УДК 004.942:519.872

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ ОБСЛУЖИВАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

Али Найф Халил Альхжуж, С.Ю. Игнатов
(Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина)

Предлагается общая математическая модель многофазного обслуживающего комплекса. Показано, как в терминах этой модели могут быть сформулированы задачи проектирования цифровых управляющих систем и производственных систем дискретного типа. Приведено определение сбалансированной архитектуры обслуживающего комплекса и построен алгоритм ее расчета.

математическая модель, многофазный обслуживающий комплекс

1. Обзор подходов к решению задачи управления обслуживанием. В середине XX столетия появилась постановка общей задачи теории расписаний (Scheduling Theory), которая формулируется следующим образом: *дан обслуживающий комплекс из N приборов; для обслуживания комплексу поступают одновременно M требований, каждое из которых должно быть обслужено приборами, причем каждое требование имеет свою заданную последовательность (маршрут) и длительности (возможно 0) обслуживания каждым прибором маршрута; необходимо найти такую последовательность обслуживания требований приборами, чтобы общее время обслуживания M требований было минимальным.*

Очевидно, что эта задача легко решается путем полного перебора различных последовательностей обслуживания M требований, т.е. за M! шагов, и является, таким образом, NP-полной.

Для «быстрого» решения этой задачи традиционно используют: представление приборов и маршрутов требований в виде графов с нагруженными вершинами или ребрами и применяют различные методы оптимизации путей на графах [4, 5, 10]; эвристические приоритетные правила [3, 9]; стохастические методы [6, 11]; генетические алгоритмы [1, 2, 7, 8].

В общей постановке этой задачи и предложенных методов её решения набор требований M и набор приборов N количественно никак не связаны, что всегда может привести к ситуации, когда некоторые приборы будут перегружены требованиями, а некоторые будут большую часть времени простаивать из-за отсутствия требований к ним.

В то же время существует немало приложений этой задачи, в которых требования имеют вполне определённый характер, как по порядку и длительности обслуживания приборами, так и по их группировке в дальнейшем в определённые конечные пакеты (изделия). Такими приложениями могут быть обслуживание кадров телеметрии, управление круизными маршрутами со сменой транспортных средств и мест проживания, управление дискретными производствами и их технологическими участками и т.п.

2. Модель многофазного обслуживающего комплекса. В дальнейшем набор приборов N будет называться комплексом приборов или просто – комплексом. Фаза обслуживания одного требования одним конкретным прибором (от начала до конца) будет называться операцией. Набор операций по обслуживанию конкретного требования будет называться маршрутом. Введём обозначения некоторых характеристик комплекса: mc – модель управления, характеризующая наличие межоперационных буферных накопителей, а значит, возможность межоперационных перерывов в обслуживании (0 – перерывы запрещены; 1 – перерывы разрешены); dmp – показатель гибкости, т.е. время, в течение которого комплекс способен обслуживать поступившие ранее требования при отсутствии новых требований на входе; s – сменность обслуживания комплекса (1, 2, 3 – смены); i – номер (код) модели прибора; p_i – коэффициент профилактических (регламентных) простоев прибора i ($0 < p_i < 1$, причем его конкретное значение определяется паспортными характеристиками прибора, установленными изготовителем); n_i – количество приборов модели i в составе комплекса; $n_{d,i}$ – количество межоперационных буферных накопителей после группы из n_i приборов модели i ($n_{d,i} = 0$ при mc = 0).

Таким образом, обслуживающий комплекс описывается как

$$W = \left(mc, dmp, s, \left\{\left(i, p_i, n_i, n_{d,i}\right) \mid i = 1, \ldots, I\right\}\right),$$

где I – количество различных моделей приборов комплекса, т.е. комплекс разбивается на группы из нескольких единиц идентичных приборов.

Относительно единиц оборудования вводится естественное дополнительное ограничение – в каждый конкретный момент времени любой прибор из W может совершать только одну операцию над одним конкретным требованием (принцип запрета мультиобработки).

