

СИСТЕМООБРАЗУЮЩИЕ ФАКТОРЫ В ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ТРАНСПОРТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Рассматриваются предпроектные процедуры, необходимые для построения имитационной модели гетерогенного транспортно-производственного комплекса. Приводится содержательное и формальное описание комплекса производственных задач. Описывается имитационная модель и приводится численный пример.

Создание эффективно-действующих автоматизированных систем управления производственными процессами основано в значительной степени на использовании различного класса и целевого назначения имитационных моделей. При этом особое внимание уделяется способам реализации конкретных моделей, организации в них процессов накопления данных и их последующий обработке. Как правило, предпроектному анализу моделей уделяется незаслуженно мало внимания, что в последствии приводит к большим и неэффективным затратам, недостаточной функциональной адекватности и обоснованности принимаемых решений. Сегодня накоплен достаточный опыт использования имитационных моделей производственных систем, в том числе и негативный, анализ которого позволяет сделать однозначный вывод. Необходимо существенно повысить роль системного анализа и формализации предпроектных процедур построения имитационных моделей, обеспечив тщательное и систематическое использование основных принципов системного анализа в многокритериальных задачах последовательного процесса принятия решений по достижению целевых установок.

Целью настоящей работы является исследование предпроектных процедур, необходимых при построении имитационной модели многостаночной гетерогенной транспортно-производственного комплекса (ГТПК). Такие системы, реализованные на многих машиностроительных и механообрабатывающих предприятиях, являются высоко производительными и обладают достаточной гибкостью структур. В условиях рыночной экономики входной поток заказов в машиностроении является мелкосерийным и многономенклатурным, что существенно снижает эффективность ГТПК. Поэтому значительно возрастает роль оперативного управления транспортно-производственными маршрутами. Целью оперативного управления является обеспечение распараллеливания, разрешения конфликтных ситуаций в реальном масштабе времени.

Основу ГТПК составляют производственные модули (ПМ) и автоматизированные транспортные средства (ТС). Функцией ТС являются реализация материальных потоков, в том числе организация межстаночных связей, перемещение предметов труда, товарной продукции, оснастки, отходов производства, инструмента.

На рисунке 1 показаны варианты компоновки и структуры ГТПК на базе кольцевой ТС с использованием перемещаемых роботов-манипуляторов (ПРМ), ПМ на основе обрабатывающих центров (ОЦ), предметных столов ОЦ (ПС), накопителей (Н). Указанные подсистемы являются основными структурно-функциональными элементами ГТПК.

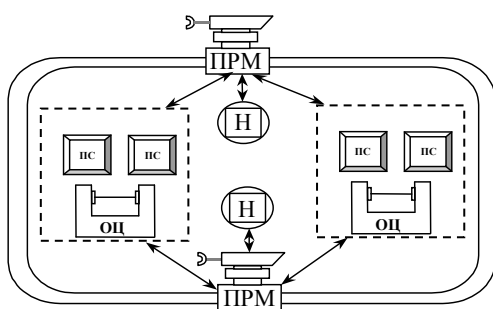


Рисунок 1 — Вариант компоновки ГТПК на базе кольцевой ТС с использованием ПРМ

Содержательное описание комплекса производственных задач. Комплекс производственных задач, решаемых ГТПК, зафиксирован в виде сети, вершины которой ориентированы на события. Указанный комплекс можно разбить по производственным признакам на несколько функциональных классов. Производственные задачи каждого такого класса решаются ПМ соответствующей специализации.

Предполагается, что известны длительности обработки каждой задачи определенным числом ПМ соответствующей специализации, а также производственно-технологический маршрут. Кроме того, комплекс производственных задач таков, что для него справедливы следующие утверждения.

1. В ГТПК обеспечивается мультирежимы функционирования ПМ и ТС.
2. Множество, описывающее комплекс заказов, сформировано как объединение множеств, соответствующих каждому классу производственных задач.

3. Производственные задачи по некоторому конструкторско-технологическому либо сборному признаку образуют классы.

