

УДК 004.89

О.Н. ЗАМИРЕЦ<sup>1</sup>, А.А. БЕЛОЦКИЙ<sup>1</sup>, Р.В. АРТЮХ<sup>2</sup><sup>1</sup> ГП «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения», Харьков, Украина<sup>2</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

## АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ И СТОИМОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕПЬЮ

*Предлагается метод оценки характеристик последовательного технологического процесса с использованием математического аппарата систем массового обслуживания, который позволяет имитировать выполнение модели производственных процессов с учетом занятости временных ресурсов и наличия необходимого количества материальных ресурсов. Смоделировав структуру производственного процесса, можно выявить «слабые» места в системе. Путем изменения различных параметров процесса достигается оптимальное соотношение времени и стоимости технологических процессов. Рассмотрены две стоимостные модели массового обслуживания, которые направлены на достижение компромисса между прибылью, получаемой от реализации запланированного к производству объема продукции и потерями прибыли, обусловленными задержками в производственном процессе и возможными ограничениями на объем производства.*

**Ключевые слова:** производственный процесс, загрузка оборудования, система массового обслуживания, параметры технологического процесса, стоимостные модели.

### Введение

Производственные предприятия, стремясь сохранить свои позиции на рынке в условиях конкуренции и нестабильности, вынуждены непрерывно улучшать производственный процесс, осваивая новые технологии и оборудование. Особую остроту приобретают вопросы улучшения методов планирования и управления процессом развития производства, разработкой инновационной продукции и прогнозирования мер по адаптации к изменяющимся требованиям внешней среды.

Инновационное развитие предприятия представляет собой развитие системы факторов и условий, необходимых для его осуществления. Следовательно, инновационная стратегия предприятия должна отражать содержание и основные направления процесса инновационного развития предприятия.

Анализ современной инновационной проблематики позволяет выделить следующие основные виды инноваций [1]:

- инновация продукции,
- инновация технологических процессов,
- организационная инновация.

Основной вклад в формирование таких свойств как надежность, конкурентоспособность, стоимость продукции и др. принадлежит этапу производства и

основной его составляющей – технологическому процессу. Таким образом, основные характеристики продукции, которые обеспечивают ее рыночные преимущества, зависят от уровня и совершенства технологии её изготовления.

Инновация технологических процессов – это процесс обновления производственного потенциала предприятия, который направлен на рост производительности труда и экономии ресурсов. Такая инновация дает возможность увеличивать прибыль, внедрять новые технологии.

### Постановка задачи исследования

Технологический менеджмент направлен на решение задачи выбора конкретных видов технологических процессов и обеспечения определенного технологического потенциала, необходимого предприятию для выпуска продукции в настоящее время и на долгосрочную перспективу.

Основное содержание стратегии развития производства заключается в установлении интегрированного баланса между используемым оборудованием, рабочей силой и выпускаемой продукцией [2].

При развитии производства возникает необходимость в решениях о производственных мощностях, в частности, определении объемов и типов мощностей, которые необходимо иметь дополни-

тельно или сократить в определенный период. Они могут возникать в ситуации роста, когда продукция пользуется спросом.

Таким образом, к числу основных факторов, обеспечивающих реализацию стратегии развития производства, относят [3]:

- настоящий и будущий баланс производственных мощностей
- степень использования существующих технологий и оборудования.

Рассмотрим задачу баланса производственных мощностей. На абсолютно сбалансированном предприятии выход продукции с первой производственной стадии точно соответствует возможностям производственных ресурсов второй стадии, которая, в свою очередь, дает объем продукции, оптимальный для третьей стадии, и т.д. Однако, на практике, такие "совершенные" проекты невозможны, так как для разных стадий, как правило, характерны разные наилучшие оперативные уровни.