Для определенного класса задач может быть задан также граф, описывающий топологию транспортных путей, у которого вершинами являются приборы комплекса, а ребра отражают возможность непосредственной транспортировки от прибора к прибору. В этом случае, как правило, ребро помечается дополнительными характеристиками, например, длиной транспортировки между приборами, которые оно связывает, количествоv средств транспортировки на этом ребре, ограничениями на пропускную способность транспортировки и т.п. Если такой граф задан, то он будет обозначаться через Γ_W. Тогда пара (W, Γ_W) называется архитектурой комплекса W.

Любую операцию по обслуживанию требования можно описать следующим образом: d_k – уникальный номер (код) требования; W_k – получатель итога обслуживания (например, отчет на конкретный компьютер ЛВС или другой комплекс для порождённого требования или позиция начальной загрузки участка шлифования или рабочее место 3 участка сборки 7 и т.п.); r_k – номер (код) конечного пакета требований, в которое входит данное обслуженное требование; k_r – кратность вхождения обслуженного требования в конечный пакет порождённого требования (шт.); kz_k – коэффициент задела (запасных частей); kb_k – коэффициент сбоев обслуживания (брака); pt_k – транспортная партия (количество требований d_k в транспортном пакете); kj – номер операции; i(k,j) – номер (код) модели (марки) прибора (i(k,j) = 1.. I); t(k,j) – длительность операции (длительность обслуживания одного требования d_k); ki(k,j) – код (идентификатор) инструмента (набора инструментов); ps(k,j) – размер партии по стойкости инструмента; pd(k,j) – время подготовительное требования (загрузка требования); zd(k,j) – время заключительное требования (выгрузка требования); pi(k,j) – время подготовительное инструмента (установка инструмента); zi(k,j) – время заключительное инструмента (удаление инструмента); pp(k,j) – время подготовительное транспортной партии (подготовка к загрузке (например, установка оснастки)); zp(k,j) – время заключительное транспортной партии (например, удаление оснастки).

Таким образом, множество технологических маршрутов требований (кадров телеметрии, туристических групп, узлов, изделий), предназначенных для обслуживания данным комплексом, (номенклатура) есть

$$D = \{d_k, W_k, r_k, k_r, kz_k, kb_k, pt_k, \{kj, i(k,j), ki(k,j), ps(k,j), pd(k,j), zd(k,j), pi(k,j), zi(k,j), pp(k,j), zp(k,j), t(k,j)\}_{j=1}^{J_k}\}_{k=1}^{K},$$

где J_k – количество операций требования d_k; K – количество требований в номенклатуре комплекса. В дальнейшем множество D будет называться номенклатурой требований комплекса W, или просто – номенклатурой.

В маршрутах, в основном, важен не только «физический» смысл операций, но и порядок их выполнения. Например, в задаче диспетчирования туристических групп виды транспорта и пункты назначения располагаются во вполне определённом порядке, в гальваническом производстве промывка деталей в нейтрализующем растворе производится после нанесения очередного слоя покрытия, а не наоборот, в механообработке сначала сверлят отверстие, а потом его протягивают, а не наоборот и т.п. Таким образом, доля операций, порядок которых можно произвольно менять, в большинстве процессов обслуживания весьма незначительна, и поэтому можно ввести дополнительное ограничение – порядок операций над каждым требованием множества D задан жестко и не может быть нарушен системой управления (принцип соблюдения порядка операций). Введение этого ограничения вообще-то усложняет алгоритмы управления комплексом, поскольку лишает возможности дополнительного манёвра изменением порядка операций, но зато полнее отвечает требованиям реальности.

Без нарушения общности дальнейших рассуждений можно считать, что количество требований в транспортной партии и партии по стойкости инструмента равны единице; времена транспортировки, смены инструмента, а также подготовительное и заключительное равны нулю.

Если это не так, то общее время выполнения операции легко пересчитать. Нулевое время транспортировки означает, что граф Γ_W игнорируется, поскольку всегда можно организовать обслуживание требований с некоторым упреждением на доставку.

