

---

---

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОИСКИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

УДК 519.95+658.5.012.02

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

**В.И. Мамонов**

Новосибирский государственный университет  
экономики и управления «НИНХ»  
E-mail: mamonov@nsuem.ru

В статье рассматривается возможность исследования проблемы надежности функционирования производственной системы, состоящей из подсистем основного производства и обслуживающей подсистемы на основе использования приближенных аналитических моделей, основу которых составляют модели систем массового обслуживания с переменной интенсивностью обслуживания входного потока в подсистемах основного производства и модели систем массового обслуживания с приоритетными правилами восстановления технологического оборудования в обслуживающей системе.

*Ключевые слова:* система, надежность, регулирование, модели СМО.

## ENSURING RELIABILITY OF PRODUCTION SYSTEMS BY OPERATIONAL MANAGEMENT

**V.I. Mamonov**

Novosibirsk State University of Economics and Management  
E-mail: mamonov@nsuem.ru

In article considered the possibility of studying the problem of reliability of the production system consisting of subsystems of the main production and the service subsystem using approximate analytical models, which are based on models of queuing systems with variable service rate input in the subsystems of the main production and models of queuing systems with priority rules recovery process equipment in the host system.

*Key words:* production system, reliability, regulation, queueing model.

Для производственных систем, технико-технологическую основу которых составляют гибкие автоматизированные комплексы, важнейшим направлением повышения эффективности функционирования является совершенствование методов управления автоматизированным оборудованием как в процессе изготовления продукции, так и в процессе восстановления требуемой его работоспособности. Обеспечение эффективности функционирования ав-

томатизированной производственной системы приводит к решению сложной задачи: определению экономически эффективного уровня надежности производственной системы и его поддержанию различными методами в условиях воздействия на производственный процесс случайных возмущений.

Понятие гибкости производства тесно связано с концепцией надежности функционирования производственной системы [1]. Гибкость производственной системы отражает ее организацию с позиций соответствия и взаимобусловленности продукции, технологии и управления. Надежность отражает временную структуру процесса производства с позиций согласованности функционирования подсистем и системы в целом. Гибкость и надежность – это важнейшие и взаимосвязанные характеристики производственной системы и поэтому определение рациональных уровней этих характеристик должно осуществляться при рассмотрении системы в целом с позиций повышения экономической эффективности производства.

Надежность производственной системы обуславливается как технической надежностью ее отдельных элементов, так и уровнем качества функционирования системы в целом. Техническая надежность отдельных элементов непосредственно определяется через отказы элементов, многократно восстанавливаемых в обслуживающих системах [3]. Проблема экономической оценки надежности производственной системы должна рассматриваться с позиций эффективности функционирования системы во времени. Основная цель системы – выпуск качественной продукции определенной номенклатуры и количества в запланированные сроки. При существующих отклонениях фактических сроков готовности номенклатурных позиций от плановых характеристик надежности производственной системы является стабильность или нестабильность ее функционирования. Понятие нестабильности как надежностной характеристики более конструктивно, так как допускает четкую количественную меру – распределение времени запаздывания выпуска продукции относительно запланированных сроков. Экономическая оценка надежности производственной системы определяется распределением недовыпущенного объема продукции относительно плановых сроков. При известном стоимостном объеме выпуска продукции (относительно постоянном во времени) уровень надежности определяется средним временем задолженности, приводящим к соответствующим потерям от дефицита у потребителя [1]. В этом случае производственная система выступает как производитель товара и как его поставщик другим субъектам хозяйствования в цепочке поставок во внешней среде и потому для измерения количественной меры недовыпущенного объема продукции используются цены. Иначе обстоит дело, когда поставка номенклатурных позиций осуществляется звеньями основного производства внутри самой производственной системы; в такой ситуации недовыпущенный объем продукции может быть получен с использованием уровня средних совокупных затрат на данной стадии (этапе) производственного процесса.

Экономически оптимальным уровнем надежности для рассматриваемых производственных систем является такой уровень, который обеспечивает минимум суммы средних совокупных затрат в производственной системе и потерь от дефицита в звеньях (подсистемах) основного производства, образующихся вследствие нарушения сроков выпуска продукции. При этом совокупные затраты в подсистеме, допускающей выходной дефицит, включают в

том числе затраты на резервирование звена с целью уменьшения выходного (входного в смежную подсистему) дефицита и затраты на его компенсацию смежным производственным подразделением по ходу технологического процесса.

Весьма эффективным и важным в прикладном плане направлением обеспечения надежности производственных систем является временное резервирование. Согласно концепции надежности резервы производственной системы подразделяются на внутризвенные и межзвенные. В качестве внутризвенных резервов рассматриваются ресурсы дополнительного времени работы технологического оборудования, которые выступают как внутренние условия, обеспечивающие стабильность работы производственного звена. Источником межзвенных резервов времени являются запасы готовой продукции, выраженные либо в физических единицах, либо в резервном времени опережения ее выпуска данным подразделением по отношению к моменту потребления продукции смежными звеньями.

