УДК 004.942 DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.016

Математическое моделирование и оптимизация сложноструктурированных объектов

Д.П. Лащенов
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Российская Федерация

Резюме**:** Данная работа посвящена формализованному описанию математических моделей и оптимизационных задач сложноструктурированных объектов. В качестве объекта моделирования рассматриваются производственные системы со сложной структурой, включающей взаимодействие подсистем двух основных типов: «обработка» и «сборка». Представлен анализ специфики функционирования сложноструктурированных производственных систем. Предложен способ формализованного описания математических моделей технологических процессов обработки и сборки на основе теории массового обслуживания с применением аппарата имитационного моделирования. Принципиальным отличием математического описания подсистемы типа «сборка» от подсистемы типа «обработка» заключается в том, что для выполнения процесса сборки требуется поступление на вход устройства заданного количества заявок с разных потоков, что означает наличие всех необходимых комплектующих. Эта особенность ограничивает применение стандартных методов теории массового обслуживания, поскольку функциональные зависимости для аналитического описания процессов типа «сборка» отсутствуют. По этой причине возникает необходимость разработки имитационных моделей сложноструктурированных объектов. При этом в математической модели производственной системы учтены случайный характер распределения параметров объектов и вероятность возникновения отказов в обслуживании заявок вследствие переполнения очереди на ожидание. Рассмотрена оптимизационная задача поиска оптимальной структуры системы при ограничениях на заданное количество полученных деталей в течение определенного периода времени, а также на максимальную емкость входного накопителя и объем производственных ресурсов.

Ключевые слова**:** имитационное моделирование, сложноструктурированный объект, производственная система, оптимизация, теория массового обслуживания.

Для цитирования**:** Лащенов Д.П. Математическое моделирование и оптимизация сложноструктурированных объектов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2020;8(4). Доступно по: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=863 DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.016

Mathematical modeling and optimization of complexly structured objects

D.P.Lashchenov
FSBE of HE "Voronezh State Technical University", Voronezh, Russian Federation

Abstract: This work is devoted to the formalized description of mathematical models and optimization problems of complex-structured objects. As an object of modeling, we consider production systems with a complex structure, including the interaction of subsystems of two main types: "processing" and "assembly". An analysis of the specifics of the functioning of complex-structured production systems is presented. A method is proposed for the formalized description of mathematical models of technological processes of processing and assembly based on the theory of queuing using the apparatus of simulation. The fundamental difference between the mathematical description of a subsystem of the "assembly" type and a subsystem of the "processing" type is that to complete the assembly process, a given number of applications from different streams must be received at the input of the device, which means that all the necessary components are available. This feature limits the use of standard methods of queuing theory, since there are no functional dependencies for the analytical description of processes of the "assembly" type. For this reason, it becomes necessary to develop simulation models of complexly structured objects. At the same time, the mathematical model of the production system takes into account the random nature of the distribution of the parameters of objects and the probability of refusals in servicing applications due to overflow of the waiting queue. The optimization problem of finding the optimal structure of the system is considered under restrictions on a given number of parts obtained within a certain period of time, as well as on the maximum capacity of the input storage and the volume of production resources.

Keywords: simulation, complexly structured object, manufacturing system, optimization, queuing theory.

For citation: Lashchenov D.P. Mathematical modeling of complexly structured objects. *Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(4). Available from: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=863 DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.016 (In Russ).

Введение

Анализ функционирования и оптимизация сложноструктурированных объектов требует использования средств формализованного описания протекающих в них процессов для последующего построения математической модели. Одним из наиболее характерных объектов, относящихся к классу сложноструктурированных, являются производственные системы. Для математического описания функционирования производственных систем целесообразно использовать аппарат теории массового обслуживания. Однако стоит отметить, что специфика сложноструктурированных производственных систем, определяемая большим количеством материальных потоков, синхронизированных между собой по времени и имеющих зачастую нестационарный и случайный характер, в полной мере не может быть учтена в функциональных зависимостях классической теории массового обслуживания. В связи с этим, необходима разработка формализованного описания имитационных моделей производственных систем, максимально точно отражающего структуру и логику функционирования реальных объектов, и проведение вычислительных экспериментов на модели для определения характеристик систем, взаимосвязей между ними и оптимизации по заданным критериям.