Итак, будем считать, что заданы архитектура комплекса

$$W = \{mc,\ dmp,\ \{i,\ p_i,\ n_i,\ n_d\}_{i=1}^{I}\}$$

и маршруты номенклатуры требований

$$D = \{d_k,\ W_k,\ r_k,\ k_r,\ kz_k,\ kb_k,\ \{kj,\ i(k,j),\ t(k,j)\}_{j=1}^{J_k}\}_{k=1}^{K}.$$

3. Понятия эффективной загрузки, интенсивности, критичной группы приборов и сбалансированности партии требований. Предположим, что на вход комплекса W в момент времени t^0 поступила партия требований из D в виде множества $D^0 = \{d_k,\ m_k\}_{k=1}^{K^0}$, где $K^0 \subseteq K$, $d_k \in D$, m_k – количество требований (транспортных партий) d_k.

Если к моменту t^0 остались не обслуженные или не до конца обслуженные требования из предыдущей партии D^{-1} (момент t^{-1}), то объединяем их с D^0, с учетом того, что не до конца обслуженные требования имеют остаточные «усеченные» маршруты из D, т.е. незаконченная деталь d_k как бы порождает новый маршрут d_k', в котором времена выполненных операций равны 0, время (до завершения выполняемой в текущий момент времени t^0) операции на приборе i(k,j) равно $t'(k,j) = t^z(k,j) - t^0$, где $t^z(k,j)$ – абсолютное время завершения операции kj, а остальные времена совпадают с d_k.

Для $\forall\, i \in W$ такого, что i = i(k,j), рассмотрим сумму $T_i^0 = \sum_{k=1}^{K^0} m_k \times t(k,j)$,

где $m_k \in D^0$, $i(k,j),\ t(k,j) \in D$.

T_i^0 представляет собой требуемый эффективный фонд времени всех приборов группы i для обслуживания партии D^0.

Рассмотрим множество $T^0 = \{ T_i^0 / n_i \}_{i=1}^{I}$; i, $n_i \in W$, которое является множеством средней эффективной загрузки одного прибора для каждой группы i, $\forall i \in W$ при обслуживании партии D^0 и множество

$$V^0 = \{ V_i^0 \}_{i=1}^{I} = \{ (\sum_{k=1}^{K^0} m_k) / (T_i^0 / n_i) \}_{i=1}^{I}; \; n_i \in W, m_k \in D^0.$$

V_i^0 представляет собой среднюю интенсивность обслуживания одного прибора группы i, $\forall i \in W$, измеряемую в требованиях (транспортных партиях) за единицу времени.

Группа $\alpha \in W$ называется критичной для партии D^0 если $T_\alpha^0 / n_\alpha = \max_{i=1..I} (T_i^0 / n_i)$, т.е. группа α является наиболее загруженной и, соответственно, её интенсивность V_α^0 минимальна (см. также понятие «bottleneck» в [12]). Партия D^0 называется сбалансированной (с архитектурой W), если $T_\alpha^0 / n_\alpha = T_i^0 / n_i$ и соответственно $V_\alpha^0 = V_i^0$, $\forall i \in W$, т.е. все группы оборудования из W являются критичными (имеют одинаковую эффективную загрузку и работают с одинаковой интенсивностью).

4. Расчет архитектуры комплекса. В реальных приложениях обслуживание требований всегда имеет некую конечную цель. Например, в обслуживании пакетов телеметрии целью является анализ состояния объектов и выдача соответствующих пакетов управляющих воздействий. В сфере материального производства обслуживание требований есть обработка (изготовление) деталей и узлов, которые в свою очередь предназначены для сборки готовых изделий или отгрузки комплектов готовых деталей в соответствии с заказами. Кроме того, понятно, что обслуженное требование порождает не обязательно конечный результат, но и возможно включается в некоторые дополнительные, порождённые пакеты требований для других промежуточных обслуживающих комплексов и т.д. Все эти комплексы в совокупности представляют собой единую систему (Центр управления полётами, Центр управления АС, станкостроительный или машиностроительный завод, специализированная мастерская и т.п.). Отметим, что и ко всей подобной системе вполне применимо определение «обслуживающий комплекс», но с добавлением слова «автономный». Конечной целью функционирования всего автономного комплекса является выполнение некоторого портфеля заказов, т.е. перечня конечных (сборочных) пакетов с указанием их количества и периода времени на их комплектацию (отгрузку).