В этих условиях методы оперативного управления основным производством должны быть направлены на обеспечение надежности системы за счет оптимизации использования дополнительных резервов производительности. Методы оперативного управления восстановлением работоспособности оборудования позволяют существенно компенсировать последствия отказов и повысить эффективность использования высокопроизводительных станочных систем за счет обеспечения дополнительного резерва времени.

Источником повышения надежности системы за счет обеспечения дополнительного резерва времени оборудования является рационализация системы обслуживания станочных систем в соответствии с принципом: интенсивность восстановления работоспособности оборудования должна соответствовать степени его использования. Следовательно, методы оперативного управления восстановлением оборудования должны обеспечить выбор оптимальных правил и режимов восстановления, обеспечивающих дополнительный резерв времени работы оборудования; методы оперативного управления работой оборудования должны обеспечить оптимальное использование этого дополнительного резерва.

В качестве объекта изучения рассматривается система, состоящая из отдельного производственного звена, обслуживающей подсистемы, осуществляющей функции восстановления технологического оборудования и межзвенного резерва, обеспечивающего работу смежного по ходу производственного процесса подразделения.

При определенной нестабильности реализации плана моменты готовности номенклатурных позиций характеризуются многомерной плотностью распределения  $f(t)$ , где  $t$  – вектор, компонентами которого являются отклонения фактических сроков от плановых. При оптимальном использовании резервов по варианту  $u$  величина средних внутризвенных затрат  $\bar{C}(f_u(t))$  определяет параметры функции  $f_u(t)$ , т.е. обеспечивает указанное распределение методами оперативного управления резервами. Величина средних затрат и потерь  $\bar{C}(f_u(t), t^0)$  в межзвенном резерве определяется в зависимости от величины резервного опережения  $t^0$ , функционально связанного с распределением  $f_u(t)$ . Включение в целевую функцию компоненты  $\bar{C}_1(f_u(t))$ , обозначающей величину средних совокупных затрат, связанных с введением управления в системе

обслуживания оборудования, объясняется весьма заметным их влиянием на параметры функции  $f_u(t)$ , значения внутривенных затрат  $\overline{C}(f_u(t))$  и средних затрат и потерь в межвенном резерве  $\overline{C}(f_u(t), t^0)$ .

Показано, что при фиксированном распределении  $f(t)$  оптимальная величина резервного опережения  $\hat{t}^0$  определяется соотношением затрат от связывания оборотных средств в межвенном незавершенном производстве и потерь от дефицита [1]. Проблема обеспечения оптимальной надежности функционирования производственной системы сводится к решению задачи:

$$\overline{C}(f_u(t)) + \overline{C}_1(f_u(t)) + \overline{C}(f_u(t), \hat{t}^0) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$P_i^0(f_u(t)) = \hat{P}_i^0 \text{ для всех } i, \quad (2)$$

где  $\hat{P}_i^0$  – вероятность выпуска  $i$ -й номенклатурной единицы в пределах установленного срока, учитывающего величину  $\hat{t}_i^0$ .

Реализация модели прежде всего связана с получением распределений  $f_i(t_i)$  в зависимости от множества управляющих воздействий и величины дополнительно привлекаемых резервов во времени при изменении текущего состояния процесса в подсистемах основного и обслуживающего производства. В этих условиях использование имитационного моделирования становится необходимым и по существу единственно возможным для получения требуемых характеристик. Вместе с тем рассматриваемая система характеризуется значительным количеством управляющих воздействий и параметров дискретного и непрерывного вида с достаточно широким диапазоном их изменения. В подобной ситуации использование методов имитационного моделирования становится затруднительным. Поэтому к реализации модели применен двухэтапный подход. Суть подхода состоит в следующем: на основе разработанной аналитической модели исследуемой системы осуществляется настройка параметров имитационных моделей, т.е. выделение из всего множества возможных значений управляющих параметров существенно меньшего подмножества, содержащего в себе их рациональные (оптимальные) значения.

Необходимость разработки модели процесса обслуживания технологического оборудования обуславливается необходимостью определения экономически эффективных дисциплин, обеспечивающих требуемую работоспособность (уровень коэффициента готовности) станочных систем в подсистемах основного производства, в обслуживающей системе, а также расчета параметров, используемых при построении аналитических моделей подсистем основного производства. Вполне приемлемыми для этой цели являются модели систем массового обслуживания [2].

При модельном описании функционирования системы обслуживания последняя рассматривается как СМО с управлением: за счет привлечения дополнительных ресурсов (резервов) изменяется интенсивность восстановления технологического оборудования в зависимости от их числа в очереди. Для частных случаев получены аналитические зависимости.