Существует несколько способов борьбы с несбалансированностью системы [4]. Один из них состоит в повышении производственной мощности тех стадий, которые выступают "узкими местами". Это достигается с помощью временных мер, таких как введение сверхурочных работ, долгосрочная аренда дополнительного оборудования или привлечение дополнительных мощностей путем заключения контрактов с субподрядчиками. Еще один способ заключается в создании на стадии, которая является "узким местом", резервных товарно-материальных запасов, гарантирующих бесперебойный выход продукции. Третий способ связан с дублированием производственных мощностей.

Представление производственного процесса изготовления изделия набором последовательно связанных унифицированных моделей структур операций позволяет строить процессные модели отдельных технологических процессов и оценивать такие характеристики как производительность, ритмичность, оснащенность, загрузку межцеховую и внутрицеховую маршрутизацию.

Смоделировав структуру производственного процесса, можно выявить «слабые» места в системе или осознать необходимость введения в нее каких-либо дополнительных элементов. Далее, меняя различные параметры процесса, можно достигать требуемого соотношения времени производственного цикла и стоимости выпускаемой продукции в различных вариантах технологического процесса.

Сложность, объем, ритмичность и серийность производства наиболее полно используются как исходная информация на начальных стадиях оценки вариантов развития предприятия и соответствующую

щей модернизации производства [5].

Вторая группа задач связана с управлением и контролем использования технологического оборудования и устройств, которое обеспечивают протекание производственного процесса в требуемом режиме [6]. Это связано с тем, что при разработке технологического процесса на изготовление нового изделия либо модернизацию существующего необходимо с одной стороны максимально использовать существующий парк оборудования и оснастки, с другой стороны - обеспечить сжатые сроки и снизить стоимость процесса производства. В ходе решения этого вопроса возникает задача поиска наилучшего решения для различных типов технологического процесса (ТП) изготовления продукции с использованием различного состава оборудования и оснастки и вытекающими из этого различными сроками и расходами на реализацию планов развития, что во многом определяется уровнем гибкости ТП.

Следующим этапом оценки выбранного варианта структуры ТП является анализ параметров его функционирования в рамках производственной системы. Для решения этой задачи необходимо построить модель процессов производства, которая позволяет оценить динамику функционирования на основе выбранных вариантов структур ТП.

### Решение задачи

Предлагается метод оценки характеристик последовательного технологического процесса с использованием математического аппарата систем массового обслуживания (СМО), который позволяет имитировать выполнение модели производственных процессов с учетом занятости временных ресурсов и наличия необходимого количества материальных ресурсов. В результате, можно оценить реальное время выполнения как одного ТП, так и их последовательности.

Рассмотрим производственную систему для изготовления изделий, выпускаемых малыми и средними партиями. Последовательная линейная структура технологического процесса характерна для поточных (автоматических и неавтоматических) линий конвейерного типа. Более сложная производственная система включает группу станков для автоматической и механической обработки, систему загрузки и разгрузки заготовок, конвейерную систему транспортирования заготовок. Поэтому необходимо смоделировать как линейную, так и разветвленную структуру реализации технологического процесса с учетом параллельного использования нескольких единиц однотипного оборудования. Смоделировав структуру производственного процесса, можно выявить «слабые»

места в системе или осознать необходимость введения в нее каких-либо дополнительных элементов. Далее можно, меняя различные параметры процесса, достигать оптимального соотношения времени и стоимости технологических процессов.

При моделировании для каждого элемента ТП рассчитываются:

- среднее время ожидания обработки детали;
- среднее время простоя оборудования;
- максимальная длина очереди (объема промежуточного складирования деталей);
- коэффициент использования оборудования;
- среднее время технологической операции;
- максимальное время технологической операции.

Также следует оценить общие показатели ТП:

- общее время изготовления производственного заказа планируемого объема;
- время завершения ТП;
- общий коэффициент использования оборудования по времени;
- общий коэффициент использования оборудования в зависимости от объема производства.

Поток заявок, подлежащих обслуживанию, может проходить через одну очередь, через несколько очередей либо через комбинацию этих двух вариантов. Выбор формата структуры частично зависит от вида производства и частично – от ограничений, связанных с конкретным ТП.

