

MATHEMATICAL MODELING

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.021:65.011.56

А.А. Смагин, Ю.А. Радионова, С.А. Карпаев

ОПЕРАЦИОННО-РЕСУРСНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НА МНОЖЕСТВЕ СРЕДСТВ РЕАЛИЗАЦИИ

Смагин Алексей Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института. Заведующий кафедрой «Телекоммуникационные технологии и сети» Ульяновского государственного университета. Имеет статьи, изобретения, монографии в области разработки информационных систем различного назначения. [e-mail: smaginaa1@mail.ru].

Радионова Юлия Александровна, кандидат технических наук, окончила механико-математический факультет УлГУ, аспирантуру Ульяновского государственного технического университета. Ведущий инженер-программист ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет публикации в сфере автоматизированных систем документооборота, интеллектуальной организации хранилищ технической документации, статистической оценки поставщиков. Сфера научных интересов: электронный документооборот, архивохранилища, статистический анализ данных, системы поддержки принятия решений. [e-mail: julia-owl@mail.ru].

Карпаев Сергей Александрович, соискатель, окончил УлГТУ. Инженер по автоматизированным системам управления производства ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет статьи в области программной автоматизации бизнес-процессов предприятия и оперативно-производственного планирования. [e-mail: neonix3000@mail.ru].

Аннотация

Статья посвящена проблеме проектирования маршрутных карт, в основе которых заложен маршрут выполнения технологических операций (ТО) на производстве. Тема является особенно актуальной в настоящее время, так как в процессе производства зачастую происходит остановка изготовления продукции из-за несовершенства маршрутной карты, причем одной из причин несовершенства является смена ресурсов, предусмотреть которую заранее практически невозможно.

В статье предлагается в качестве повышения эффективности производственного процесса осуществлять проектирование технологического маршрута по предложенным принципам с использованием двухпроходной двухкомпонентной модели. В основе методики заложен принцип подбора средств реализации ТО на основе двух взаимодействующих между собой моделей, которые позволяют более полно охватить процесс с точки зрения ресурсного обеспечения и выполнения ТО на примере химического производства.

Предложенная модель позволяет проектировщику осуществлять выбор маршрута технологического процесса (ТП) из множества предложенных вариантов. Представлен алгоритм проектирования и реализации модели в автоматизированных системах.

Предложенные алгоритмы позволяют формировать проектные решения, это дает возможность их использования для последующей обработки и определения эффективности.

Сформированные по разным критериям технологические маршруты обеспечивают многовариантность полученных решений. Предложенная модель обеспечивает эффективность повышения качества ТП за счет использования средств информационной поддержки обеспечения реализации заданного комплекса операций, близкого к оптимальному выбору технических средств.

Ключевые слова: алгоритм разработки проектных решений, инструментальное средство поддержки, математическая модель, методика проектирования, операционно-ресурсная модель, проектирование маршрутных карт технологических процессов, технологические процессы, химическое производство.

OPERATING-RESOURCE MODEL OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS DISTRIBUTION BASED ON THE IMPLEMENTATION MEANS

Aleksei Arkadevich Smagin, Doctor of Science in Engineering, Professor; graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk Polytechnic Institute; Head of the Department of Telecommunication Technologies and Networks of Ulyanovsk State University; an author of articles, inventions, and monographs in the field of information system development of different purposes. e-mail: smaginaa1@mail.ru.

Iulia Aleksandrovna Radionova, Candidate of Science in Engineering; graduated from the Faculty of Mathematics and Mechanics of Ulyanovsk State University; finished her postgraduate study at Ulyanovsk State Technical University; Lead Programming Engineer at FRPC JSC 'RPA 'Mars'; an author of articles in the field of automated workflow systems, intelligent technical documentation storages, and statistical analysis of supplier appraisal. e-mail: julia-owl@mail.ru.

Sergei Aleksandrovich Karpaev, Postgraduate Student; graduated from Ulyanovsk State Technical University; Production Control System Engineer at FRPC JSC 'RPA 'Mars'; an author of articles in the field of the business software automation and short-term production planning. e-mail: neonix3000@mail.ru.

