

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 519. 876

ДИАЛоговая ПРОЦЕДУРА ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ СЛОЖНОГО МНОГООПЕРАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

С.Я. Фомин, д.т.н., профессор кафедры АСУ
Ю.В. Силакова, студент

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Россия)

Аннотация. Представлена структура диалоговой процедуры оперативного планирования операций изготовления холоднодеформированных труб. Генерация и поиск приемлемых графиков загрузки рабочих мест реализованы с помощью генетического алгоритма, позволяющего достаточно быстро решать сложные слабоструктурированные оптимизационные задачи в режиме, близком к режиму реального времени.

Ключевые слова: диалоговая процедура, генетический алгоритм, технологический маршрут, математическая модель.

E-MAIL: stan.fomin2010@yandex.ru

Сложность решения актуальной проблемы эффективности автоматизации процессов принятия оперативных решений в АСУ производственными комплексами (ПК) объясняется, в первую очередь, большой размерностью слабоструктурированных задач нижнего уровня иерархии АСУ ПК. На рынке разработанных инструментальных средств активно предлагаются так называемые MES-системы (Manufacturing Execution System) [1]. При этом разработчики рекомендуют пользователям ограничивать область применения MES-систем для решения задач оперативной загрузки рабочих мест (РМ) ПК до 200 агрегатов и 10 000 технологических операций на интервалах сменно-суточного планирования работ.

Построение «плотных» графиков загрузки РМ ПК в MES-системах основано на использовании эвристических алгоритмов, поскольку быстродействующие аналитические алгоритмы имеют полиномиальную вычислительную сложность и ориентированы на упрощенные модели без учета разнообразной специфики ПК. Эвристические алгоритмы, представленные в описании MES-систем, работают по общей схеме: вначале ищется допустимое решение с учетом некоторых ограничений и принятого критерия. Затем полученное решение оптимизируется на последующих этапах. Однако «подробности» схем работы таких алгоритмов являются «коммерческой тайной» разработчиков [1]. Отсутствие необходимых «подробностей» является определенным препятствием эффективной адаптации функциональных возможностей MES-систем к решению задач оперативного управления сложным многоменклатурным многооперационным производством,

каковым является производство холоднодеформированных (ХД) труб.

Существенным фактором является и весьма высокая стоимость программно-алгоритмического комплекса MES-системы. В этом аспекте представляет интерес реализация альтернативного подхода к решению проблемы автоматизации процессов оперативной загрузки рабочих мест производства ХД труб путем создания локальных автоматизированных рабочих мест (АРМ) для оперативного персонала, оснащенного соответствующим программно-алгоритмическим инструментарием.

Особенность производства ХД труб связана с использованием множества многооперационных технологических маршрутов (ТМ), структурное и количественное разнообразие которых определяется различным сочетанием способов холодной прокатки с оправочным и безоправочным волочением. Структура диалоговой процедуры построения оптимальных и субоптимальных ТМ изготовления ХД труб с помощью метода динамического программирования приведена в работах [2, 3]. Математическая модель оптимизации ТМ включает такие характеристики, как ресурс пластичности металла деформируемой трубы, прочностные характеристики рабочего инструмента, качество наружной и внутренней поверхности труб, расход металла и технологические затраты.

Таким образом, реальному оперативному персоналу – лицам принимающим решения (ЛПР) представляется широкий спектр ТМ при выборе оперативных решений в конкретных производственных ситуациях: назначение в обработку на конкретное РМ (агрегаты) пакетов труб планового задания, разрешение конфликт-

ных ситуаций, связанных с дефицитом некоторых ресурсов (отсутствие готовых калибров станов холодной прокатки труб конкретной калибровки, дефицит рабочего времени агрегата для выполнения конкретной технологической операции на конкретном проходе ТМ и др.). Однако такое исходное множество альтернатив (ИМА) порождает большую размерность задачи (тысячи вариантов) оперативного планирования загрузки РМ (тысячи вариантов). При этом требуется надежный прогноз реализации возможных назначений в условиях существенной информационной неопределенности. Жестким условием решения задачи является ограниченное время решения, близкое к режиму реального времени хода производственного процесса.