Одноканальная, однофазовая структура - самый простой тип структуры очереди и, если входящие потоки и процесс обслуживания описываются стандартными распределениями, то формулы теории СМО позволяют решить соответствующие задачи. Если же эти распределения нестандартные, то такие задачи решаются с помощью средств имитационного моделирования.

Особый интерес представляют комбинированные структуры, которые подразделяется на две категории:

- с переходом многоканального обслуживания в одноканальное,
- с альтернативными путями.

В первом случае разные очереди сливаются в одну для последующего однофазового обслуживания либо они сливаются в одну очередь для многофазового обслуживания (например, когда комплектующие, поступающие с разных линий по сборке узлов, поступают на основную сборочную линию). Во втором случае также возникают два варианта, отличающихся требованиями, предъявляемыми к упорядочению потока. Первый вариант соответствует многофазной многоканальной структуре, но с возможностью перемещения деталей на обработку из одного канала в другой после завершения первой

обслуживающей операции. Во втором варианте количество фаз и каналов может варьироваться, но также после выполнения первой обслуживающей операции.

Существуют четыре основных типа задач анализа очередей. Все они имеют разную структуру, и для их решения применяются разные уравнения. При этом выполняется допущение, что анализируемый процесс в данный момент является стационарным (устойчивым и неизменным).

Рассмотрим СМО, в которых имеется как входной поток (производственный заказ), так и выходной - поток обслуженных заявок (произведенных изделий). Исследуются такие структуры, в которых параллельно функционируют  $c$  узлов (единиц оборудования), так что одновременно могут обслуживаться сразу  $c$  заявок. При этом единицы оборудования, используемого параллельно для одной технологической операции с точки зрения быстродействия предполагаются эквивалентными. В любой произвольно выбранный момент времени все находящиеся в системе заявки следует разделить на те, которые находятся в очереди (на промежуточном складе) и, следовательно, ждет, когда ее начнут обслуживать, и те, которые уже обслуживаются (обрабатывается).

Рассмотрим структуру  $(M/D/c):(GD/N/\infty)$ . В соответствии с принятыми обозначениями [7] здесь речь идет о СМО с пуассоновским входным потоком, фиксированным временем обслуживания и  $c$  параллельно функционирующими узлами обслуживания. Дисциплина очереди не регламентирована. Кроме того, независимо от того, сколько требований поступает на вход обслуживающей системы, данная система (заявки в очереди и обслуживаемые заявки) не может вместить более  $N$  требований. То есть заявки, не попавшие в блок ожидания, вынуждены обслуживаться в другом месте. Это ограничение на планируемый объем производства. Источник, порождающий заявки на обслуживание, имеет неограниченную (бесконечно большую) емкость, что соответствует отсутствию ограничения на производственные ресурсы.

Конечная цель анализа систем и процессов массового обслуживания заключается в разработке критериев эффективности функционирования СМО. При выполнении условий стационарности будем рассматривать следующие операционные характеристики СМО:

$p_n$  - вероятность того, что в системе находится  $n$  заявок на обслуживание (т.е. в производственном процессе находится  $n$  обрабатываемых изделий);

$L_s$  - среднее число в системе заявок в системе (обрабатываемых изделий в производственном процессе);

$L_q$ - среднее число заявок в очереди на обслуживание (изделий на промежуточном складе);

$W_s$  - средняя продолжительность пребывания заявки в системе (средняя длительность производственного процесса);

$W_q$  - средняя продолжительность пребывания заявки на обслуживание в очереди (среднее время пребывания изделия на промежуточном складе).