Abstract

The article is devoted to the actual topic of designing route maps. At the heart of the route maps, the route for performing technological operations at the production site is laid. In the production process, production is often stopped due to imperfections in the route map, one of the reasons for which is the change of resources.

In the article it is proposed to carry out the design of the technological route according to the proposed principles with the use of a two-pass two-component model as an increase in the productivity of the production process. The methodology is based on the principle of selecting the means for implementing technological operations on the basis of two interacting models, which make it possible to cover the process more fully from the point of view of resource provision and the performance of a technological operation using the example of chemical production.

The proposed model allows the designer to choose the route of the technological process from the set of proposed options. An algorithm for designing and implementing a model in automated systems is presented.

The offered algorithms allow to form design decisions, it gives the chance of their use for the subsequent processing and definition of efficiency.

Formed by different criteria, technological routes provide many variants of the solutions obtained. The offered provides efficiency of improvement of quality of technological processes due to use of means of information support of maintenance of a set of operations close to an optimum choice of technical means of realization.

Key words: algorithm for designing design solutions, tool support, mathematical model, design methodology, operational-resource model, design of route maps of technological processes, technological processes, chemical production.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом анализа производственных процессов являются технологические операции (ТО) в процессе изготовления изделий и ресурсы, необходимые для их реализации. Требуется принятие решений по эффективному использованию минимального количества ресурсов для обеспечения качественного протекания технологических процессов (ТП), которые удовлетворя-

ют заданным требованиям к выпускаемому изделию. Необходимо учесть все стадии изготовления изделия, параметры и характеристики применяемого оборудования с целью его выбора из множества других. Иначе говоря, необходимо информационное средство поддержки принятия решения на основе конкретных данных о составе выполняемых ТО и средств реализации (СР). Для описания таких ТП, которые обладают большим числом характеристик множества выполняемых

операций и параметров множества CP, не существует формальных методов их построения. Разработка модели должна опираться на глубокое понимание предметной области, в том числе целей операций и способов их выполнения. Основой создания такой модели могут служить операционные модели, которые ориентированы на производственные процессы в нефтегазовой промышленности [1–2].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обычно операционные модели имеют вид уравнения или системы уравнений, выражающий общий критерий функционирования производственной подсистемы. Такая информационно-организационная модель содержит сведения о составе операций, «исполнителях» каждой операции, информации, необходимой для выполнения операций, функциях управления, источниках и потребителях информации по каждой функции и др. [3–5]. Операционные модели обладают общностью к множеству видов ТП, большой наглядностью, возможностью широкого применения программных средств для их реализации, что обеспечивает возможность их использования в качестве средства автоматизации принятия решений. Разделение модели на два компонента: операции и CP – позволяет проводить над ними как общие, так и отдельные преобразования и акцентировать внимание на свойствах и параметрах составляющих частей модели. Сложность решаемой в настоящей работе задачи выражается в большом числе исходных условий – возникает много вариантов получаемых решений, где требуется подход к выбору из них наиболее эффективного.

Зададим модель ТП в виде двухкомпонентной структуры, в которой первый компонент Φ будет отождествляться с множеством выполняемых в ТП операций, а второй, связанный с первым компонент P представляет собой множество CP всех операций, имеющихся в составе первого компонента. Оба компонента связаны между собой началом передачи данных, по которому от первого компонента ко второму передается информация о множестве операций, которые необходимо выполнять CP из множества средств второго компонента. Такая организация операционной модели дает возможность задавать через первый компонент подмножество операций для выполнения конкретного ТП, а во втором