Итак, рассмотрим строку портфеля заказов:

– конечный (сборочный) пакет Р в количестве NP шт.;
– интервал времени обслуживания Т;
– сменность обслуживания для комплекса s;
– множество моделей (марок) приборов $\{i, pi\}_{i=1}^{I}$;
– номенклатура требований для комплекса

$$D = \{d_k, W_k, r_k, k_r, kz_k, kb_k, \{ kj, i(k,j), t(k,j) \}_{j=1}^{J_k} \}_{k=1}^{K};$$

Требуется рассчитать архитектуру комплекса W = { mc, dmp, s, $\{i, p_i, n_i, n_{d,i}\}_{i=1}^{I}$ }, т.е. определить количества единиц приборов n_i для каждой группы $\forall\, i = 1.. I$.

Алгоритм расчёта архитектуры обслуживающего комплекса.

1. Выбрать из множества D требования, у которых $r_k = P$.

2. Построить для них подмножество

$$D^P = \{d_k, N_P\cdot k_r\cdot (1+ kz_k+ kb_k)\}_{k=1}^{K^0},$$

где $K^0 \subseteq K$, $d_k \in D$,

$N_P\cdot k_r\cdot (1+ kz_k+ kb_k)$ – количество требований d_k, входящих в состав N_P единиц пакета Р с учетом коэффициентов заделов (запасных частей) и возможных сбоев обслуживания (брак).

3. i = 1.

4. Для всех операций над требованиями из K^0 таких, что i(k,j) = i вычислить фонд эффективного времени работы одной единицы прибора группы i по формуле:

$$T^P{}_i = \sum_{k=1}^{K^0} N_P\cdot k_r\cdot (1+ kz_k+ kb_k) \cdot t(k,j).$$

5. Вычислить количество единиц приборов группы i по формуле:

$$n= T_i^P \cdot (1+ p_i + er + mp) \cdot 3/s/ T,$$

где p_i – паспортное значения коэффициента профилактических (регламентных) простоев прибора марки i; er – коэффициент, компенсирующий возможные ошибки планирования ($\approx$0,1-0,2); mp – коэффициент возможного развития производства пакетов Р (определяется маркетологами).

6. n_i = Entire(n) + 1.

7. i = i + 1.

8. Если i $\le K^0$, то перейти к п. 4.

9. Конец алгоритма.

Таким образом, алгоритм рассчитывает архитектуру комплекса W = {mc, dmp, s, $\{i, p_i, n_i, \varnothing\}_{i=1}^{I}$ }, где $\varnothing$ означает, что межоперационные накопители пока отсутствуют. Расчет n_d будет приведен ниже.

5. Примеры и выводы.

Здесь уместно сделать несколько замечаний.

1. Назовём величину $k_r \cdot (1+ kz_k+ kb_k)$ сборочным комплектом требования d_k, $\forall k = 1.. K^0 \subseteq K$, предназначенным для сборки одного конечного пакета P. Если снять ограничения 0-вых переналадок и транспортировок то, с точки зрения оптимизации количества переналадок, транспортировок и ритмичности производства, размер транспортной партии для этого требования должен быть равен сборочному комплекту. Во всяком случае он должен быть кратен (с коэффициентом как > так и < 1, но $\leq N_P$) сборочному комплекту. Так вот, в п. 2 алгоритма можно в диалоге с технологом определить размеры транспортных партий pt_k для требований d_k, $\forall k = 1.. K^0 \subseteq K$, а затем в п. 4 алгоритма учесть эти размеры, времена переналадок (оснастки, инструмента) и некоторое среднее время транспортировки при вычислении длительности операции $t(k,j)$.