По определению

$$L_s = \sum_{n=0}^{\infty} np_n, L_q = \sum_{n=c}^{\infty} (n-c)p_n.$$

Между  $L_s$  и  $W_s$  (как и между  $L_q$  и  $W_q$ ) существует строгая взаимосвязь. В частности, если частота поступлений в систему заявок на обслуживание равняется  $\lambda$  (интенсивность поступления требований), то имеем

$$L_s = \lambda W_s, L_q = \lambda W_q. \quad (1)$$

Приведенные выше соотношения справедливы и при гораздо менее жестких предположениях, не налагающих никаких специальных ограничений ни на распределение моментов последовательных поступлений требований, ни на распределение продолжительностей обслуживания. Однако в тех случаях, когда частота поступлений заявок на обслуживание равняется  $\lambda$ , но не все заявки имеют возможность попасть в обслуживающую систему, например, из-за ограничения на объем промежуточного склада, соотношения (1) необходимо видоизменить путем такого нового определения параметра  $\lambda$ , которое позволило бы учесть только действительно "допускаемые" в систему требования. Тогда, вводя в рассмотрение  $\lambda_{эфф}$  - эффективная частота поступлений, т.е. количество требований, действительно допущенных в блок ожидания обслуживающей системы, в единицу времени, будем иметь

$$\lambda_{эфф} = \beta\lambda, \quad 0 < \beta < 1.$$

Это означает, что только часть поступающих заявок на обслуживание действительно "проникает" в систему.

Если средняя скорость обслуживания равняется  $\mu$  и, следовательно, средняя продолжительность обслуживания равняется  $1/\mu$ , то справедливо следующее соотношение:

$$W_s = W_q + 1/\mu.$$

Умножая левую и правую части этого соотношения на  $\lambda$ , получаем

$$L_s = L_q + \lambda/\mu.$$

Последнее соотношение остается справедливым и в том случае, если  $\lambda$  заменить на  $\lambda_{эфф}$ . При этом для  $\lambda_{эфф}$  можно записать

$$\lambda_{эфф} = \mu(L_s - L_q).$$

Стоимостные модели массового обслуживания направлены на определение такого уровня функционирования обслуживающей системы, при котором достигается "компромисс" между следующими двумя экономическими показателями:

а) прибылью, получаемой от реализации запланированного к производству объема продукции;

б) потерями прибыли, обусловленными задержками в производственном процессе и возможными ограничениями на объем производства с соответствующими производственными мощностями (оборудованием, кадрами).

Первый показатель ассоциируется со степенью функциональной активности СМО, тогда как второй - с пребыванием производственного оборудования в состоянии простоя или с необходимостью производственной системы выпустить запланированный объем продукции. Увеличение функциональной мощности обслуживающей системы должно приводить к сокращению времени пребывания изделий на промежуточном складе, то есть наращиванию объемов производства. Это означает, что по мере того как производственные затраты, связанные с использованием оборудования, возрастают из-за повышения технологического уровня производства (модернизации оборудования), выраженные в экономических терминах потери, связанные с простоями, будут уменьшаться.

Рассмотрим две задачи организации производства, моделируемые с помощью стоимостных моделей СМО.

1. Задача определения оптимального состава оборудования для обеспечения соответствующей скорости обслуживания, характеризующей производительность.

Решение этой задачи связано с нахождением компромисса в условиях, когда более производительное оборудование стоит дороже. Для принятия решения издержки следует сопоставить с доходом.

Рассмотрим одноканальную модель массового обслуживания со средней частотой поступления требований, равной  $\lambda$ , и со средней скоростью обслуживания, равной  $\mu$ . Предполагается, что скорость обслуживания поддается регулированию, то есть возможна модернизация оборудования. Требуется определить оптимальное значение скорости обслуживания на основе построенной стоимостной модели. Введем следующие обозначения:

$C_1$  - выраженный в стоимостной форме «выигрыш» за счет увеличения на единицу значения  $\mu$  в течение единичного интервала времени;

$C_2$  - "цена" ожидания (т.е. обусловленные вынужденным ожиданием экономические потери) в единицу времени и в расчете на одно изделие;

$TC(\mu)$  - стоимостный показатель, определяемый формулой

$$TC(\mu) = C_1\mu + C_2L_S.$$

Следует отметить, что затраты на обслуживание, отнесенные к единице времени, прямо пропорциональны  $\mu$ . Затраты в единицу времени, обусловленные пребыванием заявок на обслуживание в режиме ожидания, равняются среднему значению числа требований, находящихся в СМО, умноженному на "цену" ожидания, определенную в расчете на одно требование и отнесенную к единице времени.