4. Объединение множеств, отражающих совокупность всех классов задач, образует комплекс производственного заказа.

5. Производственная задача, принадлежащая i -му классу разрешима на специальных ПМ с выделенными индексами.

6. Каждая производственная задача допускает распараллеливание и использование для ее выполнения нескольких ПМ и ТС (от их минимального до максимально возможного числа).

Возможны различные постановки оптимизационных задач, возникающих в конкретной производственной ситуации. Наиболее часто используемой является следующая: найти, сколько и каких ПМ и ТС каждой специализации должны входить в ГТПК для обеспечения минимального времени исполнения известного комплекса производственного заказа [1].

Формальное описание комплекса производственных задач. Введем ряд обозначений: K — число классов производственных задач; Φ_m — множество производственных задач; $\Phi = \{\Phi_m : m = 1, \dots, K\}$; G — сеть производственных задач; $G = (V, A)$, где V — узел (событие); A — дуги (производственные задачи); R — число узлов сети, $R = |V|$; (i, j) — дуга, исходящая из i -го узла в j -й узел сети; $n_{i,j,r}$ — объем ресурса вида r , выделяемого на дугу (i, j) ; $n_{i,j}$ — множество возможных значений ресурса, выделяемого на дугу (i, j) ;

$n_{i,j,r} = \{n_{i,j,r} = 1, K, |n_{i,j}| \}$; $n_{i,j}^{\min} = n_{i,j,1}$; $n_{i,j}^{\max} = n_{i,j,|n_{i,j}|}$; $n_{i,j} = \{n_{i,j,r}, r = 1, K, |n_{i,j}| \}$; $N = \{n_{i,j} : (i, j) \in A\}$; $t_{i,j,r}$ — длина дуги (i, j) , т.е. длительность решения соответствующей производственной задачи, при количестве $n_{i,j,r}$ ресурса, выделенного на соответствующую ей задачу; $f_{i,j}$ — функция, устанавливающая соответствие

между $n_{i,j,r}$ и $t_{i,j,r}$, $r = 1, K, |n_{i,j}|$; $f = \{f_{i,j} : (i, j) \in A\}$ — множество функций $f_{i,j}$; s — вариант распределения ресурса; $n_{i,j}^s$ — количество ресурса, выделенного для (i, j) -задачи при s -ом распределении;

N_m^s — суммарное количество ресурса, распределяемого в m -ую группу при s -ом распределении:

$N_m^s = \{n_{i,j}^s : (i, j) \in \Phi_m\}$; $n_m^{\min} = \min\{n_{i,j}^{\min} : (i, j) \in \Phi_m\}$; $n_m^{\max} = \max\{n_{i,j}^{\max} : (i, j) \in \Phi_m\}$; $n_m = \{n_m^{\min}, K, n_m^{\max}\}$; B —

множество вариантов распределения: $B = \times_{m=1}^{\Delta K} n_m$; P^s — s -е распределение ресурса: $P^s = \{N_m^s : m = 1, \dots, K\}$; P^0 —

оптимальное распределение ($P^s, P^0 \in B$); U_i — множество номеров узлов сети, исходящие из которых

дуги инцидентны i -му узлу; $l_{z,i}$ — путь из z -го узла сети в i -й узел; $l_i = l_{1,i}$; L_i — множество всех путей l_i ;

$T^s(l_i)$ — длина пути l_i , соответствующего распределению P^s ; $T_{P_i}^s$ — наиболее ранний возможный срок

(НРВС) достижения i -го узла (i -й узел считается достигнутым, если завершилось движение по самому длинному из путей L_i); $T_{P_i}^s = \max\{T^s(l_i) : l_i \in L_i\}$; $T_{P_i}^0$ — НРВС достижения i -го узла сети, соответствующее

распределению P^0 ; M — распределяемое количество ресурса.