Однако стоит отметить вычислительную сложность имитационных моделей с точки зрения необходимых для их реализации машинных ресурсов, что ограничивает возможность эффективного их использования. Это требует разработки новых подходов к структурной организации имитационных моделей, обеспечивающих значительное сокращение в условиях их практического использования временных ресурсов и ресурсов памяти.

В работе представлен способ структурной организации имитационной модели производственной системы по модульному принципу, при котором основные процессы материального преобразования разделяются на два типа: процессы обработки и процессы сборки [1]. Для его реализации необходимо представить математическое описание процессов обработки и сборки сначала в автономном режиме, а затем описать их взаимодействие в системе.

Анализ функционирования сложноструктурированных производственных систем

Рассматривается работа производственных систем, отличительной особенностью которых является наличие цепочек операций, часть из которых являются операциями сборки. Это означает, что систему можно представить в виде совокупности подсистем, часть из которых работает по следующему принципу. На их вход подаются заявки (детали/комплектующие) с разных маршрутов обслуживания (заданное количество с каждого направления/маршрута), а в результате обслуживания получается одна выходная единица потока (деталь), которая продолжает дальнейшее движение по производственной цепочке. Схематично процесс функционирования сложноструктурированной производственной системы можно представить следующим образом (рисунок 1).

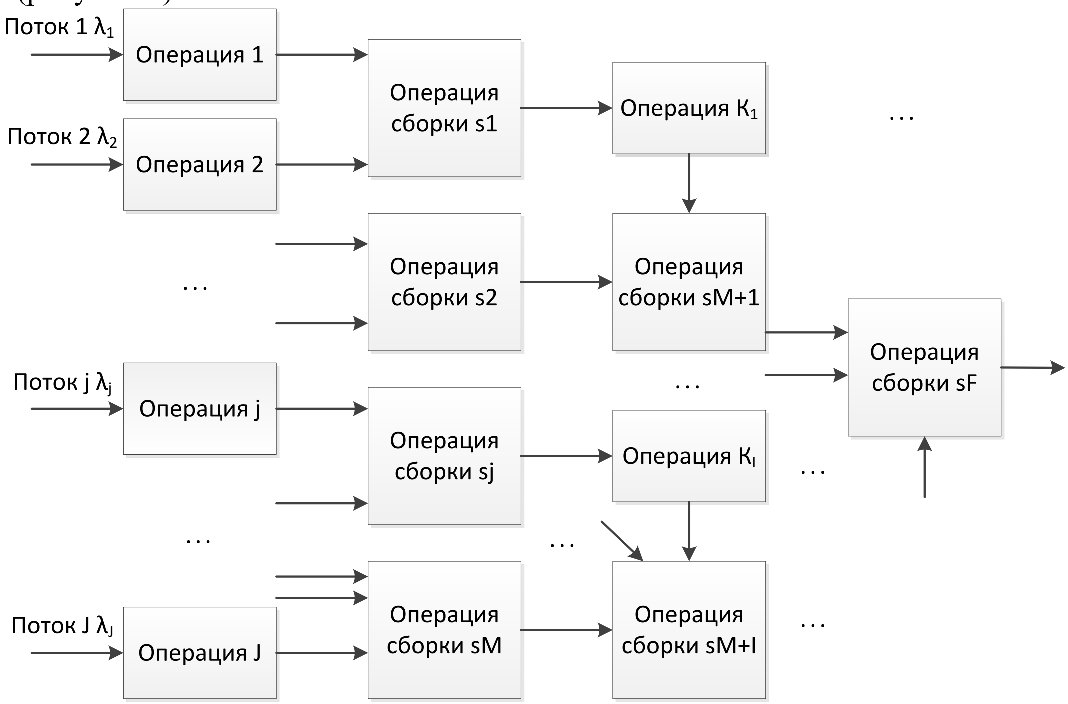

Рисунок 1 – Схема процесса функционирования сложноструктурированных производственных систем

Picture 1 – Diagram of the functioning process of complex-structured production systems

На вход системы поступают заявки (детали/комплектующие), необходимые для осуществления сборочно-монтажных работ. Пусть, без ограничения общности, есть J входных потоков с интенсивностями $\lambda_1,\ldots,\lambda_J$. Будем считать, что интенсивности входящих потоков известны. Все операции делятся на два типа:- «обработка» и «сборка».