Поскольку  $\mu$  является величиной непрерывной, ее оптимальное значение может быть получено путем приравнивания к нулю первой производной  $TC(\mu)$  по  $\mu$ . Например, для частного случая - процесса (M/M/1):(GD/∞/∞)

$$TC(\mu) = C_1\mu + C_2\lambda / (\mu - \lambda),$$

и для оптимального значения  $\mu$  имеем

$$\mu = \lambda + \sqrt{C_2\lambda / C_1}.$$

Рассмотрим ситуацию, когда в блоке ожидания обслуживающей системы может находиться не более  $N$  заявок, что является ограничением на план выпуска продукции. Таким образом, имеет место процесс (M/M/1):(GD/N/∞), и стоимостную модель можно видоизменить, с тем чтобы за счет увеличения значения  $N$  уменьшить число изделий, которые СМО может «потерять» (не произвести). В данном случае величина  $N$  рассматривается как управляющая переменная, оптимальное значение которой (вместе с  $\mu$ ) определяется путем минимизации

$$TC(\mu, N) = C_1\mu + C_2L_S + C_3N + C_4\lambda p_N,$$

где  $C_3$  - "стоимость" увеличения (рассчитанная на единицу времени) вместимости блока ожидания обслуживающей системы;

$C_4$  -экономические потери, связанные с невозможностью включить в блок ожидания системы еще одного, требующего обработки, изделия;

$\lambda p_N$  - число изделий, «потерянных» системой в единицу времени.

2. Задача определения оптимального количества однотипного оборудования - количества каналов обслуживания или числа обслуживающих приборов.

Эта задача связана с получением компромиссного решения, обусловленного тем, что увеличение количества оборудования влечет рост затрат на их содержание (эксплуатацию, обслуживание и амортизацию). При этом одновременно появляется экономия вследствие уменьшения простоев другого оборудования в технологической цепи, следовательно, возникает возможность увеличить объем производства

Рассмотрим мультиканальную модель. Стоимостная модель массового обслуживания в данном случае должна быть ориентирована на определение

оптимального числа обслуживающих приборов, которое обозначено выше через  $c$ . Предполагается, что значения  $\lambda$  и  $\mu$  фиксированы. Интегральная стоимость показателей задается формулой

$$TC(c) = C_1c + C_2L_S(c),$$

где  $C_1$  - отнесенные к единице времени затраты на обеспечение функционирования одного дополнительного обслуживающего станка,

$L_S(c)$  - среднее число находящихся в производственной системе обрабатываемых изделий.

Оптимальное значение  $c$  находим из условий

$$TC(c - 1) \geq TC(c) \text{ и } TC(c + 1) \geq TC(c),$$

что эквивалентно неравенству

$$L_S(c) - L_S(c + 1) \leq C_2 / C_1 \leq L_S(c - 1) - L_S(c).$$

Величина  $C_1 / C_2$  является указателем того, где должен начинаться поиск оптимального значения  $c$ .

Сформулируем этапы обобщенного алгоритма решения данной задачи с применением вышеприведенных формул.

1. Определить среднее количество изделий в очереди при исходном количестве оборудования.
3. Определить потери рабочего времени в стоимостном выражении.
4. Сделать предположение об увеличении оборудования на одну единицу.
5. Определить время ожидания в очереди при увеличении количества оборудования.
6. Сравнить дополнительные затраты на использование дополнительного оборудования с сэкономленным временем на выполнение технологического процесса.