Повторяя алгоритм расчета несколько раз, можно выбрать оптимальное соотношение между размерами транспортных партий и количествами единиц приборов комплекса.

Вообще то в работе [13] показано, что на долю собственно формообразующих операций в механообработке приходится 10-15% времени, остальное время операции занимают переналадки и транспортировки. Именно поэтому выбор размеров транспортных партий приобретает особенный смысл, поскольку позволяет выполнять одну транспортировку и переналадку инструмента и оснастки на несколько основных операций.

2. Рассмотрим дробную величину n (см. п.5 алгоритма) и целую ni (см. п.6 алгоритма), $\forall i = 1.. I$, которая появляется из-за того, что например 0,3 единицы обслуживающего прибора, к сожалению, не бывает. Если $\exists i$ такие, что $n_i - n > 0,5$, то технологу необходимо попытаться либо выбрать более производительную модель прибора, либо уменьшить коэффициент развития производства пакетов, либо перенести профилактики приборов в нерабочую смену (p_i=0) и т.п. После этого повторить алгоритм.

3. Если сборка конечных пакетов происходит на одном(й) комплексе (линии) сборки (т.е. за один период T должно собираться несколько конечных пакетов одной модификации, за следующий период T1 другое количество пакетов другой модификации и т.д.), то все выше приведенные расчеты следует производить для каждого периода отдельно и выбирать из них максимальное количество приборов по каждой группе. Если сборка конечных пакетов (изделий) происходит на нескольких, параллельно работающих сборочных комплексах (линиях), то расчеты следует производить для каждого комплекса в отдельности, а

затем суммировать количество приборов по каждой группе.

4. Подставим партию DP= $\{dk,\ NP\cdot kr\cdot\ (1 + kzk + kbk)\}_{k=1}^{K^0}$ (см. п.2 алгоритма) вместо партии D0 = $\{dk,\ mk\}_{k=1}^{K^0}$.

Тогда $\forall$ i = 1.. I, $TPi = \sum_{k=1}^{K^0} NP\cdot kr\cdot(1 + kzk + kbk)\cdot t(k,j)$; (см. п. 4 алгоритма) представляет собой требуемый эффективный фонд рабочего времени всех единиц оборудования группы i при обработке партии DP. Рассмотрим множество $T^P = \{T_i^P\ /\ n_i\}_{i=1}^{I}$; i, $n_i \in W$, которое является множеством средней эффективной загрузки одной единицы прибора для каждой группы i, $\forall$ i $\in$ I при обработке партии D^P.

$T^P = \{T_i^P\ /\ (T_i^P\cdot(1+ p_i + er + mp)\ /\ T)\}_{i=1}^{I}$ (п. 5 алгоритма), или

$T^P = \{T/(1+ p_i + er + mp)\}_{i=1}^{I}$;

и множество $V^P = \{V_i^P\}_{i=1}^{I} = \{(\sum_{k=1}^{K^0} N_P\cdot k_r\cdot (1+ kz_k+ kb_k))\ /\ T_i^P\ /\ n_i\}_{i=1}^{I} =$

$$= \{(\sum_{k=1}^{K^0} N_P\cdot k_r\cdot (1+ kz_k+ kb_k))\ /\ (T/(1+ p_i + er + mp))\}_{i=1}^{I} =$$

$$= \{(1+ p_i + er + mp)\cdot(\sum_{k=1}^{K^0} N_P\cdot k_r\cdot (1+ kz_k+ kb_k))\ /\ T\}_{i=1}^{I};\ n_i \in W,\ m_k \in D^P.$$

V_i^P представляет собой среднюю интенсивность работы одной единицы прибора группы i, $\forall$ i $\in$ I, измеряемую в требованиях (транспортных партиях) за единицу времени.

Легко видеть, что величины $T_i^P / n_i \approx T_j^P / n_j$ и, соответственно, $V_i^P \approx V_j^P$, $\forall\ i \neq j$; $i,j \in I$ (отличаются только коэффициентами переналадок приборов p_i, p_j). Следовательно, по определению, партия D^P является сбалансированной с архитектурой W, рассчитанной по алгоритму. Обозначим общую для всех i среднюю эффективную загрузку через T_α^P, а интенсивность через V_α^P.