Время выполнения каждой из операций является случайной величиной. Известна интенсивность μ_i выполнения каждой операции O_i. Выполнение каждой из операций осуществляется с помощью ресурсов. Имеется K разных типов ресурсов. Предполагается возможность ожидания перед каждой операцией. С технической точки зрения это означает помещение деталей или комплектующих в накопитель до тех пор, пока устройство, выполняющее данную операцию, не освободится. Очевидно, что накопитель имеет ограниченную емкость, позволяющую поместить лишь определенное количество деталей. С математической точки зрения это означает, что исследуются системы с очередью ограниченной длины.

Специфика функционирования таких систем с математической точки зрения заключается в следующем. Если отдельную подсистему типа: «заявка» - «обслуживание» - «заявка» можно проанализировать с помощью аппарата теории массового обслуживания, то для систем типа: «множество потоков разнородных заявок» - «объединение» - «заявка» этот аппарат работать не будет [2].

Формализованное описание технологических процессов обработки

Без ограничения общности, будем рассматривать отдельную подсистему, назначение которой заключается в выполнении процесса обработки. Его можно представить следующим образом (рисунок 2).

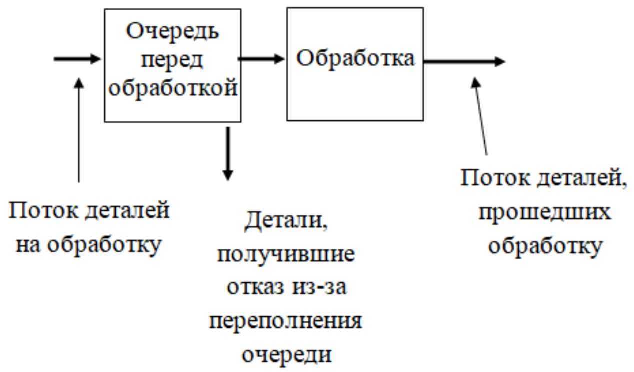

Рисунок 2 – Схема процесса обработки
Picture 2 – Processing diagram

Основной задачей формализации процесса обработки является нахождение значений параметров состояния детали α_{IIk} после завершения процесса обработки при $t \geq t^к$ (1).

$$\alpha_{IIk} = \alpha^0_{IIk}(\alpha_{I1}, \alpha_{I2}, ..., \alpha_{In}, \beta_1, \beta_2, ..., \beta_m) + \delta\alpha_{IIk}, \quad (1)$$

где $k = 1, 2, \ldots, n$;

α_{Ik} – исходные параметры состояния детали до начала процесса обработки;

β_i – параметры, характеризующие функционирование технологического оборудования;

$\delta\alpha_{IIk}$ – случайные отклонения величины α_{IIk} от некоторого детерминированного значения α^0_{IIk}, характеризуемые соответствующими законами распределения или функциями на основе корреляционной теории (с точностью до моментов второго порядка).

Момент завершения процесса обработки определяется по формуле (2).

$$t^к = t^н + \tau^{оп}, \quad (2)$$

где $t^н$ – момент начала выполнения процесса обработки детали, $\tau^{оп}$ – длительность процесса обработки.

Параметр $t^н$ в общем виде выражается следующим образом:

$$t^н = t^п + \tau^г + t^{ож}, \quad (3)$$

где $t_j^{п}$- момент поступления j-й детали к устройству обработки; $\tau^{г}$– длительность подготовки устройства к выполнению процесса обработки; $t^{ож}$ - время ожидания обслуживания. Ожидание возникает из-за занятости оборудования в момент поступления заявки.

Обозначим через x(t) входящий поток заявок:

$$x(t) = \{t_1^{п}, t_2^{п}, t_3^{п}, \dots\} \qquad (4)$$

Здесь $t_1^{п}, t_2^{п}, t_3^{п}$ - моменты поступления в систему первой, второй, третьей и т.д. деталей. Этот поток в общем случае является нестационарным и зависит от времени t. Обозначим интенсивность данного потока через $\lambda_i(t)$.

