратегическое

планирование, задачи ситуационного анализа и др. Разработанный подход лег в основу системы производственного планирования Смарт-Ресурс, разработанной на кафедре ИАНИ института ИТММ (ННГУ им. Н.И. Лобачевского) [6].

В реальных сценариях производственного планирования возникают задачи планирования в условиях неполноты данных [7,8]. Источником неопределенности могут служить различные факторы – неопределенность планируемых объемах производства, стохастичность длительностей операций и пр. В данной работе рассматривается сценарий, в котором источником неопределенности служит неполнота описания технологических процессов изготовления изделий.

При планировании изготовления новых изделий на этапе стратегического планирования или формирования портфеля заказов возникает необходимость планирования изделий с частичной проработкой технологии. В подобной ситуации технологии обычно проработаны до некоторых обобщенных блоков (обобщенных операций), для которых известны требуемые нормо-часы по видам операций. В работе строится математическая модель задачи восполнения неполного технологического процесса и обсуждается ее применение в цикле производственного планирования.

2. Производственное планирование

Содержательно общая задача планирования дискретного производства заключается в следующем. На производстве планируется изготовление заказов, состоящих из изделий заданной номенклатуры. Производственные мощности предприятия представляют собой множество групп взаимозаменяемого оборудования. Для удобства будем считать, что все оборудование работает по общему производственному календарю. Каждый заказ состоит из определенных изделий и имеет свой срок раннего начала и директивный срок завершения. Каждое изделие описывается технологическим процессом – взвешенным графом взаимозависимых операций. Для каждой операции заданы их длительность и соответствующая группа взаимозаменяемого оборудования. Требуется таким образом назначить операции заказов на оборудование, чтобы

- старта запуск заказов удовлетворял их раннему времени начала,
 - каждая операция выполнялась лишь после завершения всех предшествующих операций,
 - на каждом оборудовании одновременно выполнялось не более одной операции,
- и при этом минимизировалось суммарное время отставания заказов от директивных сроков.

Введем вспомогательные обозначения. Пусть

- $\{1, \dots, T\}$ – множество тактов планирования,
- \tilde{R} – множество единиц оборудования предприятия, разбитое на группы (взаимозаменяемого) оборудования $R = \{r_1, \dots, r_p\}$, где
 - $\bigcup_{r \in R} r = \tilde{R}$,
 - $r' \cap r'' = \emptyset, r' \neq r'', r', r'' \in R$;
- W – множество изготавливаемых на предприятии изделий, описываемых соответствующей технологией (технологическим процессом) и задаваемых взвешенным ориентированным графом без петель и контуров $w = (O_w, A_w, t, r)$, где O_w – множество операций, $A_w \subseteq O_w^2$ – множество дуг, определяющих предшествование операций, t_o – длительность операции o , $r_o \in R$ – группа оборудования операции o , $o \in O_w$, $w \in W$; не уменьшая общности будем считать, что $O_{w'} \cap O_{w''} = \emptyset, w' \neq w'', w', w'' \in W$,

- H – множество заказов предприятия, описываемых сроком раннего начала t_h^P , директивным сроком t_h^D , количеством входящих в заказ изделий l_h , совокупностью изделий заказа $h_1, \dots, h_{l_h}, h_j \in W, j = \overline{1, l_h}, h \in H$.

Для каждого заказа h построим соответствующий ему взвешенный граф технологии, определяемый как совокупность технологий входящих в него изделий (O_h, A_h, t, r) .

Тогда для множества заказов H построим соответствующий ему взвешенный граф технологии, определяемый как совокупность технологий входящих в него заказов (O_H, A_H, t, r) .

В качестве варьируемых переменных введем x_o, y_o , обозначающих ресурс, на который назначается операция o и момент старта выполнения операции o , соответственно, $o \in O_H$. Тогда задача производственного планирования ставится как следующая оптимизационная задача.