компоненте осуществлять поиск CP этих операций по определенным правилам, удовлетворяющим исходным требованиям к обеспечению качества выполняемых операций. Отсюда предлагаемая модель носит двухпроходной характер: на первом шаге формируется информация о вариантах реализации задаваемого набора операций, а на втором шаге – из вариантов CP, полученных из первого компонента, осуществляется обоснованный выбор наиболее эффективного. В качестве состояний двухкомпонентной модели S в целом предлагается ввести композиции состояний первого S_1 и второго компонента S_2 , т. е. $S = S_0 \cup S_1$, причем $S_0 = \{S_1^1, S_2^1, \dots, S_n^1\}$, где S_i^1 – вариант выбора i -го подмножества выполняемых в данный момент операций, а $S_1 = \{S_1^2, S_2^2, \dots, S_m^2\}$, где S_j^2 – вариант выбора j -го CP TO. Начальным состоянием S_0 общей модели является композиция $S_{нач} = S_1^1 \cup S_1^2$, в которой S_1^1 есть исходная ситуация, когда известны полный набор всех выполняемых операций в производственном процессе и полный набор S_1^2 всех незанятых CP. В процессе функционирования модели в компонентах происходят изменения: в первом – из общего перечня формируется список выполняемых операций, т. е. происходят преобразование исходного набора операций и поиск среди них подходящих CP, а во втором – из выбранных наборов CP осуществляется операция выбора CP по критерию эффективности. Такое представление модели позволяет осуществить переходы из одного состояния в другое ($\hat{S}_i \rightarrow \hat{S}_k$), где $\hat{S}_i, \hat{S}_k \in S$ и на каждом переходе можно проводить оценки принимаемых решений по введенному критерию эффективности.

Наиболее удобной математической структурой представления множества выполняемых TO и установления соответствия им CP является матрица инцидентности [4–6], над которой возможно проведение ряда необходимых операций по преобразованию данных, записанных в ней. Предлагается использовать эту структуру в качестве модели первого компонента общей модели. Для описания возможностей выбираемых вариантов CP наиболее подходит параметрическая модель в виде лепестковой диаграммы. Модель распределения TO на множестве CP можно представить в общем структурно-логическом виде (рис. 1).

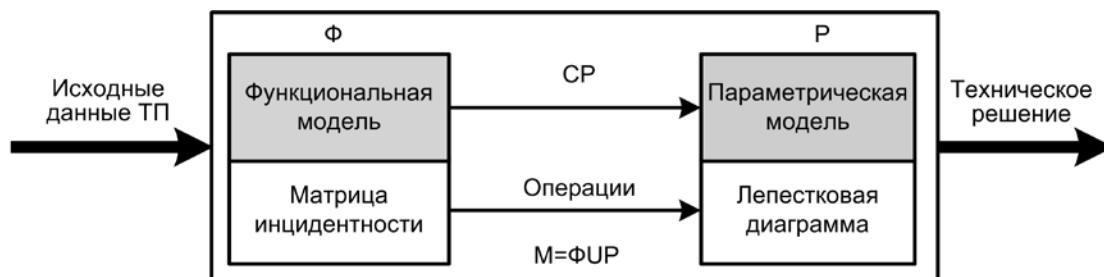


Рис. 1. Двухкомпонентная модель

ТО имеют свои свойства и характеристики, заранее известные и утвержденные ТП изготовления деталей, а СР обладают так же известными параметрическими атрибутами, по которым определяются их возможности по быстродействию выполнения операций, качеству, экономическим показателям, надежности и т. д. В конкретном ТП могут выполняться операции, разные по содержанию и по количеству, а СР может выполнять из этого набора несколько операций с разным качеством и характеристиками. Кроме этого, во время исполнения выбранного набора операций некоторые СР могут быть задействованы в других операциях и, следовательно, их нельзя эксплуатировать. После определения необходимого списка ТО для обеспечения требуемого ТП выбор СР зависит от двух факторов: незанятости СР и подходящих параметрических характеристик СР, обеспечивающих выполнение актуальных технологических требований по ТП [7–10]. На начальном этапе решения задачи моделирования необходимо иметь исходную информацию о наличии СР с их параметрической атрибутикой и определить подходящий способ задания перечня необходимых операций для запланированного ТП. Нужно также задать исходное состояние двухкомпонентной модели перед началом моделирования. В качестве математической модели первого компонента предлагается использовать матрицу инцидентности, в столбцах которой обозначен весь операционный набор, а в строках – весь набор СР ТО. В качестве модели второго компонента предлагается использовать лепестковую диаграмму, на которой можно задать требуемые параметры к СР. Предлагается двухкомпонентная математическая модель, включающая для решения поставленной задачи два множества, на базе которых формируется информация об основных объектах ТП – выполняемых операциях и СР.