При условии отсутствия дополнительных простоев оборудования момент начала процесса обработки определяется следующим образом:

$$t^{н} = \begin{cases} t^{п}, \text{ если подготовка к операции не требуется} \\ t^{п} + \tau^{г}, \text{если необходима подготовка к операции} \end{cases} \qquad (5)$$

В случае необходимости дополнительные простои технологического оборудования, обусловленные особенностями режима работы, могут быть включены в состав времени подготовки $\tau^{Г}$.

В случае если входящий поток (4) является простейшим, то время ожидания в очереди определяется по следующей формуле:

$$t^{ож} = \begin{cases} \frac{1}{\lambda(t)} \cdot \frac{\frac{\alpha^n}{n!}}{\sum_{i=0}^{n} \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} * \frac{\alpha}{n} * \frac{1-\left(\frac{\alpha}{n}\right)^m}{1-\frac{\alpha}{n}}} * \sum_{r=1}^{m} r * \left(\frac{\alpha}{n}\right)^r, \frac{\alpha}{n} \neq 1 \\ \frac{1}{\lambda(t)} \cdot \frac{\frac{\alpha^n}{n!}}{\sum_{i=0}^{n} \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} * \frac{\alpha}{n} * m} * \sum_{r=1}^{m} r * \left(\frac{\alpha}{n}\right)^r, \frac{\alpha}{n} = 1 \end{cases} \qquad (6)$$

Здесь n – число возможных деталей, которые может одновременно обрабатывать устройство; $\lambda(t)$ - интенсивность потока (4).

Очередь перед данной операцией возникает лишь в том случае, если в момент поступления заявки устройство занято. Исходя из рисунка 2 очевидно, что данная система может быть исследована с помощью аппарата теории массового обслуживания [3]. В частности, для стационарного входного потока заявок используются следующие формулы, описывающие вероятность отказа:

$$P_{отк} = \begin{cases} \frac{\frac{\alpha^n}{n!} * \left(\frac{\alpha}{n}\right)^m}{\sum_{i=0}^{n} \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} * \frac{\alpha}{n} * \frac{1-\left(\frac{\alpha}{n}\right)^m}{1-\frac{\alpha}{n}}}, \frac{\alpha}{n} \neq 1 \\ \frac{\frac{\alpha^n}{n!} * \left(\frac{\alpha}{n}\right)^m}{\sum_{i=0}^{n} \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} * \frac{\alpha}{n} * m}, \frac{\alpha}{n} = 1 \end{cases}, \qquad (7)$$

где $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$ – отношение интенсивности входящего потока к интенсивности обслуживания; n – число каналов обслуживания; m- число мест в очереди. Использована функциональная зависимость, описывающая среднюю длину очереди:

$$\bar{r} = \begin{cases} \frac{\frac{\alpha^n}{n!}}{\sum_{i=0}^{n} \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} * \frac{\alpha}{n} * \frac{1-\left(\frac{\alpha}{n}\right)^m}{1-\frac{\alpha}{n}}} * \sum_{r=1}^{m} r * \left(\frac{\alpha}{n}\right)^r, \frac{\alpha}{n} \neq 1 \\ \frac{\frac{\alpha^n}{n!}}{\sum_{i=0}^{n} \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} * \frac{\alpha}{n} * m} * \sum_{r=1}^{m} r * \left(\frac{\alpha}{n}\right)^r, \frac{\alpha}{n} = 1. \end{cases} \qquad (8)$$

Выходной поток y(t) деталей, прошедших обработку, будет определяться значениями $t_1^{н} + \tau_1^{оп}, t_2^{н} + \tau_2^{оп}, \ldots$

Таким образом, процесс обработки математически может быть описан следующим образом:

$$y(t) = F\big(x(t), R, \mu, Sh(t)\big). \tag{9}$$

Здесь y(t) – выходной поток заявок, x(t) – входной поток заявок, R – ресурсы, необходимые для выполнения операции, Sh(t) – расписание, от которого зависит занятость ресурсов и, как следствие, время начала обслуживания, μ - интенсивность обслуживания.