Для решения задач такого класса предпочтительны приближенные эвристические методы [1]. Адекватный учет условия информационной неопределенности реализуется введением элемента случайности. К эвристическим методам стохастической оптимизации относятся генетические алгоритмы (ГА).

В общем случае ГА не гарантируют нахождения строго оптимального решения для очень трудных задач. Однако с их помощью можно получать достаточно «хорошие» (приемлемые) решения. Поэтому ГА оказываются наиболее приемлемыми для поиска «хороших» оценок оперативного плана производства при достижении компромисса между качеством решения и вычислительными затратами (одно из существенных достоинств данного метода). Высокая скорость работы ГА способствует эффективному применению их в задачах принятия решений в режиме реального времени или близком к нему. Кроме того, ГА не нуждаются в полном знании о свойствах пространства поиска. Достаточно определить способ оценки качества получаемых решений. Указанные свойства ГА явились основанием адекватного использования такого подхода при разработке диалоговой процедуры принятия оперативных решений по управлению производством ХД труб. При этом эффективность применения ГА в большей степени определяется с учетом специфики конкретного производства: способы кодирования решений, используемые генетические операторы и их параметры.

Рассмотрим основные компоненты укрупненной структуры ГА (рис. 1), синтезирующие функции традиционной процедуры поиска оптимального решения: генерацию альтернатив и работы решающего правила.

Популяция – конечное множество решений задачи: альтернативные варианты назначения продукции планового задания на РМ в соответствии с операциями ТМ. Этапы популяции состоят из последовательностей поколений. Особи, входящие в популяцию, представлены в ГА хромосомами с закодированным в них множеством параметров задачи (подмножества ТМ, включая их возможные фрагменты). Через оценку каждой особи оценивается качество оперативных планов загрузки РМ в соответствии с выбранным критерием. Хромосома содержит упорядоченную последовательность генов, отображает последовательность технологических операций ТМ соответствующей длины. Ген представляет конкретное РМ, значение которого (аллель) выбирается из множества $\{0, 1\}$, указывает присутствие/отсутствие технологической операции в структуре ТМ. Лocus указывает конкретную позицию (место) размещения каждого гена в хромосоме (конкретная операция на конкретном проходе ТМ в хромосоме).

Генотип – набор хромосом особи. В зависимости от принятого правила генерации альтернатив графиков оперативного назначения пакетов ХД на операции ТМ в особях популяции кодируются генотипы, либо единичные хромосомы. Фенотип – набор значений показателей, соответствующий данному генотипу (декодированная структура), является решением задачи.

Качество закодированных решений («приспособленность» каждой особи) оценивается целевой функцией (ЦФ) вида

$$f_i = f(G_i), \quad (1)$$

где $G_i = \{g_k : k = 1, 2, \dots, N\}$ – хромосома i -ой особи; g_{ik} – значение k -ого гена i -ой особи; N – число генов в хромосоме.

Селекция хромосом заключается в выборе на основе значений ЦФ, полученных на предыдущем этапе, тех хромосом особей, которые будут участвовать в создании «потомков» для следующей популяции, т.е. для очередного поколения. В процессе направленной селекции «наилучшие» кодировки копируются в популяцию следующих поколений чаще, чем «наихудшие». Идет последовательная генерация альтернативных графиков загрузки РМ. На каждой итерации работы ГА улучшается качество популяций в направлении достижения приемлемого решения. Чем больше значение f_i , тем выше качество хромосомы.