## Заключение

Анализируя полученные характеристики, можно:

- оценить средние значения и разброс ключевых параметров технологического процесса,
- идентифицировать временные ресурсы – «бутылочные горлышки» – перегруженные ресурсы, к которым постоянно выстраивается очередь операций, в результате чего они задерживают выполнение всего ТП,
- проанализировать производство и потребление материальных ресурсов,
- проанализировать статистику по изменению значений переменных в предложенной модели.

## Литература

1. Водачек, Л. Стратегия управления инновациями на предприятии [Текст] / Л. Водачек, О. Водачкова. - М.: Наука, 1989. - 215 с.

2. Стратегия развития промышленного предприятия [Текст]. – Н-ск: ИЭиОПП СО АН СССР, 1990. – 187с.

3. Буренина, Г.А. Основы стратегического анализа деятельности промышленного предприятия [Текст] / Г.А. Буренина - СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 1999. – 379с.

4. Маховикова, Г.А. Планирование на предприятии [Текст] / Г.А. Маховикова, Е.Л. Кантор, И.И. Дрогомирецкий. - М: Издательство «Юрайт», 2010. – 144 с.

5. Шепеленко, Г.И. Экономика, организация и планирование производства на предприятии [Текст] / Г.И. Шепеленко. – М: Изд. центр "МарТ", Феникс, 2010. – 608 с.

6. Андрейчиков, А.В. Интеллектуальный метод синтеза технологических инноваций [Текст] / А.В. Андрейчиков // Известия вузов. Машиностроение. – 2003. – №10. – С. 47 – 62.

7. Фомин, Г.П. Математические методы и модели в коммерческой деятельности [Текст] / Г.П. Фомин. - М: Финансы и статистика, 2001. – 247 с.

Поступила в редакцию 10.08.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. информационных управляющих систем О.В. Малеева, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ТА ВАРТІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ З ПОСЛІДОВНИМ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ЛАНЦЮГОМ

*О.М. Замирець О.О. Белоцький, Р.В. Артюх*

Пропонується метод оцінювання характеристик послідовного технологічного процесу з використанням математичного апарату систем масового обслуговування, який дозволяє імітувати виконання моделі виробничих процесів з урахуванням зайнятості часових ресурсів і наявності необхідної кількості матеріальних ресурсів. Змодельовавши структуру виробничого процесу, можна виявити «слабкі» місця в системі. Шляхом зміни різних параметрів процесу досягається оптимальне співвідношення часу і вартості технологічних процесів. Розглянуто дві вартісні моделі масового обслуговування, які спрямовані на досягнення компромісу між прибутком від реалізації запланованого до виробництва обсягу продукції і втратами прибутку, зумовленими затримками у виробничому процесі і можливими обмеженнями на обсяг виробництва.

**Ключові слова:** виробничий процес, завантаження обладнання, система масового обслуговування, параметри технологічного процесу, вартісні моделі.

### ANALYSIS OF DYNAMIC AND COST CHARACTERISTICS MANUFACTURING PROCESSES WITH SERIAL CIRCUIT TECHNOLOGY

*O.N. Zamirets, A.A. Belotsky, R.V. Artyukh*

Propose a method of performance evaluation process consistent with the use of the mathematical apparatus of systems Mass Service, which allows you to simulate the performance of models of production processes to the temporary employment of resources and the availability of the required amount of material resources. Modeled the structure of the production process, we can identify "weak" in the system. By changing various process parameters, an optimum ratio of the time and cost processes is achieved. We consider two cost models of queuing aimed at reaching a compromise between profit derived from sales to production of the planned volume of production and loss of profits resulting from delays in the production process and possible restrictions on the production of relevant capacities.

**Keywords:** manufacturing process, loading equipment, system Mass Service, process parameters, the cost model.

**Замирець Олег Николаевич** – канд. техн. наук, зам. директора ГП «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения», Харьков, Украина, e-mail: nitip@kharkov.ukrtel.net.

**Белоцький Алексей Александрович** – аспирант ГП «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения», Харьков, Украина;

**Артюх Роман Владимирович** – науч. сотрудник, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.