Задача формулируется следующим образом: даны: G, N, f, K, Φ, M ; необходимо найти P^0 :

$T_{P_r}^0 = \min_B \{ \max_i \{ T^s(l_i) \} \}$, при ограничении

$$\sum_{P^s} N_m^s \leq M, \forall P^s \in B. \quad (1)$$

При разработке имитационной модели используется подход на основе введения в рассмотрение двух системообразующих факторов, сочетание которых позволяет существенно упростить структуру моделирующего алгоритма. В наиболее общем виде структура имитационного алгоритма для ГТПК изображена на рисунке 2. Дальнейшая конкретизация такого алгоритма основана на использовании первого системообразующего фактора путем выделения в структуре ГТПК информационно связанных объектов (ИСО). Их основу образуют транспортная система ГТПК и комплекс ПМ, а также подсистема цехового оперативно-диспетчерского управления (ОДУ). Как следует из рисунка 2, имитационный алгоритм образован несколькими вложенными циклами, основные из которых определяются числом ИСО и количеством реализаций. Модель должна обеспечить формирование результирующих воздействий, формируемых ОДУ по результатам обработки всех информационных потоков, поступающих от каждого ИСО с учетом их взаимного влияния и конфликтов, возникающих при использовании ресурсов. Размерность имитационной модели по этой причине существенно возрастает, становится слабо обозримой и приводит к многочисленным ошибкам при программной реализации. Для разрешения возникших противоречий обратимся к формальной постановке задачи и сделаем ряд полезных замечаний, которые позволят структурно укрупнить имитационную модель. Задача оптимизации управления ГТПК является

целочисленной и относится к классу задач оптимального управления ресурсами на сетях. Известны основные методы аналитического решения этого класса задач при существенных ограничениях на общность задачи в целом в имитационной модели можно обеспечить последовательное соблюдение лишь одного из множества таких ограничений, при этом структура моделирующего алгоритма существенно упрощается. Сама имитационная модель представляется семейством подмоделей, в каждой из которых обеспечивается соблюдение указанного ограничения. Таким образом, в соответствии с концепциями системного подхода принцип соблюдения единственного ограничения в каждой подмодели является вторым системообразующим фактором для ИМ в целом. Основными ограничениями, которые следует учитывать, в подмоделях являются следующие:

- 1) ограничение на вид целевой функции или формирующих ее компонентов;
- 2) уровень допустимых погрешностей решения задачи распределения ресурсов;
- 3) качественный вид зависимости длительности производственных операций от потребляемого ресурса (монотонная, выпуклая, равномерно-дискретная);
- 4) возможность использования встроенной процедуры решения задачи о максимальном потоке в сети.

Учет системных ограничений <1,2,3,4> в подмоделях приводит к конкретизации числа вложенных циклов в моделирующем алгоритме.

Обобщенная блок-схема является основой предлагаемого подхода к исследованию предпроектных процедур для принятия решений по оперативному управлению ГТПК на основе имитационной модели. Рассмотрим функциональный пример, иллюстрирующий предлагаемый подход. Комплекс производственных задач состоит в изготовлении и последующей сборке осесимметричного изделия, включающего в себя два вала и двух втулок для них. Причем, как вал, так и втулки получаются из одной и той же заготовки. Производственная партия образуется, таким образом, комплектом двух изделий типа вал-втулка. Производственно-технологический маршрут состоит из следующих основных операций:

- (1,2) и (1,3) — первичная обработка вала А и В и втулки А и В соответственно;
- (2,4) и (2,5) — вторичная обработка вала А и втулки А;
- (3,4) и (3,5) — вторичная обработка вала В и втулки В соответственно;
- (4,6) и (5,6) — совместная обработка вала А и В и втулки А и В;
- (6,7) — сборка изделия.

Производственные операции (1,2) и (1,3) обеспечиваются ПМ₁ и ТС₁, операции (2,4) и (2,5) — ПМ₂ и ТС₂, операции (3,4) и (3,5) — ПМ₃ и ТС₂, (4,6) и (5,6) — ПМ₄ и ТС₃, а операция (7,6) обеспечивается работой ПМ₅ и ТС₃.