Формализованное описание технологических процессов сборки

Принципиальным отличием процесса сборки от представленного ранее процесса обработки является необходимость поступления всех комплектующих. Это означает, что очередь перед операцией сборки может возникнуть не только в случае занятости оборудования, но и в случае отсутствия остальных комплектующих. Причем, если на сборку должно поступить m комплектующих с m различных потоков, то в случае если моменты поступления являются случайными величинами, (m-1)-ая комплектующая однозначно будет ждать последней детали для сборки. Схематично данный процесс можно представить следующим образом (рисунок 3).

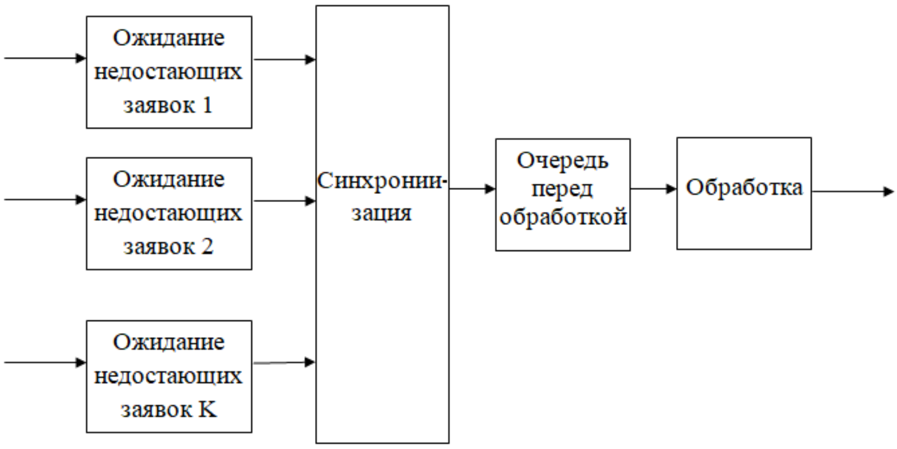

Рисунок 3 – Схема процесса сборки
Picture 3 – Assembly process diagram

Моменты поступления на операцию сборки O_i данного узла всех комплектующих обозначены через $t_1^{п}, t_2^{п}, \ldots, t_m^{п}$. Тогда момент начала сборки определяется следующим образом:

$$t^{н} = \max(t_1^{п}, t_2^{п}, \ldots, t_m^{п}) + \tau^{г} + t^{ож}. \tag{10}$$

В случае если подготовка оборудования на сборку не требуется, $\tau^{г} = 0$.

В отличие от формулы (6), для процессов сборки невозможно описать с помощью формул величину $t^{ож}$, поскольку данный вид систем не исследовался с помощью теории массового обслуживания [4]. В связи с этим, отсутствуют аналитические механизмы определения $t^{н}$. Кроме того, неизвестно функциональное выражение для определения вероятности отказа и, в связи с этим, неясен характер выходного потока y(t) заявок, прошедших сборку. В данном случае необходимо проведение экспериментальных исследований данных характеристик с применением аппарата имитационного моделирования и специализированного программного обеспечения [5].

В общем случае операцию сборки математически можно описать следующим образом:

$$y(t) = F\big(x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t), R, \mu, Sh(t)\big). \quad (11)$$

Здесь y(t) – выходной поток заявок, $x_1(t),\dots, x_M(t)$ – входные потоки заявок, R – ресурсы, необходимые для выполнения операции, Sh(t) – расписание, от которого зависит занятость ресурсов и, как следствие, время начала обслуживания, μ - интенсивность обслуживания.

Стоит отметить, что для корректного функционирования модели требуется, чтобы интенсивности всех потоков в среднем совпадали. В противном случае заявки потока с большей интенсивностью будут поступать в большем количестве. А поскольку для сборки необходимо совпадение деталей одного и другого типа, то данные избыточные детали просто будут лишними, что повлечет материальные потери.