Матрица инцидентности является бинарной – в ее ячейке записывается 1, если i -е СР выполняет операцию, указанную в столбце, пересекающем j -ю строку СР, в противном случае – 0. Таким образом, в матрице инцидентности может храниться вся исходная и промежуточная информация в виде наименований операций и СР. Матрица инцидентности M_u имеет вид:

$$M_u = \begin{array}{c|cccc} O_1 & O_2 & \dots & O_n & CP_1 \\ 1 & 0 & \dots & 1 & CP_2 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & CP_n \end{array}$$

Для выбора операционального покрытия, т. е. покрытия всего заданного в конкретный момент времени списка ТО подходящими по требованиям СР, предлагается использовать функцию Патрика, позволяющую за счет умножения матрицы инцидентности на бинарный вектор получить все множество возможных покрытий [11, 12]. В качестве бинарного вектора необходимо взять вектор \bar{O}_p , элементами которого являются операции O_p , необходимые для реализации заданного про-

изводственного процесса $\bar{O}_p = \{O_1, O_2, O_3, \dots, O_j\}$. Заполнение бинарной матрицы инцидентности производится перед началом принятия решения. В бинарном векторе единицами отмечаются ТО, которые входят в список реализации операций, в противном случае – нулем. Умножение бинарной матрицы M_u на бинарный вектор \bar{f} дает в результате бинарную матрицу D . Столбцы бинарной матрицы D , в ячейках которых имеются единицы, служат указанием на СР, используемые при выполнении ТО. Столбцы, во всех ячейках которых содержатся нули, не входят в список реализуемых ТО, и поэтому они исключаются.

Задача поиска СР, реализующих заданный набор операций M_u , сводится к нахождению кратчайшего покрытия булевой матрицы M_u , т. е. нахождению такой минимальной совокупности строк матрицы, которая содержала бы не менее одной единицы в каждом столбце матрицы. Для нахождения всех покрытий бинарной матрицы M_u функция Патрика обеспечивает получение полного списка покрытий заданной матрицы и представляет собой конъюнктивную нормальную форму, состоящую из элементарных дизъюнкций по всем столбцам матрицы [13, 14]. Количество функциональных покрытий с повторяющимися комбинациями СР определяется как:

$$N_{pokr} = \prod_{i=1}^n \left(f_i * \sum_{j=1}^m d_{i,j} \right) = \prod_{i=1}^m \sum_{j=1}^m d_{i,j}, \quad (1)$$

где n – количество операций из заданного набора операций,

m – количество СР, покрывающее набор операций.

В связи с тем, что для оценки получения покрытий имеют значение только неповторяющиеся комбинации СР, для расчета их количества используется формула:

$$N_{pokrbezp} = \left[\sum_{i=1}^m l_i * (K_{l_i} - K_{povt.l_i} - K_{nv.l_i}) \right]^n, \quad (2)$$

где K_{l_i} – число операций в i -м СР;

$K_{povt.l_i}$ – количество операций в i -м СР, которые повторяются в других СР;

$K_{nv.l_i}$ – количество функций в i -м СР, которые не присутствуют в заданной последовательности функций.

Второй компонент общей модели позволяет учитывать задание параметров СР и выбирать среди покрытий наиболее эффективное. Действие во втором компоненте модели осуществляется следующим образом: окружность лепестковой диаграммы разбивается на фрагменты. Количество исходящих из центра линий соответствует количеству параметров СР. Значение каждого параметра можно выразить через величину радиуса. Радиус квантуется, и каждая точка разбиения представляет собой значение по шкале отображаемого параметра СР. Максимальное значение радиуса есть максимальное значение конкретного параметра СР. На градациях радиуса выставляются значения – значения параметров СР, которые анализируются и сравниваются

с заданным. Все расставленные значения соединяются и образуют фигуру возможностей СР. Наложение одной лепестковой диаграммы на другую дает визуальную и программную возможности по анализу отклонения значений параметров на одноименных радиусах диаграмм (рис. 2).