Все ПМ и ТС являются одноканальными системами, что приводит к конфликтным ситуациям при выполнении производственных задач. Система является нестационарной, т.к. интенсивности поступления производственных заданий и длительность их выполнения зависит от времени. Общий объем

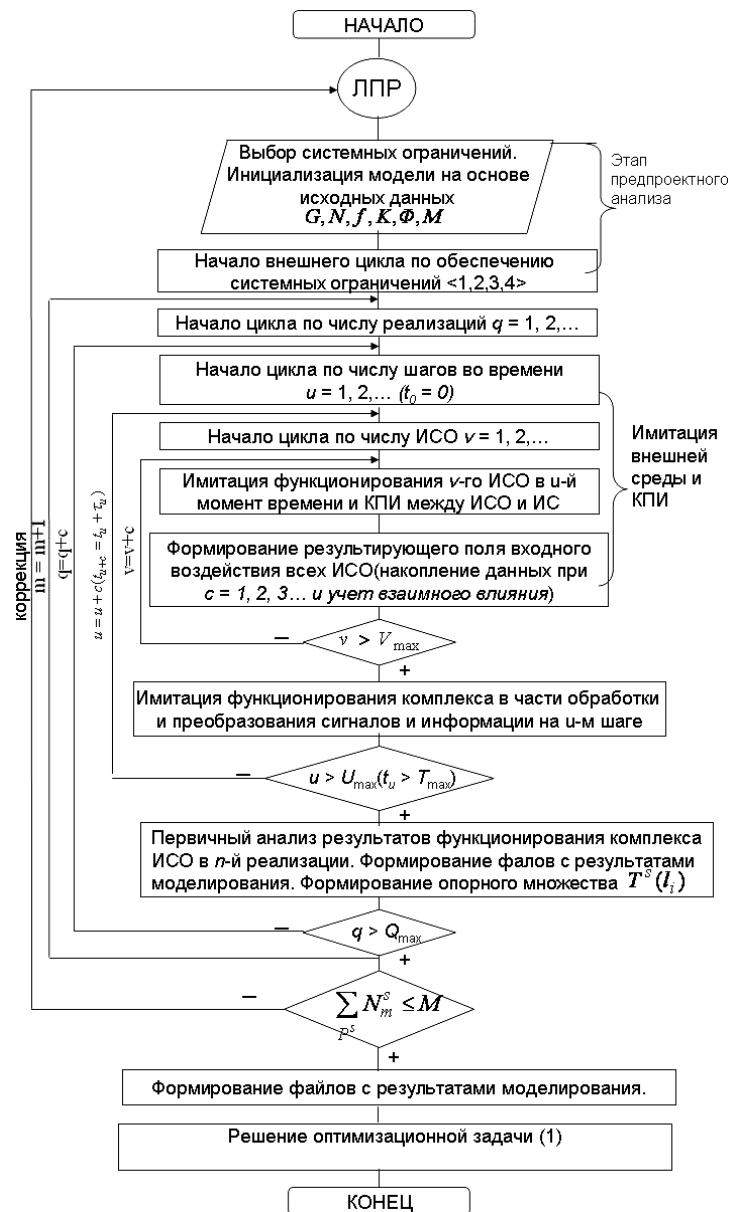


Рисунок 2 — Обобщенная блок-схема имитационной модели ГТПК на основе комплекса информационно связанных объектов

производственного заказа E единиц $E=E_1+E_2$, где E_1 — число производственных задач на входе в систему, E_2 — число выполненных производственных задач.

Как было отмечено, каждая производственная задача обеспечивается как транспортным, так и производственным ресурсом. Таким образом, на сетевом графе G каждая дуга A идентифицируется с соответствующим $ПМ(A)$ и $ПМ(ТС)$, что соответствует рисунку 3а, а вся сеть G , описывающая производственный заказ, может быть представлена в виде как показано на рисунке 3б.

Структура ГТПК, учитывающая множество производственных задач, изображена на рисунке 3, на котором дуга соответствует работе по выполнению фрагмента производственной задачи, узел соответствует событию, связанному с окончанием либо с началом смежных с ним работы.