Ясно, что выпуск N_P конечных пакетов P за время T при их последовательном производстве равносилен выпуску одного пакета P за время T/ N_P. Поэтому партия требований, содержащая один сборочный комплект для изделия P, будет также сбалансированной.

В свою очередь, отсюда следует вывод, что любая партия требований из D, не являющаяся одним или несколькими сборочными комплектами для конечного пакета P, не будет сбалансированной с архитектурой W и вызовет появление критичных групп приборов, т.е. перегрузку некоторых групп и неоправданные простои остальных.

Из приведенных результатов следует, что залогом возможности оптимального управления обслуживающего комплекса является правильное его проектирование и адекватное оперативное управление.

Для систем цифрового управления реальными объектами в качестве требований могут выступать кадры телеметрии, а конечными сборочными пакетами могут быть кадры управляющих воздействий.

И несколько слов об управлении материальными дискретными производствами.

В конце 70-х начале 80-х годов XX века в связи с бурным ростом темпов производства и необходимостью быстрой переналадки на выпуск новых улучшенных модификаций бытовых товаров и, по этой причине, настоятельной необходимостью роботизации и автоматизации всех составляющих производственного процесса, возникла программа создания Гибких Производственных Систем (Flexible Manufacturing Systems). Эта программа предусматривала создание гибких производственных участков на базе групповых технологий (тела вращения, корпусные детали, пластмассовое литьё, сборка и т.п.) объединенных автоматизированными складскими и транспортными системами в единый производственный комплекс. В оптимизации управления такими участками и производством в целом не последнюю роль играли решения задачи теории расписаний.

Но уже в 90-х годах стало очевидным, что задачи концентрации (укрупнения) производства и достижения его гибкости (переналаживаемости) во многом взаимно исключают друг друга.

Наметилась тенденция развития небольших специализированных производств, работающих по кооперации друг с другом или с крупными производителями-сборщиками готовой продукции. Однако и для таких производств задачи построения оптимальных расписаний вполне актуальны и получили название Проблема Мастерской (Job Shop Problem). Термин же Flexible Manufacturing System сейчас чаще используется для обозначения отдельной автоматизированной единицы оборудования (модуля).

Дело в том, что в реальном производстве почти всегда речь идёт не о том, чтобы сделать что-то быстрее или медленнее, а о том, чтобы сделать это вовремя, т.е. именно тогда, когда надо.

В случае Flexible Manufacturing Systems для расчетов производственных мощностей необходимо использовать следующие соображения:

– определить тип производства (на одном и том же оборудовании и с одним и тем же персоналом невозможно производить, например, мотоциклы и электробритвы – хоть одновременно, хоть поочерёдно);

– провести маркетинговые исследования сбыта выбранной продукции и определить номенклатуру, объёмы и периодичность выпуска изделий;

– определить количество линий конечной сборки (одна – с переналадкой на выпуск различных модификаций изделия, или несколько – параллельно выпускающих различные наименования изделий (например, газонокосилки и квадроциклы));

– произвести разузлование изделий, группировку узлов по принципу технологического подобия сборки (здесь же определяются задания для служб снабжения на покупные узлы), и определить состав промежуточных сборочных участков;

– произвести раздетализацию узлов, группировку деталей по принципу подобия технологических маршрутов (здесь же определяются задания для служб снабжения на покупные детали), и определить состав производственных участков по принципу технологического подобия (токарные, корпусные, металлического, пластмассового литья и т.п.).

В случае подхода Job Shop Problem расчеты существенно проще. Задача сужается до нескольких производственных участков и одного сборочного, а то и просто до 1 – 3-х производственных. Такая мастерская может быть рассчитана, например, только на выпуск деталей типа тел вращения определенных габаритов, веса, параметров точности и из определённых материалов. Маркетинговые исследования сводятся к поиску реальных или потенциальных заказчиков на подобные детали или комплектующие и их результаты имеют тенденцию сильно меняться от периода к периоду. Поэтому оборудование для таких мастерских нужно выбирать из требований производства достаточно «сложных» деталей этой группы и в достаточно «большом» количестве, хотя в дальнейшем при плохой работе маркетинговой службы это может привести к неоправданным простоям оборудования.