Пусть в общем случае на операцию сборки поступает K потоков заявок с интенсивностями $\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_K(t)$ (потоки в общем случае нестационарны). Тогда для того, чтобы в произвольном интервале [T, T+ΔT] среднее количество деталей с разных потоков совпадало, необходимо выполнение следующего условия:

$$\int_T^{T+\Delta T} t * \lambda_1(t)dt = \cdots = \int_T^{T+\Delta T} t * \lambda_K(t)dt \quad (12)$$

В случае если для сборки необходимо n_1 деталей первого типа, n_2 – второго и т.д., то формула (3.4) преобразуется к следующему виду:

$$n_1 \int_T^{T+\Delta T} t * \lambda_1(t)dt = \cdots = n_K \int_T^{T+\Delta T} t * \lambda_K(t)dt. \quad (13)$$

Формулы (1)-(13) – составляют математическую модель сложноструктурированной производственной системы, отличительными особенностями которой является объединение процессов типа «обработка» и «сборка».

Математическая модель и оптимизационная задача определения структуры системы

На основании разработанной математической модели сформулируем соответствующую оптимизационную задачу. Пусть на вход системы поступают заявки (детали, комплектующие), необходимые для изготовления изделия. Допустим, что, без ограничения общности, есть J входных потоков с интенсивностями $\lambda_1,\dots,\lambda_J$. Пусть, без ограничения общности, производственная система задана множеством технологических цепочек, каждая из которых представляет собой последовательность операций обработки и сборки. Для выполнения любой операции O_i требуется некоторое количество ресурсов. Пусть имеется K типов ресурсов: 1, 2,…,K. Количество ресурсов каждого типа: $R_1, R_2,\dots, R_k$ – неизвестные величины.

Известными в данной задаче являются:

- интенсивность μ_i выполнения каждой операции O_i (в общем случае длительности $\tau_i^{оп}$ выполнения операций являются случайными величинами, однако их закон распределения с точностью до параметров известен);

- ограничения на длину каждой из очередей Q_i – L_i (емкость накопителя i-й фазы);

- план P, показывающий объем выпускаемых изделий в заданном временном диапазоне T_p.

Необходимо определить параметры системы, чтобы обеспечить изготовление объема деталей, согласно плану P.

Порядок операций в системе неизвестен, но последней выполняется операция финальной сборки (после нее изделие попадает на контроль). Тогда время изготовления детали t_F определяется по формуле:

$$t_F = t_F^{н} + \tau_F^{оп}. \quad (14)$$

Здесь $t_F^{н}$ - начало финальной операции сборки, которое определяется по формуле (10); $\tau_F^{оп}$- длительность финальной операции сборки.

Тогда за время T_p может быть выпущено количество изделий, которое определяется по формуле:

$$y_F = \begin{cases} \frac{T_p}{t_F}, \text{если } \frac{T_p}{t_F} - \text{ целое значение;} \\ \left[\frac{T_p}{t_F}\right] - 1, \text{в противном случае} \end{cases} \quad (15)$$

Здесь скобками […] обозначена целая часть аргумента.

В этом случае, ограничение на объем выпускаемых деталей будет иметь вид:

$$y_F \geq P, \quad (16)$$

Ограничения на невозможность превышения максимально возможной длины очереди будут иметь вид:

$$\begin{cases} \mathrm{len}(Q_1(t), K_1) \leq L_1 \\ \mathrm{len}(Q_2(t), K_2) \leq L_2 \\ \quad\quad\ldots \\ \mathrm{len}(Q_F(t), K_F) \leq L_F \end{cases} \quad (17)$$

Здесь $\mathrm{len}(Q_i(t),K_i)$ – текущая длина очереди Q_i при условии, что операция выполняется количеством устройств K_i (т.е. фактически, K_i – это число поддерживающих операцию O_i обслуживающих устройств).

Очевидно, что объемы используемых ресурсов должны быть не меньше, чем заданное значение. Введена в рассмотрение матрица Vol размера F×K, где k – количество типов ресурсов, F – число операций. Тогда для выполнения операции 1 необходимо vol_{11} ресурсов типа 1, vol_{12} ресурсов типа 2, …, vol_{1K} ресурсов типа K. Аналогичным образом определяются объемы для остальных операций. Таким образом, vol_{ij} – это объем ресурсов типа j, требующийся для выполнения операции i. Ресурсные ограничения в данном случае будут выражаться системой уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{F} vol_{i1} \leq R_1 \\ \sum_{i=1}^{F} vol_{i2} \leq R_2 \\ \quad\quad\ldots \\ \sum_{i=1}^{F} vol_{iK} \leq R_K \end{cases} \quad (18)$$