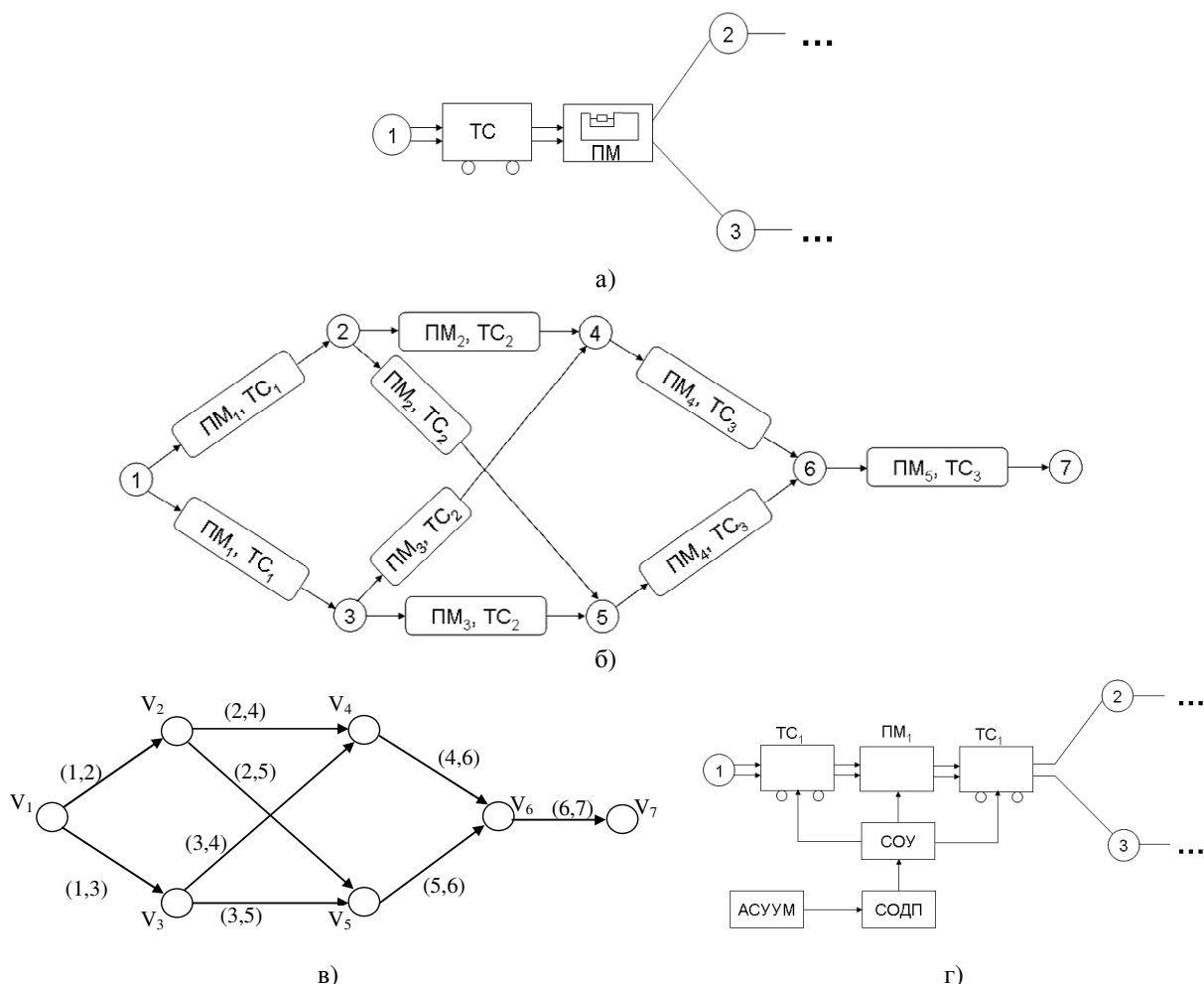


Рисунок 3 — Структура ГТПК, учитывающая множество производственных задач

Описание моделирующей программы для ГТПК с детерминированными маршрутами. Входными данными для программы являются следующие:

- число ПМ в ГТПК;
- число заготовок в партии, количество партий;
- список маршрутов обработки заготовок в каждой партии с указанием последовательности кодов ПМ, необходимых на соответствующей операции;
- длительность наладки, обработки и доставки для каждой заготовки в соответствии с заданными маршрутами.