- (1) $x_o \in r_o, o \in O_H,$
- (2) $y_o \in \{1, \dots, T\}, o \in O_H,$
- (3) $y_{o'} + t_{o'} \leq y_o, (o', o) \in A_H, o \in O_H,$
- (4) $y_{o'} + t_{o'} \leq y_{o''}$ или $y_{o''} + t_{o''} \leq y_{o'}, o' \neq o'', o', o'' \in \{o | x_o = \tilde{r}, o \in O_H\}, \tilde{r} \in \tilde{R},$
- (5) $t_h^P \leq y_o, o \in O_h, h \in H,$
- (6) $\sum_{h \in H} \max(0, \max_{o \in O_h} (y_o + t_o) - t_h^D) \rightarrow \min.$

Здесь условия (1),(2) представляют собой естественные ограничения на переменные; (3) гарантирует что операция выполняется только после завершения всех предшествующих операций; (4) гарантирует, что на каждом оборудовании одновременно выполняется не более одной операции; (5) условие раннего времени начала; критерий (6) связан с суммарным временем отставания заказов от их директивных сроков.

Задача (1)-(6) является NP-трудной уже при $|R| = 1, |W| = 1, |H| = 1, A_H = \emptyset$, т.к. к ней сводится за полиномиальное время NP-полная задача о камнях [7]. При исследовании задачи (1)-(6) был разработан адаптивный фронтальный подход [1-5]. Данный подход был также успешно применен при решении ряда обобщений задачи (1)-(6), возникающих в прикладных задачах производственного планирования.

3. Неполное описание технологий

Неполная технология u описывается как взвешенный ориентированный граф без петель и контуров $u = (O_u, A_u, t)$, где O_u – множество обобщенных операций, $A_u \subseteq O_u^2$ – множество дуг, определяющих предшествование обобщенных операций, t_{or} – требуемые для обобщенной операции o норма-часы группы оборудования $r, r \in R, o \in O_u$.

Таким образом в условиях неполноты информации требуется решать задачу производственного планирования при условиях, что часть заказов может быть описана неполной технологией.

Общепринятой практикой в условиях неполноты данных является приведение неполной технологии к стандартному описанию технологии без восполнения неполноты. Тогда каждой операции $o \in O_u$ с неполной технологией ставится в соответствие $|R|$ операций параллельных операций с длительностью t_{or} и соответствующей группой оборудования $r, r \in R$.

Такая стратегия позволяет в рамках общей постановки (1)-(6) ставить задачи производственного планирования изготовления изделий с технологиями, основанными как на полной, так и на неполной информации. Однако главным недостатком такого подхода является низкая достоверность прогнозных оценок о сроках производства изделий при работе с неполной информацией. Таким образом возникает необходимость в восполнении неполной информации технологий средствами, которые позволили бы повысить точность прогнозных оценок.

4. Восполнение неполного описание технологий

Будем интерпретировать множество W как базу знаний технологий, изготавливаемых на предприятии изделий. Тогда предположим, что для нового изделия, описываемого неполной технологией, на в множестве W содержится аналог (технология схожего изделия), который мог бы быть использован для более достоверного восполнения неполной технологии нового изделия. В данном разделе ставится задача восполнения неполной технологии через поиск наилучшего аналога.

Рассмотрим неполную технологию $u = (O_u, A_u, t)$ и произвольную технологию $w = (O_w, A_w, t, r)$, $w \in W$. Введем меру близости, отражающую соответствие между неполной технологией u и полной технологией w , которая служит кандидатом на восполнение.

Для удобства обозначим

- $O_u = \{a_1, \dots, a_n\}, O_w = \{b_1, \dots, b_m\}$,
- $J(r) = \{j \mid j \in \{1, \dots, m\}, r_{b_j} = r\}, r \in R$,
- $P_u(i) = \{i' \mid (a_{i'}, a_i) \in A_u\}, i = \overline{1, n}, P_w(j) = \{j' \mid (b_{j'}, b_j) \in A_w\}, j = \overline{1, m}$.

И пусть $n < m, \sum_{r \in R} t_{a_i r} > 0, i = \overline{1, n}$.