При наложении параметров двух лепестковых диаграмм возникают области неполного покрытия по параметрам СР. Фигуры, полученные в области «С» и «В» (параметры «P7» и «P3» соответственно), не удовлетворяют требуемым параметрам. Фигуры, полученные в областях «D» и «А», представляют из себя запас по параметрам. В результате наложения двух фигур образовались отклонения по каждому из параметров P_n . Выбор СР из множества СР по полученным отклонениям должен осуществляться исходя из критериев отбора и ограничений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для наглядности поставим следующую задачу: осуществить нанесение анодно-окисного покрытия [15] на деталь с габаритами 1100 × 1200 × 150 мм в кратчайшие сроки, используя две гальванические линии. Исходными данными будут следующие СР (табл. 1).

Основными параметрами ТП и СР являются следующие характеристики: плотность тока, температура, время выполнения ТО, площадь заготовок, габариты заготовок. На основании описанного алгоритма сформируем матрицу полного покрытия (табл. 2).

Полученные покрытия подаются на вход блока выбора оптимального покрытия в модели распределения ТО наложений лепестковых диаграмм (рис. 3).

Здесь можно так же прибегнуть к критерию, использующему коэффициент интегральной оценки всех отклонений (Δ).

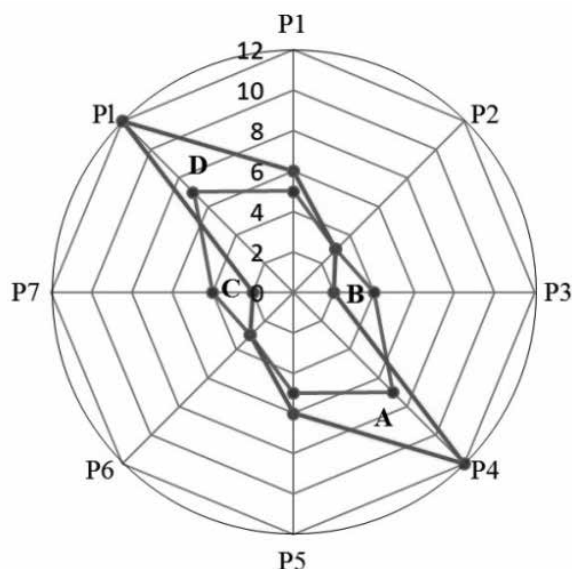


Рис. 2. Лепестковая диаграмма

$$Q = \sum_{i=1}^n \Delta_i, \tag{3}$$

где Δ_i – отклонение i -го параметра от заданных значений по системе ценности проверяемого параметра для достижения поставленной цели. Например, для рассматриваемого примера могут быть использованы следующие оценки (табл. 3).

Если значение Δ_i положительное, то параметр P_n удовлетворяет требованиям СР, иначе – не удовлетворяет. При наличии одного недостижимого параметра – СР исключается из отбора. Имеет смысл сформировать таблицу целей (критериев выбора) для оставшихся СР и относительно каждого критерия P_n установить целевые показатели отклонений, характерные для конкретного СР. Пример таблицы критериев выбора представлен ниже (табл. 4).

Таблица 1

Перечень СР гальванической линии

Порядок в ТП	Операция	СР	№ СР
1	Обезжиривание	- ванна химической обработки - ванна промывки горячей водой - ванна промывки холодной водой	СР1 СР2 СР3
2	Травление	- ванна химической обработки - ванна промывки горячей водой - ванна промывки холодной водой	СР4 СР2 СР3
3	Осветление	- ванна химической обработки - ванна промывки холодной водой	СР5 СР3
4	Анодирование	- ванна электрохимической обработки - ванна промывки холодной водой	СР6 СР3
5	Наполнение в воде	- ванна химической обработки	СР7
6	Сушка	Линия сушки	СР8

Таблица 2

Итоговая матрица инцидентности

CP/Линия	Порядок CP в ТП / операция											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CP1/1л	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CP1/2л	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CP2/1л	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CP2/2л	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CP3/1л	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0
CP3/2л	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CP4/2л	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
CP5/1л	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
CP6/2л	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
CP7/1л	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
CP8/2л	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Покрытие	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Завершающим этапом выбора CP является сравнение его отклонений со значениями параметров из таблицы критериев выбора (рис. 4). Здесь может быть использовано дерево целей, в котором по каждому CP производится сравнение длин ветвей дерева по числу параметров.