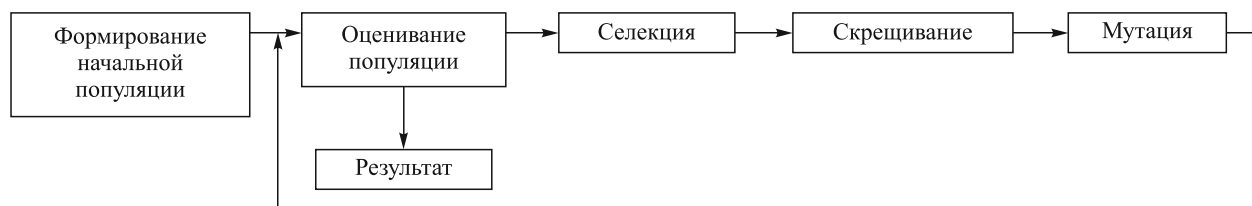


Рис. 1. Укрупненная структура генетического алгоритма

Среди методов селекции выделяют рулеточную селекцию, турнирный отбор, элитный отбор.

В рулеточной селекции вероятность P_i принять участие i -ой особи в скрещивании пропорциональна отношению ее «приспособленности» к суммарной «приспособленности» популяции:

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_i^M f_i}, \quad (2)$$

где M – число особей.

Элитные методы отбора гарантируют выживание наилучшего из лучших членов популяции. Наиболее распространена процедура сохранения только одной лучшей особи.

В задаче оперативного планирования загрузки рабочих мест в цехе ХД труб использован элитный отбор, который логически соответствует генерации оптимальных и субоптимальных ТМ методом динамического программирования [2, 3].

Скрещиванию (С) подвергаются отобранные в результате селекции родительские особи. На первом этапе С хромосомы выбираются из родительской популяции и объединяются случайным способом в пары с вероятностью скрещивания P_c . Затем для каждой пары отобранных родителей разыгрывается позиция гена (локус) в хромосоме, определяющая точку скрещивания и с вероятностью P_c применяется генетический оператор кроссинговер (КР). Существует несколько типов операторов КР.

При использовании одноточечного КР случайным образом выбирается одна из возможных точек разрыва (точка разрыва – участок между соседними битами в строке). Обе родительские структуры разрываются на два сегмента в этой точке. Затем сегменты различных родителей обмениваются и образуется два генотипа потомков (рис. 2). Возможные точки разрыва определяются экспертно (заранее), исходя из специфики объектной задачи. Это может быть разбиение многопроходного ТМ (возможность разветвления технологического потока из точки разрыва по разным ветвям, возможность перехода из точки разрыва к завершению технологического потока по другому ТМ, возможность разведения технологического потока по разным временным интервалам изготовления заказа частями при сохранении структуры ТМ и др.).

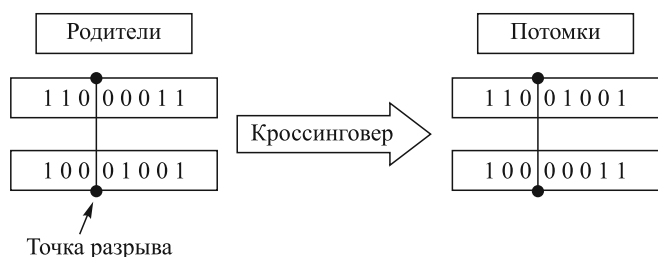


Рис. 2. Пример одноточечного кроссинговера

Оператор мутации вносит случайные изменения в хромосомы особей. При одноточечной мутации в каждой хромосоме, которая подвергается мутации, каждый бит с вероятностью P_m изменяется на противоположный. Оператор инверсии реализует перестановку генов в обратном порядке внутри наугад выбранного участка хромосомы (в частности, на конкретном РМ изменяет порядок обработки пакетов труб на противоположный). Оператор транслокации переносит какой-либо участок хромосомы в другой сегмент этой же хромосомы (в частности, перенос фрагмента очереди обработки пакетов труб в другой ряд дискретов горизонта планирования).

В двухточечном КР выбираются две точки разрыва. Родительские хромосомы обмениваются сегментом, находящимся между этими точками (в частности, это может быть перенос деформации трубы при заготовке стенки трубы со стана холодной прокатки на волочильные станы при дефиците рабочего времени станом ХПТ).

На каждой очередной итерации ГА определяются значения ЦФ для всех хромосом популяции. После чего проверяется условие останова алгоритма и фиксируется результат в виде хромосомы с экстремальным значением ЦФ, либо осуществляется переход к следующему шагу ГА – селекции.