Введем переменную z_{ij} , принимающую значение 1, если обобщенной операции a_i ставится в соответствие операция b_j , 0 иначе, $i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$. Тогда рассмотрим оптимизационную задачу назначения операций технологии w на операции неполной технологии u таким образом, чтобы минимизировать несоответствие технологий.

$$(7) \quad \sum_{i=1}^n z_{ij} = 1, j = \overline{1, m},$$

$$(8) \quad \sum_{j=1}^m z_{ij} \geq 1, i = \overline{1, n},$$

$$(9) \quad z_{ij} \in \{0, 1\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m},$$

$$(10) \quad \sum_{j=1}^m \sum_{j' \in P_w(j)} z_{i' j'} z_{ij} \geq 1, i' \in P_u(i), i = \overline{1, n},$$

$$(11) \quad \sum_{j=1}^m \sum_{j' \in P_w(j)} z_{i' j'} z_{ij} = 0, i' \notin P_u(i), i = \overline{1, n},$$

$$(12) \quad \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{r \in R} |t_{a_i r} - \sum_{j \in J(r)} t_{b_j} z_{ij}|}{\sum_{r \in R} t_{a_i r}} \rightarrow \min.$$

Здесь условие (7) гарантирует, что каждой операции технологии w ставится в соответствие одна обобщенная операции неполной технологии h ; условие (8) гарантирует, что каждой обобщенной операции неполной технологии h ставится в

соответствие не менее одной операции технологии w ; (9) естественные ограничения на переменные; (10) означает, что смежным обобщенным операциям неполной технологии h ставятся в соответствие минимум одна пара смежных операций технологии w ; (11) означает, что несмежным обобщенным операциям неполной технологии h не ставятся в соответствие смежные операции технологии w ; критерий (12) определяет соответствие назначаемых операций по нормо-часам каждой и групп ресурсов.

Оптимальное значение критерия задачи (7)-(12) обозначим через $g(h, w)$. Тогда в качестве технологии, с помощью которой происходит восполнение неполной технологии h , выберем технологию $w^* = \underset{w \in W}{\operatorname{argmin}} g(h, w)$. На данном этапе предлагается применение эвристических подходов при решении задачи (1)-(12).

6. Заключение

Рассмотрена задача производственного планирования, в рамках которой предложена постановка задачи восполнения неполных технологических процессов. Применение такого подхода позволит повысить достоверность планирования в условиях неполноты технологических процессов новых изделий. Условием применения подхода является накопление предприятием базы знаний технологических процессов. Дальнейшим направлением исследования является разработка эффективных алгоритмов восполнения, в том числе подходов, основанных на методах машинного обучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FSWR-2023-0036).

Список литературы

1. Афраймович Л.Г., Власов В.С., Куликов М.С., Прилуцкий М.Х., Старостин Н.В., Филимонов А.В. Планирование и оперативное управление процессом изготовления сложных изделий // XII Всероссийское совещание по проблемам управления. Москва, 16-19 июня 2014г.: Труды. Москва: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. С. 5138-5149.
2. Прилуцкий М.Х. Многокритериальные многоиндексные задачи объёмно-календарного планирования // Известия академии наук. Теория и системы управления. 2007. № 1. С. 78-82.
3. Прилуцкий М.Х., Власов В.С. Оптимизационные задачи распределения ресурсов при планировании производства микроэлектронных изделий // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 1 (38). С. 38-43.
4. Прилуцкий М.Х., Седаков Д.В. Календарное планирование многостадийных производственных систем с взаимозаменяемым оборудованием // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского. Математическое моделирование. Оптимальное управление. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2014. № 4(1). С. 433-437.
5. Власов С.Е., Костюков В.Е., Прилуцкий М.Х. Задачи планирования для предприятий с непрерывным циклом изготовления продукции // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского. Математическое моделирование. Оптимальное управление. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2014. № 4(1). С. 422-427.
6. Афраймович Л.Г., Куликов М.С., Прилуцкий М.Х., Старостин Н.В. Система производственного планирования Smart-Ресурс // VIII Молодежная конференция по управлению проектами. Нижний Новгород, 2023 (принято к печати).
7. Herroelen W., Leus R. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials // European Journal of Operational Research. 2005. Vol. 165, No. 2. P. 289-306.
8. Chaari T., Chaabane S., Aissani N., Trentesaux D. Scheduling under uncertainty: Survey and research directions // 2014 International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT). Hammamet, Tunisia, 2014. P. 229-234.
9. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982.