Так CP, у которого самые короткие ветви в дереве, является приоритетным из всех попавших в дерево CP. Наглядная оценка соответствия требований операций ТП требованиям характеристик CP возможна на диаграммах с помощью графика.

Для *i*-го требования ТП функция принадлежности параметров CP заданным интервалам выглядит следующим образом:

$$\eta_t = \begin{cases} 1, & \text{если } O_j \in [Min_j; Max_j], \\ 0, & \text{если } O_j \notin [Min_j; Max_j], \end{cases}$$

где O_j – параметр; t – требование; $j = 1..n$; $t = 1..d$.

Функция принадлежности показывает, насколько параметры CP соответствуют требованиям ТП. Полное соответствие требованиям произойдет, если все значе-

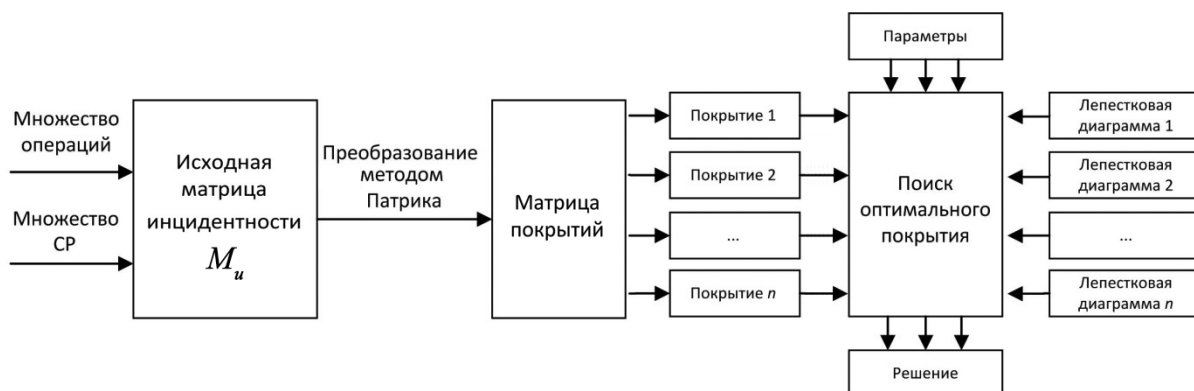


Рис. 3. Модель распределения ТО ресурсов

Таблица 3

Таблица определения коэффициента

Параметр	Текущие значения параметров	Требуемые значения параметров	Коэффициент Δ_i	Состояние
Длительность ТП	20	24	-4	Не удовлетворяет требованиям
Температура	55	60	-5	Не удовлетворяет требованиям
Кислотность электролита	6	5	1	Удовлетворяет требованиям

Таблица 4

Таблица критериев выбора

Приоритет	Цель (критерии)	Длительность ТП	Температура	Кислотность электролита
1	Лучшее качество исполнения	24	60	5
2	Высокая производительность	20	55	6
...

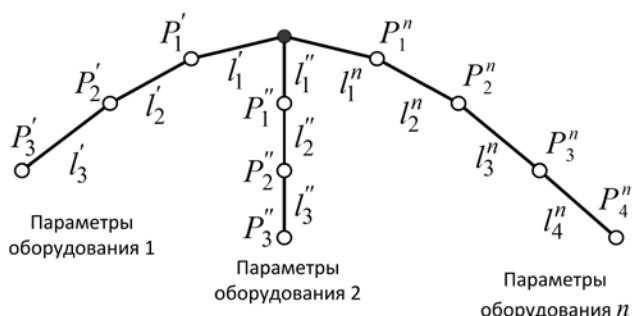


Рис. 4. Дерево целей

ния функции принадлежности равны 1. Следовательно, чем ближе значения функции к значению 1, тем более СР соответствует данным требованиям.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения численной оценки соответствия параметров СР требованиям ТП предлагается воспользоваться процентным значением соответствия СР в зависимости от значений функции отклонения [16, 17]. Для этого для каждого требования t введем множества оценок СР: $A = \{O_j | f(O_j) = 0\}$; $B = \{O_j | f(O_j) > 0\}$; $C = \{O_j | f(O_j) < 0\}$; где $A \cup B \cup C = \{O_1, \dots, O_n\}$, $j = 1..n$. Пусть сумма мощностей множеств будет равна количеству всех элементов множеств A, B, C : $|A| + |B| + |C| = n$, тогда степень соответствия требованиям эквивалентна процентному отношению мощности определенного множества к общему количеству компетенций.