Целью является такое определение оптимальной структуры системы, при которой количество ресурсов каждого типа стремится к минимуму. В качестве целевых функций используются различные функциональные выражения. Одним из вариантов является минимизация каждого вида ресурсов при выполнении множества ограничений (16-18).

$$\begin{cases} R_1 \to \min \\ R_2 \to \min \\ \quad\ldots \\ R_F \to \min \end{cases} \quad (19)$$

Другим вариантом целевой функции является максимизация прибыли, получаемой за выпуск заданного числа изделий. Пусть в течение периода величиной T затраты на использование одного вида ресурсов типа i равны z_i, а прибыль, получаемая от выпуска одного изделия равна S. Тогда целевая функция выражается следующим образом:

$$S \cdot y_F(T) - \sum_{j=1}^{K} z_i \cdot R_i \to \max \quad (20)$$

Таким образом, разработана математическая модель сложноструктурированной производственной системы, отличающаяся учетом специфики типовых технологических процессов обработки и сборки, ресурсных и плановых ограничений и осуществляющая решение оптимизационной задачи определения состава технологического оборудования, обеспечивающего выполнение планово-экономических требований в условиях конкретного производства.

Заключение

1. Процессы, протекающие в сложноструктурированных производственных системах, с точки зрения их формализованного описания можно разделить на два основных типа: «обработка» и «сборка». Анализ специфики процессов обработки позволил формализовать процесс их функционирования с помощью аппарата систем массового обслуживания. При этом учтено влияние возмущающих воздействий, нелинейный и стохастический характер изменения параметров состояния.
2. Принципиальным отличием процессов сборки является наличие нескольких входящих потоков, которые необходимо синхронизировать перед выполнением данной операции. Поскольку аналитический аппарат, необходимый для описания специфики данных систем, отсутствует, для исследования характеристик систем, включающих процессы сборки, требуется использование аппарата имитационного моделирования и проведение вычислительных экспериментов на построенной модели.
3. На основании формализации процессов обработки и сборки предложена математическая модель и соответствующие оптимизационные задачи, позволяющие усовершенствовать процесс функционирования сложноструктурированных производственных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лащенов Д.П., Бурковский В.Л. Имитационное моделирование гибкой производственной системы на базе автоматизированного сборочно-монтажного цеха. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019;15(3):51-56.
2. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания – М.: Книга по Требованию; 2013: 429.
3. Куприяшкин А.Г. Основы моделирования систем. Норильск: НИИ; 2015:135.
4. Valentin Edwin C., Verbraeck Alexander. Domain specific model constructs in commercial simulation environments. *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*.2007. WSC 2007, Washington, DC, USA, December 9-12, 2007:785-795. Available at: https://www.researchgate.net/publication/221529357_Domain_specific_model_constructs_in_commercial_simulation_environments
5. Лащенов Д.П., Бурковский В.Л. Программный комплекс имитационного моделирования сложноструктурированных реконфигурируемых объектов на основе моделей типовых производственных систем. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(3). DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.001.

REFERENCES

1. Lashchenov D.P., Burkovsky V.L. Simulation of a flexible manufacturing system based on the automated assembly shop. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019;15(3):51-56.
2. Kleinrock L. Queueing Systems. M.: Kniga po Trebovaniju; 2013:429.
3. Kupriyashkin A.G. Osnovy modelirovaniya sistem. Noril'sk: NII; 2015:135.

4. Valentin Edwin C., Verbraeck Alexander. Domain specific model constructs in commercial simulation environments. *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*.2007. WSC 2007, Washington, DC, USA, December 9-12, 2007:785-795. Available at: https://www.researchgate.net/publication/221529357_Domain_specific_model_constructs_in_commercial_simulation_environments
5. Lashchenov D.P., Burkovsky V.L. The software package for simulation of complex structured reconfigurable objects based on models of typical manufacturing systems. *Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(3). DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лащенов Дмитрий Павлович, аспирант кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах ФГБОУ ВО «Воронежского государственного технического университета», Воронеж, Российская Федерация
e-mail: nord_vrn@mail.ru

Dmitrii P. Lashchenov, P. G. of The Department of electric drive, automation and control in technical systems of FSBE of HE "Voronezh State Technical University", Voronezh, Russian Federation