Все заготовки одной партии имеют одинаковые маршруты и равные временные характеристики обработки и доставки.

Результаты моделирования содержат следующую документацию:

- списки характеристик загрузки каждого ПМ в течение всего процесса обработки заданного количества заготовок; список представляет собой последовательность записей, соответствующих каждому отрезку времени, в течение которого ПМ был занят обработкой заготовки; каждая запись списка содержит указания на момент начала наладки ПМ перед предстоящей операцией обработки, момент завершения обработки, номер партии, номер заготовки, обработанной на данной операции и номер операции по порядку, определяемому заданным маршрутом обработки;

— список характеристик загрузки транспортного средства, в каждой записи которого указаны момент начала движения от центрального склада к ПМ, от которого пришел вызов, момент завершения движения от ПМ к центральному складу, номер доставляемой заготовки, номер партии, которой принадлежит заготовка, номер операции, выполняемой на ПМ, к которому осуществлялось движение;

— список системных характеристик процесса обработки, в котором указываются общее время обработки заданного количества заготовок, коэффициенты загрузки ПМ, коэффициент загрузки ТС.

Алгоритмы моделирования. В программе реализованы две основные дисциплины ГТПК:

— порядок поступления заготовок на обработку определяется случайным образом, т.е. номер партии заготовок и номер заготовки в партии — случайные числа;

— высший приоритет в порядке поступления имеет партия заготовок с минимальной суммарной длительностью доставки и обработки заготовок по заданному маршруту; приоритеты остальных партий расположены в порядке убывания в соответствии с возрастанием суммарной загрузки ГТПК заготовок.

В начальный момент времени все ПМ ГТПК свободны и готовы начать работу. Все заготовки ожидают обработки на складе.

Первой выполняется первая по заданному маршруту операция для первой заготовки из партии с наивысшим приоритетом. Обработка начинается с доставки заготовки с центрального склада к соответствующему по маршруту ПМ, затем осуществляется его наладка. Одновременно с подготовкой ЦМ транспортное средство, доставившее заготовку, возвращается на центральный склад. По окончании наладки ОЦ начинается собственно операция обработки заготовки.

В момент окончания первой операции обработки какой-либо из заготовок вызывается ТС для доставки обработанной заготовки на склад. С этого момента соответствующий ПМ считается свободным. Если транспортное средство свободно к моменту вызова, то оно начинает движение от склада к ПМ и затем перевозит обработанную заготовку от ПМ на склад, в противном случае заготовка ожидает, пока транспортная магистраль освободится. Момент времени, когда обработанная заготовка оказывается на складе, фиксируется. С этого момента заготовка готова к выполнению следующей по маршруту операции.

Далее моделируется выполнение второй по счету операции по заданному маршруту обрабатываемой заготовки и так далее, пока не будут выполнены все предусмотренные маршрутами операции обработки.

В это же время проверяется возможность выполнения первой по маршруту операции следующей заготовки в списке приоритетов. Если необходимый ПМ свободен, то запрашивается транспортное средство для доставки заготовки со склада, в противном случае заготовка ожидает на центральном складе. Если ТС занято обслуживанием другого ПМ, то заготовка ожидает, когда оно освободится. ПМ считается занятым с момента доставки заготовки со склада. Время, в течение которого ПМ занят, складывается из суммы времени наладки и времени обработки. ТС считается занятым с момента начала движения от склада к ПМ и до момента завершения обратного движения от ПМ к складу. Заготовка находится в процессе обработки с момента начала движения ТС, доставляющего ее к ПМ, и до момента поступления на склад по окончании операции. Время обработки заготовки складывается из времени доставки к ПМ, времени подготовки ПМ, времени непосредственного выполнения операции, времени возможного ожидания ТС, если оно несвободно, времени движения ТС от склада к ПМ и времени доставки от ПМ к складу.