Таблица 5
Процентное соответствие требований СР требованиям ТП

Степень соответствия	Значение
Соответствие полное	$ A /n \cdot 100\%$
Выше полного	$ B /n \cdot 100\%$
Ниже полного	$ C /n \cdot 100\%$

Чем больше мощность $|A|$, т. е. больше полное соответствие, тем больше требования к СР соответствуют требованиям ТП. На основании приведенных рассуждений формально построенную общую модель можно представить в виде множества следующим образом:

$$\Phi = \{X, M_u, L, F_m, F_l, R\}, \tag{4}$$

где X – множество входных данных; M_u – матрица инцидентности соответствия операций СР; L – множество лепестковых диаграмм отображающих параметры СР; F_m – процедура поиска множества покрытий; F_l – процедура поиска оптимального покрытия; R – решение (оптимальное покрытие).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье предложена модель определения СР ТО с заданной операциональностью. Модель обеспечивает эффективность повышения качества ТП за счет использования средств информационной поддержки обеспечения, близкого к оптимальному выбору технических СР заданного комплекса операций. Результаты моделирования используются при формировании технологического маршрута и отображаются в виде маршрутной карты. Сформированные по разным критериям технологические маршруты обеспечивают многовариантность полученных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Остервальдер А., Пинье И. Построение бизнес-моделей: Настольная книга стратега и новатора. – М. : Альпина Паблицер, 2012. – 288 с.
2. Бесков В.С. Общая химическая технология : учеб. для вузов. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2005.
3. Marc W. Johnson. Seizing the White Space: Business Model Innovation for Growth and Renewal. – Harvard Business Press, 2010. – 208 p.
4. Харари Ф. Теория графов. – М. : Мир, 1973. – 300 с.
5. Асанов М.О., Баранский В.А., Расин В.В. Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы. – Ижевск : НИЦ РХД, 2001. – 288 с.
6. Diestel R. Graph Theory. Graduate Texts in Mathematics. 3rd ed. Springer-Verlag, 2005.
7. Фатхутдинов Р.А. Организация производства : учебник. – М. : ИНФРА-М, 2012. – 672 с.
8. Петров. В.А., Масленников А.Н. Программно-целевая организация производства и оперативного управления в условиях групповой технологии и гибких автоматизированных производств. – М. : Лениздат, 2013. – 176 с.
9. Леонтьева А.И. Оборудование химических производств : в 2 ч. – Тамбов, Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – Ч. 2. – 280 с
10. Виноградов С.С. Организация гальванического производства. Оборудование, расчёт производства, нормирование / под ред. проф. В.Н. Кудрявцева. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Глобус, 2005. – 240 с.
11. Дизъюнктивная нормальная форма. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Дизъюнктивная_нормальная_форма (дата обращения: 19.06.2018).
12. Davey B.A., Priestley H.A. Introduction to Lattices and Order. Cambridge Mathematical Textbooks. – Cambridge University Press, 1990.
13. Галушкина Ю.И., Марьямов А.Н. Конспект лекций по дискретной математике. – Изд. 2-е, испр. – М. : Айрис-пресс, 2008. – 176 с.
14. Гаврилов Г.П., Сапоженко А.А. Задачи и упражнения по дискретной математике : учеб. пособие. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.

15. ГОСТ 9.303-84. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору (с Изменениями N 1, 2, 3, 4). – М. : Стандартинформ, 2008.

16. Зенков А. В. Численные методы : учеб. пособие. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 124 с.

17. Смагин А.А., Булаев А.А., Липатова С.В. Модель покрытия структуры программного комплекса с использованием библиотек // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 4 (50). – С. 60–66.