Рассмотрим формальную постановку задачи оперативного сменно-суточного планирования производства холоднодеформированных труб. В общем виде указанная задача заключается в следующем.

Множество пакетов труб каждого j -ого вида (водопроводные, котельные и др.) требуется обработать на m рабочих местах в соответствии с ТМ. Обработка каждого пакета j -ого вида труб на каждом проходе ТМ требует выполнения последовательности технологических операций r_j на соответствующих РМ. Информация о содержании ТМ задана матрицей $G = |g_{ij}|$ размерности $(m \times n)$, элементами которой являются порядковые номера операций ТМ: $g_{ij} \in \{0, 1, \dots, r_j\}$; $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$.

Если j -ый вид труб должен, согласно структуре ТМ, обрабатываться на i -ом РМ (операции: прокатка, термическая и химическая обработка и т.п.) в первую очередь, то соответствующий элемент матрицы $g_{ij} = 1$, если во вторую очередь, то $g_{ij} = 2$ и т.д. Если пакеты j -ого вида труб не требуют обработки на i -ом РМ, то $g_{ij} = 0$.

Продолжительности операций заданы матрицей $T = |t_{ij}|$ размерности $(m \times n)$, элементами которой являются нормированные длительности обработки пакетов j -ых видов труб на i -ом РМ. Длительности переналадок (перевалок и т.п.) на агрегатах РМ заданы трехмерной матрицей $\Phi = (f_{ij1j2})$ размерности $(m \times n \times n)$, каждый элемент которой f_{ij1j2} является нормированной длительностью переналадки агрегата i -ого РМ при переходе от обработки пакета j первого вида труб к обработке пакета j второго вида.

Введем обозначения: N_i – множество пакетов, которые должны быть обработаны на i -ом РМ; p – индекс пакета, назначенного на i -ое РМ ($p = 1, 2, \dots, N_i$); $A(j)$ – множество

пакетов j -ого вида труб; k – индекс конкретного пакета j -ого вида труб ($k = 1, 2, \dots$); L – множество оптимальных и субоптимальных ТМ обработки k -ого пакета ($l \in L$); S_{ik} – время начала обработки k -ого пакета на i -ом РМ; F_{ik} – время завершения обработки k -ого пакета на i -ом РМ;

$$x_{ikp} = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-ый пакет обрабатывается на } i\text{-ом РМ} \\ & \text{в } p\text{-ой очереди;} \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases}$$

Критериальной оценкой качества назначений в обработку пакетов ХД труб принят минимум времени выполнения планового задания:

$$F_{ik} = \min_{ik} \max_{ik} S_{ik} + \sum_{i=1}^L \sum_{p=1}^{N_i} t_{ij} x_{ikp},$$

$$\{j : k \in A(j), \text{ для всех } i, k\}; \quad (3)$$

при ограничениях:

$$F_{ik} \leq \sum_{i: g_{ij}=g_{ij}+1} \sum_{p=1}^{N_i} S_{ik} x_{ikp}, \{j : k \in A(j), \text{ для всех } i, k\}; \quad (4)$$

$$S_{ik} \geq 0 \text{ для всех } i, k; \quad (5)$$

$$\sum_k x_{ikp} - \sum_k x_{ikp+1} \geq 0, p = 1, 2, \dots, N_i - 1, \text{ для всех } i; \quad (6)$$

$$\sum_k x_{ikp} \leq 1, p = 1, 2, \dots, N_i, \text{ для всех } i; \quad (7)$$

$$\sum_{(i: g_{ij}) \in c} \sum_{p=1}^{N_k} x_{ikp} = 1, c = 1, \dots, r_j, \{j : k \in A(j)\}, \text{ для всех } k, \quad (8)$$

где c – строка матрицы $G = |g_{ij}|$.

Согласно ограничению (4), обработка пакета на соответствующем РМ может начаться только после завершения обработки на предшествующем РМ в последовательности ТМ. Ограничение (5) означает, что к моменту начала выполнения производственной программы все пакеты готовы к обработке на соответствующих операциях ТМ. Ограничение (6) означает, что $(p + 1)$ -я операция ТМ на i -ом РМ может быть назначена только после p -ой операции. Ограничение (7) фиксирует тот факт, что на конкретное РМ может быть назначено одновременно не более одной операции (обработка пакета). Соответственно, ограничение (8) означает, что обработка пакета на данном проходе (операции) ТМ выполняется только на одном РМ (агрегат).

В таблице график загрузки операторов РМ, представленный трехмерным массивом, является особью ГА:

$$X = \{x_{ij}\}, i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, d_{\text{кон}}. \quad (9)$$

Элементом хромосомы (геном) x_{ij} является строка, которая соответствует одному пакету труб, указывает на каком РМ (агрегате) пакет обрабатывается и в каком дискрете времени ΔT на горизонте планирования.

График загрузки операторов рабочих мест

Номер пакета	Номер дискрета времени на горизонте планирования						Плановые уровни загрузки
	1	2	...	d	...	$d_{\text{кон}}$	
	Операторы рабочих мест						
	1	2	...	j	...	n	
1.	1	1	...	0	...	1	$P_{\text{пл1}}$
...
i	$P_{\text{пли}}$
...
k	$P_{\text{плk}}$

Строка таблицы – последовательность единиц и нулей (1 – есть обработка i -го пакета j -ым оператором, 0 – нет). $P_{\text{пли}}, (i = 1, k)$ – плановый объем продукции i -го вида труб, таким образом в ГА ген $x_{ij} = \underbrace{11001\dots001}_{d \times n}$.

Длина строки равна $d \times n$, где n – число операторов, d – число дискретов времени ΔT . Первый элемент строки соответствует первому дискрету первого оператора, второй элемент – первому дискрету второго оператора и т.д. Начальное поколение – это случайным образом сгенерированный набор хромосом. Генерация производится по строкам матрицы. Случайным образом выбирается определенное количество РМ, на которые назначается в обработку пакет (фиксируется число 1, на свободные РМ – 0). Решения, не удовлетворяющие ограничениям, исключаются из популяции.

Укрупненная структура диалоговой процедуры оперативного планирования рациональной загрузки рабочих мест производства холоднодеформированных труб представлена на рис. 3.

Программное обеспечение (ПО) диалоговой процедуры реализовано на языке программирования VBA (Visual Basic for Application). Язык, встроенный в приложения Microsoft Office, ориентирован на пользователей, не имеющих специальной подготовки по программированию. Программный инструмент «Советчик мастера» предназначен для АРМ оперативного персонала цехов, производящих холоднодеформированные трубы. Проверка работы ПО на сменном горизонте планирования (96 пятиминутных дискретах управления) показала высокий уровень быстродействия. Оперативный план загрузки 650 пакетов труб на 54 РМ производственного комплекса при использовании 180 вариантов оптимальных и субоптимальных технологических маршрутов потребует 5,4 мин машинного времени. Исключение из числа альтернативных ТМ 30 % многопроходных ТМ позволило сократить общее время расчета до 3,8 мин. Анализ показал, что качество полученных решений тем выше, чем больше число особей, с которыми работает ГА, поскольку больше объем ИМА. Однако,

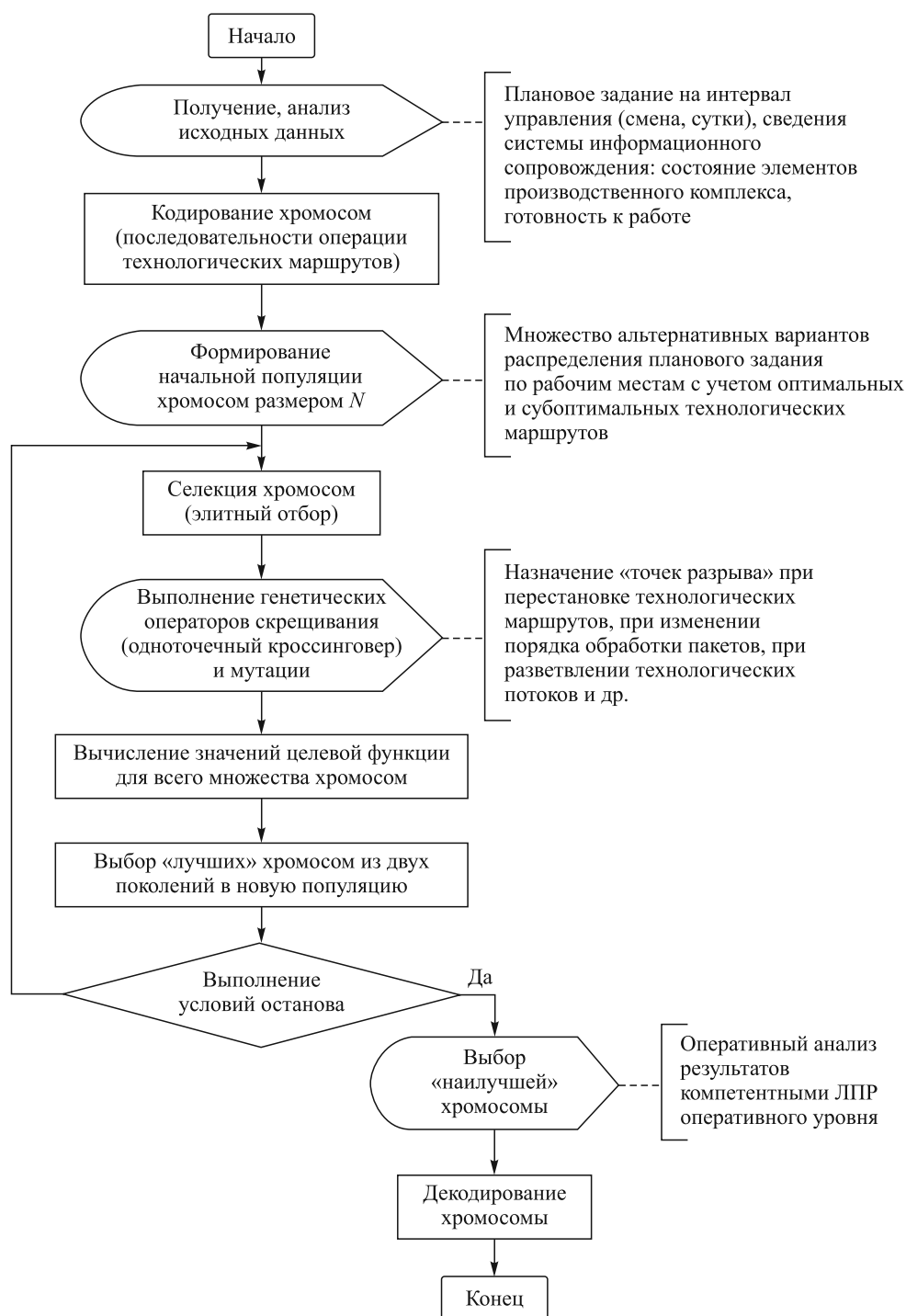


Рис. 3. Укрупненная структура диалоговой процедуры оперативного планирования рациональной загрузки рабочих мест производства ХД труб

начиная с определенного момента, дальнейшее увеличение числа особей (например, подмножества ТМ) не оказывает существенного влияния на качество решений. В результате проведенных экспериментов с программным комплексом «Советчик мастера» ХД труб определены рациональные значения следующих параметров ГА: размер начальной популяции, размер элитной выборки, вероятность применения оператора кроссингвера, вероятность применения оператора мутации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фролов Е.Б., Загидуллин Р.Р. // Новости корпоративных информационных систем и приложений. <http://erpnews.ru/doc2689.html> (дата обращения: 20.01.2013)
2. Фомин С.Я. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 3. С. 48 – 55.
3. Фомин С.Я., Беякова Ю.С. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 5. С. 58 – 62.