Функционирование производственной системы описывается с помощью аппарата линейных стохастических сетей. Система состоит из подсистем основного производства с произвольным графом технологической связности в виде сети систем как управляемых СМО и обслуживающей системы как управляемой СМО с приоритетными правилами обслуживания.

Введение управления в моделях СМО подсистем обусловлено тем обстоятельством, что в реальной ситуации существуют специфические процессы регулирования. В зависимости от параметров очереди номенклатурных единиц в подсистеме начинают функционировать внутренние регуляторы. В качестве параметра очереди выбрано количество номенклатурных единиц (партий); в качестве внутренних регуляторов – динамическое изменение интенсивности обработки номенклатурных единиц. Рассматривается два типа управления: ступенчатое и циклическое. Ступенчатое управление состоит в увеличении интенсивности обработки всякий раз, когда количество партий в очереди проходит через одно из критических (пороговых) значений  $N_i, i = 1(1)m; m$  – число переключений или уровней регулирования по числу ожидающих обработку партий в очереди. При циклическом типе управления процесс оперативного регулирования осуществляется иначе: в случае однократного циклического управления при числе партий в очереди меньшим, чем  $M$ , их обработка осуществляется с номинальной интенсивностью; при числе партий равном или большим  $N(N > M)$  используется регулирование: интенсивность возрастает и остается на этом уровне, пока число партий в очереди не уменьшится до  $M$ . Очевидно, что при  $N = M + 1$  система с гистерезисом преобразуется в систему с одноступенчатым управлением.

В системах с регулированием при любом типе управления имеется множество управляющих параметров: вектор из величин дополнительных ресурсов и вектор уровней пороговых значений; от них существенно зависят временные параметры процесса обработки партий в подсистеме: технологическая составляющая производственного процесса  $\tau$  и межоперационное время  $\theta$ .

Сложность исследования оптимальных режимов функционирования подсистем в производственной системе существенно возрастает при учете воздействия случайных возмущений в виде отказов оборудования. Предложенный подход к оценке среднего количества функционирующих станочных систем в зависимости от количества партий, находящихся в обработке, в известной мере универсален. Учитывая, что среднее число функционирующих станков определяется не только собственно отказами, но и зависит от действия других случайных факторов, то, умея прогнозировать число работоспособных станочных систем при обработке определенного числа партий в подсистеме, можно исследовать как совместное, так и раздельное влияние на выходные характеристики производственной системы целого ряда случайных факторов. При описании функционирования подсистем в виде управляемых СМО с ненадежными каналами получены конечные формулы, позволяющие определять важнейшие характеристики:  $\bar{\tau}, \bar{\theta}$ .

Регулирование по множеству управляющих параметров оптимально, когда паре значений  $\bar{\tau}, \bar{\theta}$  соответствует минимальная величина критерия эффективности функционирования производственной системы в целом (1). Критерий эффективности для подсистемы  $j$  имеет вид средних затрат и включает:  $C_{vj}(\omega)$  – средние текущие затраты при работе подсистемы с дополнительным ресурсом;  $\omega$  – тип управления;  $\bar{C}_{\theta j}(\omega)$  – средняя величина затрат в оборотных средствах, связанных в незавершенном производстве в подсистеме  $j$ .

Задача оптимизации функционирования производственной системы заключается в определении параметров функционирования подсистем на мно-

жестве управляющих воздействий, обеспечивающих минимальное значение целевой функции:

$$\sum_{v=1}^{v_0} \left\{ \sum_{j=1}^N \min_{\omega \in \Omega_j} [\bar{C}_{\tau_j}(\omega, v) + \bar{C}_{\theta_j}(\omega, v)] \right\} Z_v \rightarrow \min \quad (3)$$

при условии

$$\sum_{v=1}^{v_0} \sum_{j=1}^N \alpha_j [\bar{\tau}_j^v(\omega^*) + \bar{\theta}_j^v(\omega^*)] Z_v \leq \bar{T}, \quad (4)$$

$$\omega^* \in \Omega_j \mid \min_v [\bar{C}_{\tau_j}(\omega, v) + \bar{C}_{\theta_j}(\omega, v)], \sum_{v=1}^{v_0} Z_v = 1, Z = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

и других уравнениях связи, где  $v$  – номер варианта, отражающего используемый набор приоритетных правил при восстановлении оборудования, тип управления в обслуживающей системе и число параллельно работающих каналов в подсистемах;  $\bar{T}$  – установленная средняя продолжительность пребывания номенклатурной позиции в производственной системе, равная

$\bar{T} = \sum_{j=1}^N \alpha_j (\bar{\tau}_j + \bar{\theta}_j)$ ,  $\alpha_j$  – среднее число прохождений номенклатурной единицы (партии) через  $j$ -ю подсистему.