REFERENCES

1. Osterwalder A., Pinye I. *Postroenie biznes-modelei: Nastolnaia kniga stratega i novatora* [Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers]. Moscow, Alpina Publisher Publ., 2012. 288 p.

2. Beskov V.S. *Obshchaia khimicheskaiia tekhnologiia. Uchebnik dlia vuzov* [General Chemical Engineering. Tutorial for Higher Educational Institutions]. Moscow, IKTs Akademkniga Publ., 2005.

3. Marc W. Johnson. *Seizing the White Space: Business Model Innovation for Growth and Renewal*. Harvard Business Press, 2010. 208 p.

4. Harary F. *Teoriia grafov* [Graph Theory]. Moscow, Mir Publ., 1973. 300 p.

5. Asanov M.O., Baranskiy V.A., Rasin V.V. *Diskretnaia matematika: grafy, matroidy, algoritmy* [Discrete Mathematics: Graphs, Matroids, Algorithms]. Izhevsk, NITs RHD Publ., 2001. 288 p.

6. Diestel R. *Graph Theory. Graduate Texts in Mathematics*. 3rd ed. Springer-Verlag, 2005.

7. Fatkhutdinov R.A. *Organizatsiia proizvodstva. Uchebnik* [Industrial Engineering. Textbook]. Moscow, Infra-M Publ., 2012. 672 p.

8. Petrov. V.A., Maslennikov A.N. *Programmno-tselevaia organizatsiia proizvodstva i operativnogo upravleniia v usloviakh gruppovoi tekhnologii i gibkikh avtomatizirovannykh proizvodstv* [Software-Oriented Industrial Engineering and Operating Control under Conditions of Group Technology and Flexible Manufacturing System]. Moscow, Lenizdat Publ., 2013. 176 p.

9. Leontyeva A.I. *Oborudovanie khimicheskikh proizvodstv v 2 ch.* [Equipment for Chemical Production in 2 Parts]. Tambov, TSTU Publ., 2012. 280 p.

10. Vinogradov S.S. *Organizatsiia galvanicheskogo proizvodstva. Oborudovanie, raschet proizvodstva, normirovanie. Pod red. prof. V.N. Kudriavtseva. Izd. 2-e, pererab. i dop.* [Organization of Galvanic Production. Equipment, Production Calculation, Rate Setting. Edited by Prof. V.N. Kudriavtsev. 2nd revised and enlarged edition]. Moscow, Globus Publ., 2005. 240 p.

11. *Diziunktivnaia normalnaia forma* [Disjunctive Normal Form]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Dizyunktivnaya_normalnaya_forma (accessed: 19.06.2018).

12. Davey B.A., Priestley H.A. *Introduction to Lattices and Order. Cambridge Mathematical Textbooks*. Cambridge University Press, 1990.

13. Galushkina Iu.I., Mariamov A.N. *Konspekt lektsii po diskretnoi matematike*. Izd. 2-e, ispr. [Compendium of Lectures on Discrete Mathematics. 2nd revised edition]. Moscow, Ayris-press Publ., 2008. 176 p.

14. Gavrilov G.P., Sapozhenko A.A. *Zadachii upravleniia po diskretnoi matematike. Ucheb. posobie* [Problems and Practice on Discrete Mathematics. Textbook]. Moscow, Fizmatlit, 2005. 416 p.

15. GOST 9.303-84. *Edinaia sistema zashchity ot korrozii i starenii (ESZKS). Pokrytiia metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie. Obshchie trebovaniia k vyboru (s izmeneniami N 1, 2, 3, 4)* [National Standard. Unified System of Corrosion and Ageing Protection. Metallic and Non-Metallic Inorganic Coatings. General Requirements for Selection (with Amendments No. 1, 2, 3, 4)]. Moscow, Standartinform Publ., 2008.

16. Zenkov A. V. *Chislennye metody. Ucheb. posobie* [Numerical Methods. Textbook]. Ekaterinburg, Ural University Publ., 2016. 124 p.

17. Смагин А.А., Булаев А.А., Липатова С.В. Модель покрытия структуры программного комплекса с использованием библиотек [The Coverage Model of Software Complex Structure Using Libraries]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2017, no. 4 (50), pp. 60–66.