INTERACTIVE OPERATIONAL PLANNING PROCEDURE OF THE TECHNICAL OPERATIONS IN THE COMPOUND MULTIOPERATIONAL MANUFACTURING

S.Ya. Fomin, Dr. Eng., Professor of the Chair of ACS
Yu.V. Silakova, Student

National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS)
(Moscow, Russia)

E-MAIL: stan.fomin2010@yandex.ru

Keywords: interactive procedure, genetic algorithm, technological route (track), mathematical model.

REFERENCES

1. Frolov E.B., Zagidullin R.R. *MES-sistemy. Vid «sverhu», vzgljad iznutri. 12 news: Novosti korporativnyh informacionnyh sistem i prilozhenij* (View "from above", a look inside. 12 news: News of corporate information systems and applications). Available at URL: <http://erpnews.ru/doc2689.html> (Accessed 20.01.2013)
2. Fomin S.Ja. *Izvestija VUZov. Chernaja metallurgija*. 2013. № 3. Pp. 48 – 55.
3. Fomin S.Ja., Beljakova Ju.S. *Izvestija VUZov. Chernaja metallurgija*. 2013. № 5. Pp. 58 – 62.

Received November 12, 2013

Abstract. The structure of interactive operational planning procedure of the technological cold-shaped pipes manufacturing is presented. Generation and search of acceptable schedules of loading of workplaces are realized by using the genetic algorithm, allowing quickly enough to solve complex semistructured optimization challenges in a mode close to a mode of real time.

УДК 621.365.2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМЫ ДУГ ПРИ ИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ. СООБЩЕНИЕ 2

И.М. Ячиков, д.т.н. профессор кафедры «Вычислительная техника и программирование»
Е.М. Костылева, инженер-программист управления информационных технологий и АСУ

Магнитогорский государственный технологический университет (Магнитогорск, Россия)

Аннотация. Предложена математическая модель и алгоритм расчета для нахождения коэффициентов полинома, описывающего формы осей электрических дуг для случаев двух или трех дуг постоянного тока или среднего положения дуг трехфазного переменного тока, горящих между электродами и токоподводящей поверхностью. Создано программное обеспечение, позволяющее приближенно рассчитать формы осей столбов при электромагнитном взаимодействии двух и трех дуг. Приведены результаты моделирования для аргоновых дуг. Установлено, что при взаимодействии дуг с протекающими по ним одинаковыми токами, форма оси столба дуги зависит от рода тока, количества дуг и расстояния между ними и слабо зависит от значения силы тока.

Ключевые слова: электрическая дуга, трехфазный переменный ток, токопроводящая поверхность, форма электрической дуги, электромагнитное взаимодействие.

E-MAIL: jachikov@mail.ru

В настоящее время в металлургической промышленности используется множество различных печей, в которых источником тепла служат электрические дуги постоянного или трехфазного переменного тока промышленной частоты. Эти печи могут использовать несколько одновременно горящих дуг и отличаться количеством электродов и родом используемого тока. Так, в дуговых и плазменных печах источниками тепла могут являться две или три дуги постоянного тока. В дуговых сталеплавильных печах, рудотермических и рудовосстановительных печах, питаемых трехфазным током, одновременно могут гореть три и даже шесть дуг.

При конструировании дуговых и плазменных печей необходимо учитывать форму дуг, зависящую как от условий их горения и теплообмена, так от электромагнитных сил, которые определяются величиной проте-

кающих токов, длиной дуг, расстоянием между ними и конструкцией токоподводов. В работах [1, 2] рассмотрен случай электромагнитного взаимодействия двух дуг постоянного тока, горящих между параллельными катодами и токоподводящей поверхностью. Получены дифференциальные уравнения и предложены алгоритмы для их решения и определения формы электрических дуг [3 – 8]. Однако электромагнитное взаимодействие двух дуг постоянного тока не охватывает всех возможных вариантов взаимного влияния нескольких дуг, встречающихся в промышленных агрегатах.

Целью работы является разработка алгоритмов расчета и моделирование формы осей двух или трех электрических дуг постоянного или трехфазного переменного тока, горящих между электродами и токоподводящей поверхностью.