При фиксированном параметре  $v^*$  структура задачи позволяет осуществить ее разложение: вместо одной задачи решается серия задач существенно меньшего размера; в качестве метода решения используется эффективный в данной ситуации метод динамического программирования. Сформулированная ниже постановка оптимизационной задачи правомерна при достаточно существенных предположениях: считается, что в подсистемах основного производства процесс протекает ритмично и равномерно, а потому обладает свойствами стационарного процесса и позволяет рассматривать временные характеристики движения номенклатурных позиций автономно друг от друга.

Оптимизация сети методом динамического программирования производится поэтапно. Этапом является оптимизация функционирования подсистемы. Пусть  $\bar{T}_j^k$  – средняя продолжительность производственного цикла при прохождении партии от  $j$ -й подсистемы до  $N$  при  $k$ -м варианте его выбора. Величины  $T_j^1, \dots, T_j^k, \dots, T_j^{k_0}$  представляют собой предположения о продолжительности пребывания партии в подсистеме  $j$ . Величина  $W_{jN}[\bar{T}_j^k]$  обозначает минимум средней величины затрат при обработке партии от  $j$  до  $N$  подсистемы при условии, что среднее время пребывания партии в подсистемах от  $j$  до  $N$  равно  $\bar{T}_j^k$  и распределено между ними оптимально. Для  $k = 1(1)k_0$  решается функциональное уравнение вида

$$W_{jN}[\bar{T}_j^k] = \min_{0 \leq \alpha_j(\bar{\tau}_j + \bar{\theta}_j) \leq \bar{T}_j^k} \{ \varphi_j(\bar{\tau}_j + \bar{\theta}_j) + W_{j+1,N}[\bar{T}_j^k - \alpha_j(\bar{\tau}_j + \bar{\theta}_j)] \}, \quad (5)$$

при этом 
$$\varphi_j(\bar{\tau}_j + \bar{\theta}_j) = \min_{\omega \in \Omega_j} \{ \bar{C}_{\tau_j}(\omega) + \bar{C}_{\theta_j}(\omega) \}, \quad (6)$$

$$|(\bar{\tau}_j + \bar{\theta}_j) - (\bar{\tau}_j^\omega + \bar{\theta}_j^\omega)| \leq h, \quad \omega \in \Omega_j \quad (7)$$

при остальных уравнениях связи с фиксированным  $v^*$ . Необходимость решения задачи с условиями (6)–(7) обусловлена зависимостью затрат в подсистеме от типа управления и от избираемого режима регулирования. Параметром  $h$  задается точность решения.



Результаты исследования эффективности функционирования производственной системы с помощью аналитических моделей позволяют определять конкретные способы реализации управляющих воздействий, режимы функционирования подсистем и обслуживающей системы; установленная средняя продолжительность  $\bar{T}$  времени производства распределена между подсистемами оптимально: значения  $(\bar{\tau}_j + \bar{\theta}_j)$  соответствуют минимуму совокупных затрат.

Экспериментально показано, что надежность и время восстановления технологического оборудования (при фиксированном значении коэффициента загрузки) определяюще влияет на пропускные способности подсистем. Особенно велико влияние на величину пролеживания  $\bar{\theta}$ .

Анализ влияния значений коэффициентов загрузки и степени действия случайных возмущений на выходные параметры производственной системы подтверждает предположение о высокой эффективности методов оперативного управления в подсистемах основного и обслуживающего производства. Требование соблюдения программных значений важнейших нормативов движения производства обуславливает необходимость регулирования в процессе функционирования производственной системы. При высокой «степени стохастичности» процессов в подсистеме и значении коэффициента загрузки на уровне 85–90% производственная система без регулирования не выполняет своих функций: время производства номенклатурных позиций в системе существенно растет. Экспериментальные расчеты параметров работы производственной системы малой размерности на основе приближенных аналитических моделей и методов их решения подтверждают возможность их использования при анализе проблемы надежности функционирования производственных систем.

### Литература

1. Львов Ю.А., Сатановский Р.Л. Интенсификация машиностроительного производства. Л.: Машиностроение, 1984. 182 с.
2. Первозванский А.А. Математические модели в управлении производством. М.: Наука, 1975. 616 с.
3. Райншке К. Модели надежности и чувствительности систем. М.: Мир, 1979. 452 с.

### Bibliography

1. Lvov Ju.A., Satanovskij R.L. Intensifikacija mashinostroitel'nogo proizvodstva. L.: Mashinostroenie, 1984. 182 p.
2. Pervozvanskij A.A. Matematicheskie modeli v upravlenii proizvodstvom. M.: Nauka, 1975. 616 p.
3. Rajnshke K. Modeli nadjozhnosti i chuvstvitel'nosti system. M.: Mir, 1979. 452 p.