Далее приводятся численные результаты, полученные при моделировании обработки двух партий заготовок. ГТПК состоит из пяти ПМ и одного ТС ($n=5$). На обработку поступают две партии заготовок ($m=2$), число заготовок в каждой партии одинаково и равно пяти ($V_1=V_2=5$). Маршруты обработки заготовок из разных партий одинаковы: каждая заготовка должна пройти последовательную обработку на каждом ПМ ГТПК. Длительности доставки, наладки ПМ и обработки на соответствующих операциях представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Длительности доставки, наладки ПМ и обработки на соответствующих операциях в минутах

Маршрут		Партия 1			Партия 2		
№ оп	№ ОЦ	t движ	t наладки	t обр	t движ	t наладки	t обр
1	1	2	3	10	2	3	50
2	2	2	3	20	2	3	10
3	3	2	3	15	2	3	15
4	4	2	3	5	2	3	65
5	5	2	3	17	2	3	7

Работа моделирующей программы была организована в трех режимах:

— выбор заготовки из всего массива заготовок, ожидающих обработки, осуществляется случайным образом; получено 10 реализаций процесса обработки, среднее общее время работы ГТПК составило 679 ед;

— высший приоритет имеет первая партия, т.к. суммарное время доставки и обработки на всех операциях маршрута заготовки этой партии минимально; заготовки в первой партии обрабатывались в соответствии с их порядковыми номерами; во вторую очередь моделировалась обработка заготовок второй партии;

— в первую очередь проведено моделирование обработки заготовок из второй партии, т.к. суммарное время доставки и обработки на всех операциях маршрута заготовок этой партии максимально.

Системные характеристики ГТПК в различных режимах поступления заготовок представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Системные характеристики ГТПК

Дисциплина поступления	Общее время обработки	Коэфф. занятости ПМ1	Коэфф. занятости ПМ2	Коэфф. занятости ПМ3	Коэфф. занятости ПМ4	Коэфф. занятости ПМ5	Коэфф. занятости ТС
Случайная	722	0,46	0,25	0,25	0,53	0,21	0,55
Случайная	664	0,50	0,27	0,27	0,57	0,23	0,60
Минимальная длительность маршрута	722	0,46	0,25	0,25	0,53	0,21	0,55
Максимальная длительность маршрута	678	0,49	0,27	0,27	0,56	0,22	0,59

На этапе предпроектного анализа решается оптимизационная задача в соответствии с алгоритмом представленном на рисунке 2. За счет перераспределения ресурсов удалось снизить общее время выполнения заказа на 15,5 %, повысить средний коэффициент занятости ПМ на 11 %, а коэффициент использования ТС — на 14 %.

В перспективе предполагается развитие предложенного подхода за счет нахождения исходной рабочей точки для имитационной модели на основе решения численными методами в системы обыкновенных дифференциальных уравнений соответствующей динамическим процессам смены состояний системы, предусмотренных в графе производственных заданий.

Библиографический список

1. Соколицын С.А. Многоуровневая система управления ГПС в машиностроении. / С.А. Соколицын, В.А. Дуболазов, Ю.Н. Домченко; Под общ. ред. С.А. Соколицына. — СПб.: Политехника, 1994. — 208 с.
2. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технологии / Ю.И. Рыжиков. — СПб.: КОРОНА принт; М.: Альтекс-А, 2004. — 384 с.
3. Скаткова Н.А. Оптимизация управлений транспортной системой участка механообработки при неоднородных потоках деталиопераций. / Н.А. Скаткова // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. — Севастополь, 2007. — Вып. 10. — С. 11 — 15.

Поступила в редакцию 8.04.2008 г.