Итак, и в случае Flexible Manufacturing Systems, и в случае Job Shop Problem имеются:

– состав участков (линий) конечной сборки и для каждого из них планы выпуска готовых изделий за определённое время T (период планирования);

– состав участков промежуточной сборки и для каждого из них номенклатура собираемых узлов D (если один и тот же узел входит в состав разных изделий, то во множестве D он должен порождать разные маршруты);

– состав производственных участков и для каждого из них номенклатура деталей D (если одна и та же деталь входит в состав разных изделий, то во множестве D она должна порождать разные маршруты).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kacem I., Hammadi S., Borne P. Pareto-optimality Approach for Flexible Job-shop Scheduling Problems: Hybridization of Evolutionary Algorithms and Fuzzy Logic // Journal of Mathematics and Computers in Simulation. – 2002. – № 5. – P. 37-49.*
2. *Gonsalves J.F., Mendes J.J., Resende M.G. A Hybrid Genetic Algorithm for the Job Shop Scheduling Problem. – [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2002/09/538.pdf.*
3. *Fast parallel heuristics for the job shop scheduling problem (context). – [Электрон. ресурс] / Steinhofel A. et al. – 2002. Режим доступа: http://citeseer. ist.psu.edu/context/2067952/0.*
4. *Long Run Maximum Profit Job Shop Problem: Third Haifa Workshop on Interdisciplinary Applications of Graph Theory, Combinatorics and Computing. – [Электрон. ресурс]. – 2003. Режим доступа: www.cri.haifa.ac.il/events/ 2003/graph03/graph03_Schedule.htm.*
5. *Blazewicz J. GRAPH THEORY: The Relation Between the No-Wait Job Shop Problem and the Traveling. – [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: www.mistaconference.org/2003/programme.pdf.*
6. *Vukobratovic M. Modeling and Scheduling Control of FMC Based on Stohastic Perti-Nets // Int. Symp. "New Theory of Contact Tasks in Robotics". – [Электрон. ресурс]. – 2004. – Режим доступа: www.imp.bg.ac.yu/prez/lab150/mvpube.htm.*
7. *Kacem I., Hammadi S., Borne P. Lower bounds for evaluating schedule performances in flexible job shops // PerMIS'02 "Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop". – Gaithersburg, MD, USA, 2002. – P. 347-363.*
8. *Kacem I., Hammadi S., Borne P. Approach by Localization and Multi-objective Evolutionary Optimization for Flexible Job-Shop Scheduling Problems // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – Part C. – 2002. – № 1, Vol. 32. – P. 1-13.*
9. *Jansen K., Mastrolilli M., Solis-Oba R. Approximation Algorithms for Flexible Job Shop Problems // Proceedings of Latin American Theoretical Informatics (LATIN'2000). – P. 68-77.*
10. *Mastrolilli M., Gambardella L.M. Effective Neighborhood Functions for the Flexible Job Shop Problem // Journal of Scheduling. – 2000. – Vol. 3, Issue 1. – P. 3-20.*
11. *Dauzere-Peres S., Roux J., Lasserre J. B. Multi-resource shop scheduling with resource flexibility // European Journal of Operational Research. – 2000. – № 107. – P. 289-305.*
12. *Balas E., Vazacopoulos A. Guided Local Search with Shifting Bottleneck for Job Shop Scheduling // Management Science. – 2000. – № 44. – P. 262-275.*
13. *Шелковой А.Н. Организационно-технологические основы реижиниринга производственных систем металлообработки: Дис. ... докт. техн. наук. – Х., 2004. – 470 с.*

Поступила 23.06.2006

Рецензент: доктор технических наук, профессор В.А. Золотарев, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина.