

УДК 658.51.012

DOI 10.18413/2518-1092-2016-1-2-31-45

Пигнастый О.М.

**СЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ МНОГОРЕСУРСНОЙ ПОТОЧНОЙ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ**

профессор кафедры компьютерного мониторинга и логистики, доктор технических наук, доцент Национальный Технический Университет «ХПИ», ул. Пушкинская, д. 79-2, г. Харьков, 61102, Украина
e-mail: pom7@bk.ru

Аннотация

В статье рассмотрен механизм переноса технологических ресурсов на предмет труда в результате воздействия технологического оборудования. Проанализирована структура производственного цикла и технологических ресурсов. Основываясь на определениях составных частей технологического процесса показана структура эффективного времени обработки предмета труда. Рассмотрены составные части процесса переноса технологических ресурсов на предмет труда в результате воздействия технологического оборудования. Исследованы законы распределения случайных процессов переноса технологических ресурсов для простых технологических схем обработки предмета труда. Рассмотрен принцип формирования обобщенной единицы технологического оборудования и показан механизм построения производственных функций обобщенной единицы технологического оборудования для последовательной и параллельной схемы расположения оборудования. Рассмотрен принцип построения сетевой модели производственной линии для многономенклатурного производства.

Ключевые слова: технологический процесс; технологическая операция; предмет труда; средства труда; свойства и параметра изделия; тип производства; методы организации; PDE-модели поточных линий; система управления поточным производством; статистические модели производственных систем.

UDC 658.51.012

Pihnastyi O.M.

**THE NETWORK MODEL OF THE MULTIPLE RESOURCES FLOW
MANUFACTURING LINE**

Doctor of Engineering, Professor. Department of Computer Monitoring and Logistics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» 79-2 Pushkinskaya, Kharkov, 61102, Ukraine.
e-mail: pom7@bk.ru

Abstract

The article describes the transfer of the technological resources on the subject of labor as a result of the impact of technological equipment. The paper analyzes the structure of the production cycle and technological resources. It shows the structure of effective processing time of the subject of labor. The author considers the laws of distribution of random processes of transfer of technological resources for simple flow schemes of processing the subject of labor. The article describes the principle of formation of a generalized production unit and demonstrates the mechanism of building production functions of the generalized production unit for sequential and parallel arrangement of equipment. The article also demonstrates the principle of construction of a network model of the production line for multiproduct production.

Keywords: process; process operation; subject of labor; means of labor; properties and parameters of the product; type of production; methods of organization; PDE-model production lines; production management system; statistical models of manufacturing systems.

Введение

Одной из основных тенденций развития современного промышленного производства является то, что при постоянном сокращении продолжительности жизненного цикла изделий основная его часть приходится на переходной неустановившийся режим функционирования производственных линий. В связи с этим при проектировании систем управления производственными линиями для переходных режимов в последнее десятилетие особое внимание уделяется использованию совершенно новых типов моделей управляемых производственных процессов, а также программ и алгоритмов управления ими [1]. Подробный обзор моделей, используемых при проектировании систем управления производственными линиями, представлен в работе [2]. Анализ моделей переходных управляемых производственных процессов выполнен в [3]. Существенный интерес среди рассмотренных моделей представляет класс моделей производственных поточных линий, использующих уравнения в частных производных [1]. Данный класс моделей, получивших название PDE-моделей, позволяет проектировать системы управления производственными поточными линиями, функционирующими в квазистационарных и переходных режимах. Впервые замкнутые балансовые уравнения в частных производных, которые использованы в PDE-моделях поточных линий, получены с обоснованием условий их применения в рамках статистической теории производственных систем [4]. Анализ принципов и методов построения систем управления производственным процессом представлен в работе [5]. Настоящий материал посвящен обсуждению процесса переноса технологических ресурсов на предмет труда.

Производство представляет собой сложный процесс превращения сырья, материалов и полуфабрикатов в готовую продукцию. При воздействии технологического оборудования на предмет труда в процессе выполнения операции осуществляется перенос технологических ресурсов. На каждой операции неизбежно проявляются колебания, как времени выполнения [6], так и количества перенесенных за это время на предмет труда ресурсов, что обусловлено комплексом действующих на производстве случайных и систематических факторов. Эти факторы приводят к отклонениям параметров предмета труда от номинальных значений [7].

Ограничения возможностей метода изготовления изделия, замена при технологических расчетах точных формул приближенными, неточность изготовления оснастки, деформация и износ оборудования, температурные воздействия на деталь или рабочий инструмент в зоне обработки вызывают систематические погрешности. Случайные технологические погрешности определяются неоднородностью сырья, отклонениями параметров комплектующих изделий, колебаниями параметров режима обработки. В ходе технологической обработки на предмет труда одновременно воздействуют разные производственные факторы, определяющие закон распределения значений его параметров в виде композиции нескольких законов распределения [8].

Структура производственного цикла и технологических ресурсов [9-11]

Технологический процесс определяется как процесс перехода предметов труда из одного состояния в другое в результате воздействия технологического оборудования [12-14]. Процесс переноса ресурсов на предмет труда является случайным процессом [7, 8]. Сечение случайного процесса переноса технологических ресурсов на предметы труда в каждый момент времени определяется состоянием параметров N предметов труда [13, 15]. В результате выполнения m -ой ($m=1,.., M$) операции на предметы труда переносятся ресурсы стоимостью $\Delta S_{m, \psi}$ [15, 16], структура которой представлена на рис. 1:

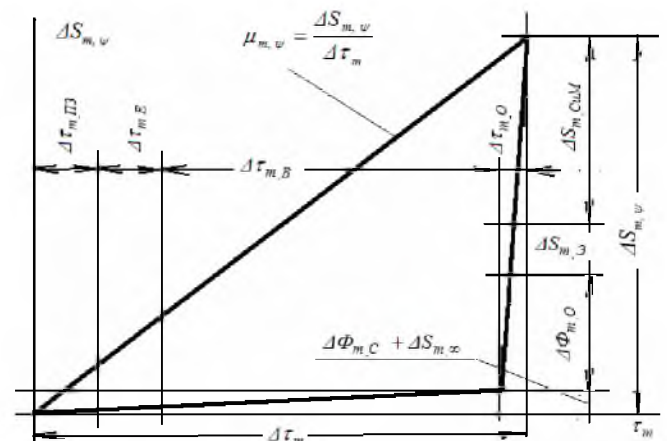


Рис. 1. Процесс переноса стоимости ресурсов на предмет труда

Fig. 1. The process of transferring the cost of resources on the subject of labor

$$\Delta S_{m, \psi} = \Delta S_{m, \text{CuM}} + \Delta S_{m, \text{Э}} + \Delta \Phi_{m, O} + \Delta \Phi_{m, C} + \Delta S_{m, \infty}, \quad (m = 1..M), \quad (1)$$

где $\Delta S_{m, \text{CuM}}$ (грн.) – стоимость затрат на основной и вспомогательный материалы, полуфабрикаты и комплектующие;

$\Delta S_{m, \text{Э}}$ (грн.) – стоимость затрат энергоресурсов;

$\Delta \Phi_{m, O}$ (грн.) – стоимость затрат фонда оплаты труда основных рабочих;

$\Delta \Phi_{m, C}$ (грн.) – стоимость затрат фонда оплаты труда неосновных и вспомогательных рабочих,

связанных с обслуживанием технологического процесса на m -ой операции [15, 16];

$\Delta S_{m, \infty}$ (грн.) – стоимость прочих затрат, связанных с выполнением m -ой операции.

Стоимость технологических ресурсов $\Delta S_{m, \psi}$ (1) переносится на предмет труда за эффективное время обработки (EPT, Effective Processing Times) $\Delta \tau_m$ [15-20], структура которого может быть представлена как (рис. 2)

$$\Delta \tau_m = \Delta \tau_{m, O} + \Delta \tau_{m, B} + \Delta \tau_{m, \text{ПЗ}} + \Delta \tau_{m, E}, \quad (m = 1..M), \quad (2)$$

где $\Delta \tau_{m, O}$ (час) – норма основного времени, необходимого для достижения цели операции по качественному и количественному изменению состояния предмета труда;

$\Delta \tau_{m, B}$ (час) – норма вспомогательного времени, требуемого для осуществления действий, создающих возможность выполнения;

$\Delta \tau_{m, E}$ (час) – норма времени на выполнение естественных процессов;

$\Delta \tau_{m, \text{ПЗ}}$ (час) – норма операции подготовительно-заключительного времени (подготовка средств производства к выполнению операции и приведение их в первоначальное состояние после ее окончания).

Базовые составляющие стоимости перенесенных ресурсов (1) и эффективного времени обработки (2) являются условными и определяются особенностями конкретного технологического процесса. Интенсивность переноса оборудованием ресурсов $\Delta S_{m, \psi} = \Delta S_{m, \psi}(t)$ за эффективное время обработки $\Delta \tau_m = \Delta \tau_m(t)$ на j -й предмет труда, находящийся в межоперационном заделе на m -ой операции, является случайным процессом $\mu_{m, \psi}(t)$ [21, 22], значение которого в момент времени $t = t_0$ определяется случайной величиной $\mu_{m, \psi} = \mu_{m, \psi}(t_0)$:

$$\mu_{m, \psi} = \frac{\Delta S_{m, \psi}}{\Delta \tau_m} = \frac{\Delta S_{m, \text{CuM}} + \Delta S_{m, \text{Э}} + \Delta \Phi_{m, O} + \Delta \Phi_{m, C} + \Delta S_{m, \infty}}{\Delta \tau_{m, O} + \Delta \tau_{m, B} + \Delta \tau_{m, \text{ПЗ}} + \Delta \tau_{m, E}}. \quad (3)$$

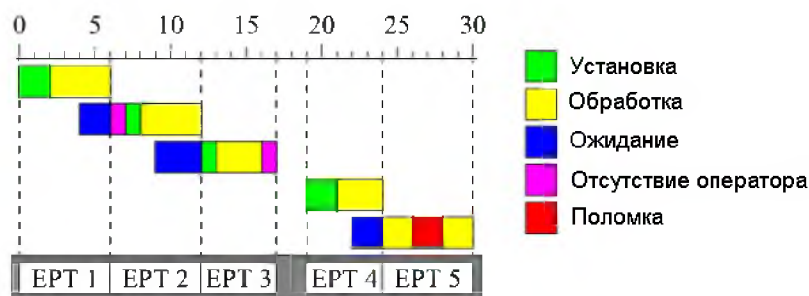


Рис. 2. Эффективное время обработки (EPT) [18-20]

Fig. 2. Effective Processing Time (EPT) [18-20]

Предполагаем, что за время выполнения технологической операции $\Delta \tau_m$ ресурсы от оборудования полностью переносятся на N_m предметов труда, расположенных в межоперационном заделе m -ой операции. Стоимость ресурсов $\Delta S_{m, \text{CuM}}(t)$, $\Delta S_{m, \text{Э}}(t)$,

$\Delta \Phi_{m, O}(t)$, $\Delta \Phi_{m, C}(t)$, $\Delta S_{m, \infty}(t)$ (1) и составляющие величины $\Delta \tau_{m, O}(t)$, $\Delta \tau_{m, B}(t)$, $\Delta \tau_{m, E}(t)$, $\Delta \tau_{m, \text{ПЗ}}(t)$ эффективного времени обработки (EPT) являются случайными процессами с непрерывным временем и непрерывными состояниями [22]. Значения случайных процессов в фиксированный момент времени определяются случайными

величинами стоимости перенесенных ресурсов (1) и составляющих эффективного времени обработки (2) [23]. Сечение случайного процесса интенсивности переноса ресурсов на предмет труда при фиксированном значении аргумента t представляет случайную величину $\mu_{m,\psi}$ с плотностью распределения $\psi_m(t, \mu_{m,\psi})$:

$$\int_0^{\infty} \psi_m(t, \mu_{m,\psi}) d\mu_{m,\psi} = 1, \quad m = 1, \dots, M, \quad (4)$$

которая может быть записана через плотности распределения $\psi_{\Delta S_{m,\psi}}(\Delta S_{m,\psi})$, $\psi_{\Delta \tau_m}(\Delta \tau_m)$ случайных величин $\Delta S_{m,\psi}$ и $\Delta \tau_m$ [21]:

$$\psi_m(t, \mu_{m,\psi}) = \int_0^{\infty} \Delta \tau_m \cdot \psi_{\Delta S_{m,\psi}}(\Delta \tau_m \cdot \mu_{m,\psi}) \cdot \psi_{\Delta \tau_m}(\Delta \tau_m) d(\Delta \tau_m) \quad (5)$$

Если $\Delta S_{m,\psi}$ или $\Delta \tau_m$ является детерминированной величиной, то случайная величина $\mu_{m,\psi}$ выражается через функциональную зависимость $\mu_{m,\psi} = \varphi_S(\Delta S_{m,\psi})$ и $\mu_{m,\psi} = \varphi_\tau(\Delta \tau_m)$ ($\Delta \tau_m$ или $\Delta S_{m,\psi}$ детерминирована) с плотностью распределения:

$$\psi_m(t, \mu_{m,\psi}) = \psi_{\Delta S_{m,\psi}}(\Delta \tau_m \cdot \mu_{m,\psi}) \cdot \Delta \tau_m, \quad \mu_{m,\psi} = \varphi_S(\Delta S_{m,\psi}), \quad (6)$$

$$\psi_m(t, \mu_{m,\psi}) = \psi_{\Delta \tau_m}\left(\frac{\Delta S_{m,\psi}}{\mu_{m,\psi}}\right) \cdot \frac{\Delta S_{m,\psi}}{\mu_{m,\psi}^2}, \quad \mu_{m,\psi} = \varphi_\tau(\Delta \tau_m). \quad (7)$$

Законы распределения случайных процессов $\Delta S_{m,CuM}(t)$, $\Delta S_{m,\psi}(t)$, $\Delta \Phi_{m,O}(t)$, $\Delta \Phi_{m,C}(t)$, $\Delta S_{m,\infty}(t)$ и $\Delta \tau_{m,O}(t)$, $\Delta \tau_{m,B}(t)$, $\Delta \tau_{m,E}(t)$, $\Delta \tau_{m,ПЗ}(t)$ зависят от факторов технологии производства, связаны с формами организации производства, методами обработки предметов труда и контроля их качества, механизмами переноса ресурсов на предмет труда в результате воздействия оборудования [20, 24, 25]. Равномерный закон распределения возникает в ходе обработки предмета труда средствами труда, оснащенными контрольными приборами с грубыми делениями [21]. К операциям, в ходе выполнения которых составляющие случайных процессов (1) и (2) могут иметь равномерный закон распределения, относятся токарная обработка заготовки, порезка заготовки в размер по технологической линейке. Нормальный закон распределения возникает при выполнении операции, на результат которой оказывают влияния много независимых или слабо зависимых случайных факторов. Показательное распределение тесно связано с простейшим

(стационарным пуассоновским) потоком событий. Случайные процессы переноса стоимости ресурсов $\Delta S_{m,\psi}(t)$, $\Delta \Phi_{m,C}(t)$, $\Delta S_{m,\infty}(t)$ часто представляют линейной зависимостью от эффективного времени обработки $\Delta \tau_m(t)$ [19]:

$$\Delta S_{m,\psi}(t) = k_{m,\psi} \cdot \Delta \tau_m(t), \quad \Delta \Phi_{m,C}(t) = k_{m,\Phi C} \cdot \Delta \tau_m(t), \quad \Delta S_{m,\infty}(t) = k_{m,\infty} \cdot \Delta \tau_m(t) \quad (8)$$

где $k_{m,\psi}$, $k_{m,\Phi C}$, $k_{m,\infty}$ – интенсивность использования соответствующего ресурса, необходимого для обслуживания технологического процесса на m -ой операции. В большинстве практических случаев $k_{m,\psi}$, $k_{m,\Phi C}$, $k_{m,\infty}$ неслучайные величины, определяются на производственном предприятии порядком разнесения затрат по видам изделий. Случайный процесс $\Delta \Phi_{m,O}(t)$ для сдельной $\Delta \Phi_{m,O}(t) = r_{m,\Phi O}(t)$ и почасовой $\Delta \Phi_{m,O}(t) = k_{m,\Phi O} \cdot \Delta \tau_{m,O}(t)$ форм оплаты труда выражается через нормированную расценку $r_{m,\Phi O}$ за выполнение операции и нормированную стоимость единицы рабочего времени $k_{m,\Phi O}$, затраченного на выполнение m -ой операции. Сборочные и упаковочные операции характеризуются переносом на предмет труда детерминированной стоимости ресурсов $\Delta S_{m,CuM}$. В результате выполнения операции предмет труда дополняется комплектующими, изделиями и сборочными единицами заданной стоимости. В производственной практике встречается преобладание стоимости одних технологических ресурсов, перенесенных на предмет труда в ходе выполнения операции, над другими. Для выполнения сборочной операции характерно $\Delta S_{m,\psi} \cong \Delta S_{m,CuM} = const$. Для операции тестирования, настройки и контроля параметров изделия основными затратами являются затраты фонда оплаты труда $\Delta S_{m,\psi} \cong r_{m,\Phi O} = const$ (для сдельной оплаты), $\Delta S_{m,\psi} \cong k_{m,\Phi O} \cdot \Delta \tau_m$ (для почасовой оплаты). Энергоемкие операции (термообработка, закалка, хромирование, никелирование, литье, прессование пластических масс [21]) характеризуются преобладанием составляющей $\Delta S_{m,\psi} \cong \Delta S_{m,\psi} \cong \Delta S_{m,\psi}$.

Если в заделе перед m -ой технологической операцией поточной линии находится N_m продуктов труда, один из которых обрабатывается на оборудовании, то

$\Delta\tau_{m,Prj} = \sum_{k=2}^{N_{\psi,m}} \Delta\tau_{m,j-k+1}$ соответствует времени ожидания обработки (времени пролеживания) предмета труда в межоперационном заделе [19], $\Delta\tau_{m,j} = \Delta\tau_m(t_j)$ – эффективное время обработки j -ого предмета труда, поступившего на обработку в момент времени t_j . Для партии последовательно обрабатываемых предметов труда (правило FIFO) общее время обработки j -ого предмета труда $\Delta\tau_{m,\Sigma_j}$ с момента поступления его в очередь межоперационного задела m -ой операции до момента окончания обработки оборудованием есть величина

$$\Delta\tau_{m,\Sigma_j} = \Delta\tau_{m,j} + \Delta\tau_{m,Prj} = \sum_{k=1}^{N_{\psi,m}} \Delta\tau_{m,j-k+1},$$

$$\Delta\tau_{m,Prj} = \sum_{k=2}^{N_{\psi,m}} \Delta\tau_{m,j-k+1}. \quad (9)$$

Если в межоперационном заделе перед m -ой операцией находится большое количество предметов труда $N_m \gg 1$, то на основании центральной предельной теоремы [22] независимо от закона распределения случайной величины $\Delta\tau_m$ случайная величина $\Delta\tau_{m,\Sigma_j}$ будет распределена по нормальному закону. Плотность распределения $\psi_m(t, \mu_{m,\psi})$ случайной величины $\mu_{m,\psi}$ для m -ой операции может быть записана через плотности распределения случайных величин $\Delta S_{m,\psi}$ и $\Delta\tau_m$ (5). В общем случае необходимо строить эмпирическую статистическую функцию распределения случайной величины [21], которая может быть выровнена специально подобранной аналитической функцией [21], определяющей существенные черты статистического материала. Задача сводится к замене гистограммы плавной кривой, имеющей достаточно простое аналитическое выражение, с последующим использованием его в качестве плотности распределения случайной величины $\Delta S_{m,\psi}$ и $\Delta\tau_m$. Вопрос о том, в каком классе функций искать наилучшее приближение, решается исходя из особенностей производственной задачи. Часто вид выравнивающей кривой для плотности распределения случайной величины выбирается исходя из условий возникновения случайной величины [26]. Распространенным методом выравнивания является метод моментов. Как правило, моменты выше четвертого порядка не

используют [21]. Даже для простых случаев распределения случайных величин $\Delta S_{m,\psi}$ и $\Delta\tau_m$ закон распределения случайной величины $\mu_{m,\psi}$ имеет сложный аналитический вид, может быть полезен только для качественного анализа параметров производственного процесса. Целесообразно при построении функция переноса технологических ресурсов (5) использовать плотности распределения случайных величин $\Delta S_{m,\psi}$ и $\Delta\tau_m$ с шагом группированного статистического ряда [21], обеспечивающим требуемую точность численного интегрирования. Полученная численным способом плотность распределения $\psi_m(t, \mu_{m,\psi})$ на m -ой операции выравнивается одним из известных законов распределения случайной величины $\mu_{m,\psi}$. Для плотности распределения $\psi_m(t, \mu_{m,\psi})$ справедливо качественное поведение:

$$\lim_{\mu_{m,\psi} \rightarrow 0} \psi_m(t, \mu_{m,\psi}) \rightarrow 0, \quad \lim_{\mu_{m,\psi} \rightarrow \infty} \psi_m(t, \mu_{m,\psi}) \rightarrow 0 \quad (10)$$

что является следствием переноса конечного количества технологических ресурсов за конечное время обработки предмета труда на m -ой технологической операции.

Производственная функция обобщенной технологической единицы [6, 27]. Трудность реализации математических моделей операций связана с отсутствием уравнений состояния, характеризующих физический процесс преобразования ресурсов в ходе выполнения операции, а при наличии уравнений состояния – с отсутствием необходимых значений физических констант для конкретных коэффициентов в таких уравнениях. Это приводит к введению упрощениям при описании операции и существенным отклонениям от реальной технологии производства. Подавляющее число прикладных задач по моделированию технологических процессов являются оптимизационными, учитывающими ограничения, связанные с реализацией поставленной задачи. Моделирование должно осуществляться на базе глубокого физического анализа операции, так как в основе операций лежат физические или механические процессы (нагрев, охлаждение, резанием, давление, пространственные перемещения). Эти процессы описываются обыкновенными или в частных производных дифференциальными уравнениями, имеющими множество решений [28]. Для получения решения, обеспечивающего единственное поведение исполнительных

механизмов при выполнении операции, необходимо задать граничные и начальные условия. После установления единственности решения возникает задача обеспечения требуемой технологической точности [29].

Общей чертой моделирования операций является то, что большинство разработчиков новых технологических процессов продолжают пользоваться дорогостоящим методом проб и ошибок из-за отсутствия строгих математических зависимостей. Другая группа трудностей, снижающая точность решения технологических задач даже при наличии достаточно строгих законов (уравнение теплопроводности), определяющих физический процесс, вызвана отсутствием достоверных физических коэффициентов. Причины, связанные с использованием не вполне корректных в физическом смысле для конкретного случая моделирования основных уравнений или входящих в них коэффициентов, требуют необходимую экспериментальную проверку и корректировку вычислений. Для повышения точности решений на практике требуются физические эксперименты. Принятые с большими допущениями параметры в модели операции рассматривают как неизвестные. Для их определения пользуются экспериментом данными [29].

При построении производственной функции обобщенной технологической единицы будем подразумевать выполнение одной обобщенной операции на одном обобщенном оборудовании (рис. 3). Введем обозначения для ресурсов капитала k_m , энергоресурсов e_m и трудовых ресурсов l_m для m -ой агрегированной операции:

$$\langle \Delta S_{m-\psi} \rangle = k_m + e_m + l_m, \quad k_m = \langle \Delta S_{m-CuM} + \Delta S_{m-\infty} \rangle, \\ e_m = \langle \Delta S_{m-\varepsilon} \rangle, \quad l_m = \langle \Delta \Phi_{m-O} + \Delta \Phi_{m-C} \rangle, \quad (11)$$

При построении производственных функций подразумеваем, что продолжительность интервала времени T , для которого строится производственная функция, значительно превышает длительность изготовления изделия

$T \gg \sum_{m=1}^M \Delta \tau_m$, что позволяет сгладить влияние

начальных условий. Для линии "Intel" с количеством операций $M \approx 100..500$ [19], [30] и средним количеством предметов труда $\langle N_m \rangle \approx 1000$ [19] в межоперационном заделе,

получаем оценку: $\left(\frac{\langle \Delta \tau_m \rangle}{T} \right) \approx 10^{-5}$.

Технологические процессы, включающие операции кузнечно-прессового или литейного производства, имеют в межоперационном заделе $\langle N_m \rangle \approx 10^4 \div 10^6$ предметов труда. Таким образом, статистическое распределение параметров случайных процессов ΔS_{m-CuM} , $\Delta S_{m-\varepsilon}(t)$, $\Delta \Phi_{m-O}(t)$, $\Delta \Phi_{m-C}(t)$, $\Delta S_{m-\infty}(t)$ и $\Delta \tau_{m-O}(t)$, $\Delta \tau_{m-B}(t)$, $\Delta \tau_{m-E}(t)$, $\Delta \tau_{m-ПЗ}(t)$ в фиксированный момент времени не зависит от начального состояния, так как влияние начального состояния в течение достаточно большого промежутка времени t вытеснено влиянием других случайных факторов. Если статистическое распределение случайного процесса, например, $\Delta S_{m-\psi}(t)$, известно, то возможно вычислить средние значения технологических параметров и величин $f(\Delta S_{m-\psi})$, зависящих от $\Delta S_{m-\psi}(t)$:

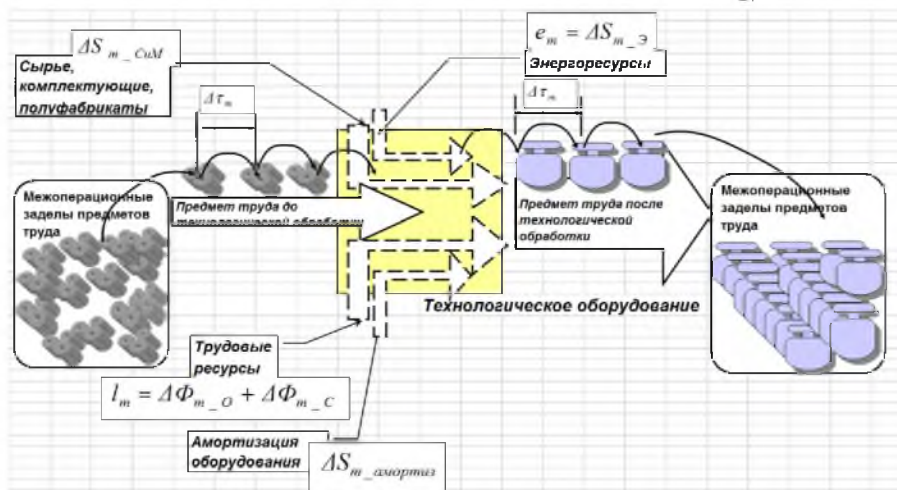


Рис. 3. Схема переноса технологических ресурсов на предмет труда
Fig. 3. Scheme of transferring technology resources on the subject of labor

$$\langle f(\Delta S_{m-\psi}) \rangle = \int_0^{\infty} f(\Delta S_{m-\psi}) \cdot \psi_{\Delta S_m}(\Delta S_{m-\psi}) \cdot d(\Delta S_{m-\psi}),$$

$$\int_0^{\infty} \psi_{\Delta S_m}(\Delta S_{m-\psi}) \cdot d(\Delta S_{m-\psi}) = 1 \quad (12)$$

Введем вероятность того, что реализация случайного процесса в течение времени T отслеживания параметра системы $\Delta S_{m-\psi}$ будет находиться в промежутке $(\Delta S_{m-\psi 0}, \Delta S_{m-\psi 0} + \delta(\Delta S_{m-\psi}))$ время δT :

$$dW_{\Delta S_m} = \psi_{\Delta S_m}(\Delta S_{m-\psi}) \cdot d(\Delta S_{m-\psi}). \quad (13)$$

В силу определения статистическое усреднение эквивалентно усреднению по времени.

$$\langle \Delta S_{m-\psi}(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \Delta S_{m-\psi}(t) dt. \quad (14)$$

С другой стороны

$$\langle \Delta S_{m-\psi}(t) \rangle = \int_0^{\infty} \Delta S_{m-\psi} \cdot \psi_{\Delta S_m}(\Delta S_{m-\psi}) \cdot d(\Delta S_{m-\psi}). \quad (15)$$

Таким образом, давая возможность вычислять средние значения величин случайных процессов, статистика позволяет делать предсказания, оправдывающиеся с большой точностью для любого промежутка времени, настолько большого, чтобы полностью сгладить влияние начальных условий. При построении производственной функции для m -ой агрегированной операции рассмотрим процесс переноса ресурсов $dR_{m-\psi} = dK_{m-\psi} + dL_{m-\psi} + dE_{m-\psi}$ капитала $dK_{m-\psi}$, энергоресурсов $dE_{m-\psi}$ и трудовых ресурсов $dL_{m-\psi}$ за время dt . Будем полагать, что за рассматриваемый промежуток $dt \gg \langle \Delta \tau_m \rangle$ произошло достаточное большое число реализаций случайного процесса $\Delta \tau_m(t)$. Тогда количество перенесенных ресурсов $dR_{m-\psi} = \langle \mu_{m-\psi} \rangle \cdot dt$ за время dt можно определить следующим образом:

$$\langle \mu_{m-\psi} \rangle = \frac{\langle \Delta S_{m-\psi} \rangle}{\langle \Delta \tau_m \rangle} = \int_0^{\infty} \psi_{\mu}(\mu_{m-\psi}) \cdot \mu_{m-\psi} \cdot d\mu_{m-\psi},$$

$$\langle \Delta \tau_m \rangle = \int_0^{\infty} \Delta \tau_m \cdot \psi_{\Delta \tau_m}(\Delta \tau_m) \cdot d(\Delta \tau_m). \quad (16)$$

Статистически усредненная величина $\langle \Delta S_{m-\psi} \rangle$ задана технологией производства норма расходов ресурсов на выполнение операции, а статистически усредненная величина $\langle \Delta \tau_m \rangle$ обратно пропорциональна темпу работы оборудования:

$$\frac{dR_{m-\psi}}{dt} = [\chi]_{\psi} \cdot r_m, \quad \langle \Delta S_{m-\psi} \rangle = k_m + e_m + l_m = r_m,$$

$$\langle \Delta \tau_m \rangle = \frac{1}{[\chi]_{\psi}}, \quad (17)$$

$$\frac{dK_{m-\psi}}{dt} = [\chi]_{\psi} \cdot k_m, \quad \frac{dL_{m-\psi}}{dt} = [\chi]_{\psi} \cdot l_m,$$

$$\frac{dE_{m-\psi}}{dt} = [\chi]_{\psi} \cdot e_m.$$

Принимая во внимание (17), следует

$$[\chi]_{\psi} = \frac{1}{k_m} \cdot \frac{dK_{m-\psi}}{dt}, \quad [\chi]_{\psi} = \frac{1}{e_m} \cdot \frac{dE_{m-\psi}}{dt},$$

$$[\chi]_{\psi} = \frac{1}{l_m} \cdot \frac{dL_{m-\psi}}{dt}, \quad (18)$$

$$e_m = f_m(k_m, [\chi]_{\psi}), \quad l_m = g_m(k_m, [\chi]_{\psi}) \quad (19)$$

Блок технологических коэффициентов [19] определяет технологию обработки предмета труда оборудованием как множество способов производства, задает отношения между интенсивностью потреблением ресурсов капитала $dK_{m-\psi}$, энергоресурсов $dE_{m-\psi}$ и трудовых ресурсов $dL_{m-\psi}$. Для обобщенной технологической единицы, состоящей из двух последовательно расположенных единиц оборудования (рис. 4), каждое из которых характеризуется статистически усредненной нормой расходов ресурсов $\langle \Delta S_{m1-\psi} \rangle$ и $\langle \Delta S_{m2-\psi} \rangle$ за эффективное время выполнения операции $\langle \Delta \tau_{m1} \rangle$ и $\langle \Delta \tau_{m2} \rangle$, производственная функция примет вид:

$$\frac{dR_{m-\psi}}{dt} = \frac{r_m}{[\chi]_{\psi}}, \quad \langle \Delta S_{m1-\psi} \rangle + \langle \Delta S_{m2-\psi} \rangle = \langle \Delta S_{m-\psi} \rangle = r_m,$$

$$\langle \Delta \tau_{m1} \rangle + \langle \Delta \tau_{m2} \rangle = \langle \Delta \tau_m \rangle = \frac{1}{[\chi]_{\psi}} \quad (20)$$

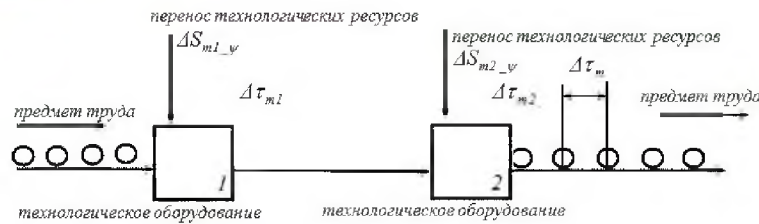


Рис. 4. Схема обобщенной единицы технологического оборудования
Fig. 4. Scheme of generalized production unit

При обработке предмета труда на одной из единиц оборудования, входящих в состав обобщенного оборудования, остальные единицы простаивают. Повышение производительности достигается параллельным расположением оборудования или разделение обобщенной операции на несколько операций (рис. 5), каждая из которых снабжена межоперационным накопителем. Если обобщенная технологическая единица состоит из двух параллельно работающих единиц (рис. 5), то темп обработки определяется темпами обработки параллельно расположенного оборудования, выполняющего операцию одним и тем же или разными способами. Количество перенесенных ресурсов

$\langle \Delta S_{m_ψ} \rangle$ за эффективное время обработки $\langle \Delta \tau_m \rangle$ определим из системы уравнений:

$$\begin{cases} [\chi]_{1ψ} = [\chi]_{11_ψ} + [\chi]_{12_ψ}, \\ \langle \Delta S_{m_ψ} \rangle \cdot [\chi]_{1ψ} = \langle \Delta S_{m1_ψ} \rangle \cdot [\chi]_{11_ψ} + \langle \Delta S_{m2_ψ} \rangle \cdot [\chi]_{12_ψ}, \end{cases}$$

$$[\chi]_{11_ψ} = \frac{1}{\langle \Delta \tau_{m1} \rangle}, \quad [\chi]_{12_ψ} = \frac{1}{\langle \Delta \tau_{m2} \rangle}, \quad (21)$$

$$\langle \Delta S_{m_ψ} \rangle = \frac{\langle \Delta S_{m1_ψ} \rangle \cdot \langle \Delta \tau_{m2} \rangle + \langle \Delta S_{m2_ψ} \rangle \cdot \langle \Delta \tau_{m1} \rangle}{\langle \Delta \tau_{m1} \rangle + \langle \Delta \tau_{m2} \rangle},$$

$$\langle \Delta \tau_m \rangle = \frac{\langle \Delta \tau_{m1} \rangle \cdot \langle \Delta \tau_{m2} \rangle}{\langle \Delta \tau_{m1} \rangle + \langle \Delta \tau_{m2} \rangle}. \quad (22)$$

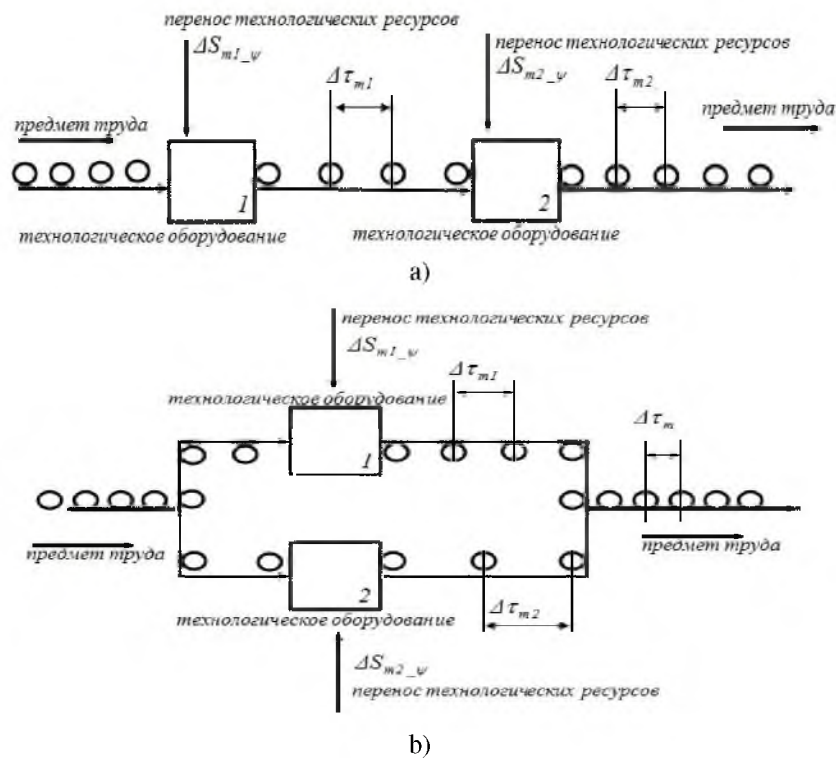


Рис. 5. Схема расположения обобщенных единиц оборудования:
a – последовательное расположение; b – параллельное расположение

Fig. 5. Location scheme of generalized production units:
a – sequential arrangement; b – parallel arrangement

Если обобщенная единица представляет технологический участок с расположенным вдоль технологического маршрута большим количеством параллельно и последовательно расположенных единиц оборудования, то объединяя последовательно или параллельно расположенные единицы оборудования в одну обобщенную, может быть получена производственная функция обобщенной единицы. Обобщенной единице соответствует статистически усредненные норма расходов ресурсов и эффективное время выполнением операций.

Сетевая модель многономенклатурной производственной линии

Первичным звеном в организации производственного процесса является рабочее место, представляющее производственную

площадь, оснащенную оборудованием и инструментом, при помощи которых работник выполняет отдельные технологические операции. Совокупность рабочих мест для выполнения операций образуют пространственную структуру производства. Различают три основные пространственные структуры производства – технологическую, предметную и смешанную. Поточные линии, как правило, имеют предметную структуру (рис. 6). Так как движение предметов труда в процессе производства осуществляется в пространстве и времени, то при проектировании систем управления поточными линиями необходимо учитывать временную и пространственную структуру производственного процесса. При этом актуальность приобретают вопросы создания обобщенных агрегированных моделей операций [29].

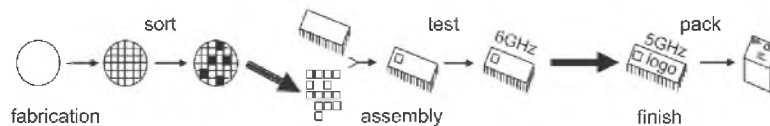


Рис. 6. Типовой технологический маршрут полупроводникового производства [30]
Fig. 6. Typical manufacturing route in the production of semiconductors [30]

Алгоритм построения модели производственного процесса на основе понятий обобщенной операции и обобщенного технологического маршрута заключается в дроблении производственного цикла на более мелкие интервалы. Изменение интервала обобщения приводит к изменению состава и числа обобщенных операций, составляющих процесс производства изделий [20]. Увеличение интервала ведет к укрупнению обобщенных операций и сокращению их количества. В обобщенную операцию объединяются операции в выбранном интервале обобщения [20], очередность выполнения которых определяется последовательностью интервалов обобщения. Группа оборудования, на котором выполняется обобщенная операция, является обобщенным оборудованием. При построении модели обобщенной операции анализируют конструкторско-технологические связи между операциями.

Многономенклатурное производство представляет собой сложный ориентированный гиперграф (V, E) , узлы которого представлены

обобщенными единицами оборудования $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_{23}, V_{24}\}$, а ребра $E = \{E_1, E_2, E_3, \dots, E_6\}$ определяют обобщенные маршруты $E_1 = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$, $E_2 = \{V_1, V_2, V_3, V_{16}\}$, ..., используемые для производства изделий разной номенклатуры (рис. 7). Расположение вершин V_q задано схемой расстановки оборудования на участке. Пересечение ребер E_p и E_r определяет общее оборудование V_q , используемое для производства изделия р-ой и г-ой номенклатуры. Обработка изделия р-ой или г-ой номенклатуры определяется приоритетом обслуживания смежных операций. Реализация гиперграфа определяет способ производства изделия р-ой номенклатуры, задает ориентированную сеть обобщенных маршрутов, представленных последовательностью операций, ограниченных конструкторско-технологическими связями с большим количеством циклов и петель (рис. 8).

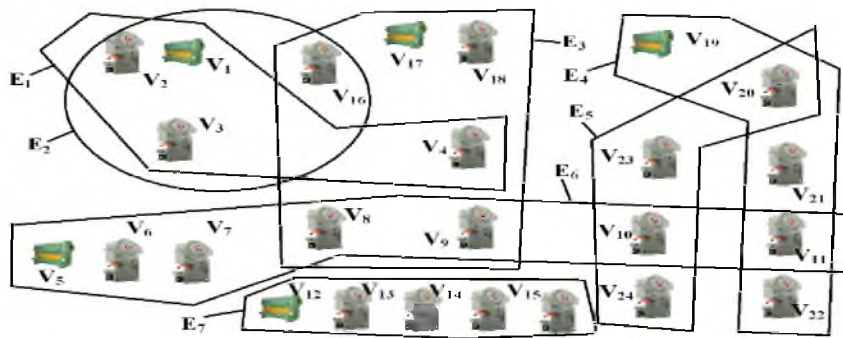


Рис. 7. Гиперграф многономенклатурного производства
Fig. 7. Hypergraph of multiproduct manufacture

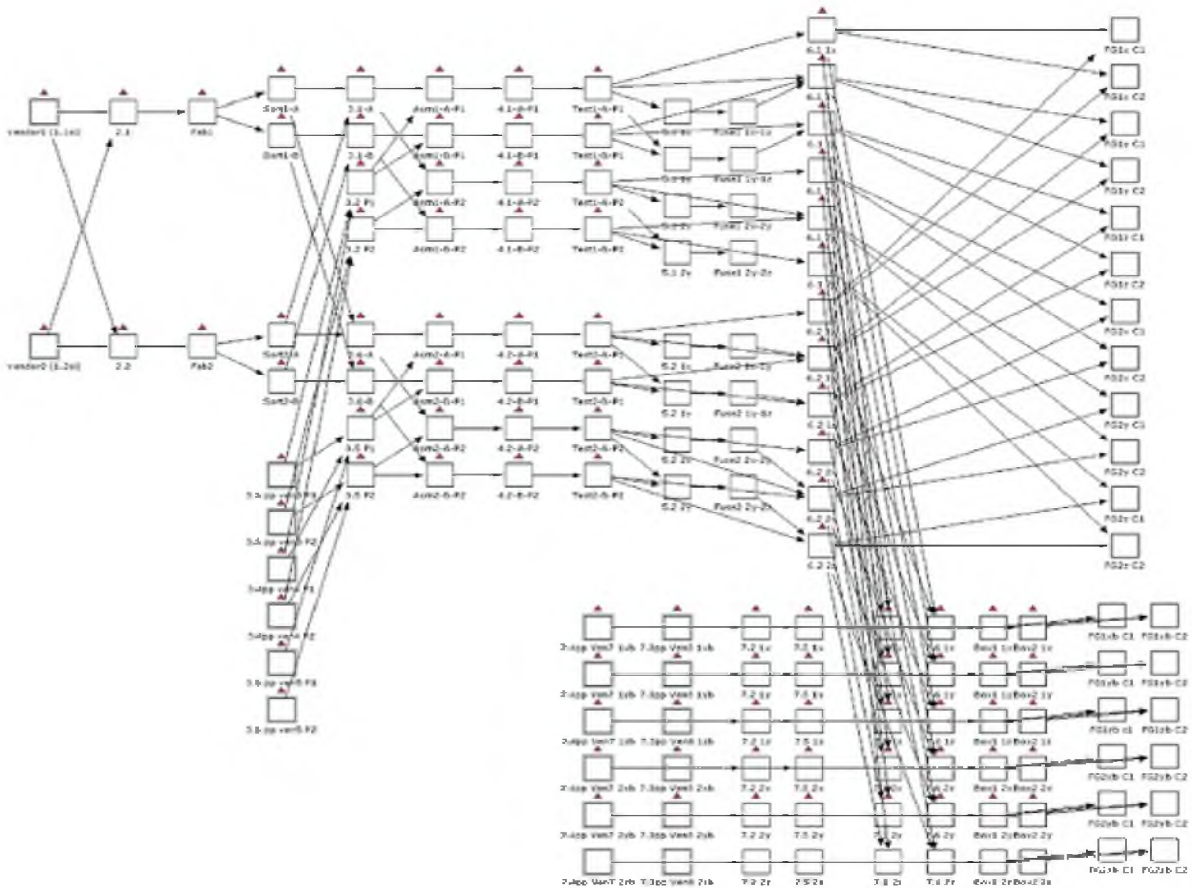


Рис. 8. Сетевой график обобщенных технологических маршрутов [31]
Fig. 8. Network diagram of technological routes [31]

Коэффициент связности для обобщенной операции учитывает конструкторско-технологические связи между операциями, необходимые для определения обобщенного технологического маршрута производства изделия с допустимой степенью точности [20]. Недостатком агрегированной схемы планирования является то, что состояние производственных мощностей входящего в состав обобщенной операции оборудования учитывается

косвенно, без учета ограничений. Чем ближе модель к реальному объекту, тем больше обобщенных операций и взаимосвязей между ними она отражает, и тем сложнее ее реализация. Построение производственных функций (производственных способов) для обобщенного оборудования, связывающих количество обработанных предметов труда с затратами ресурсов, является центральным вопросом моделирования производственных систем.

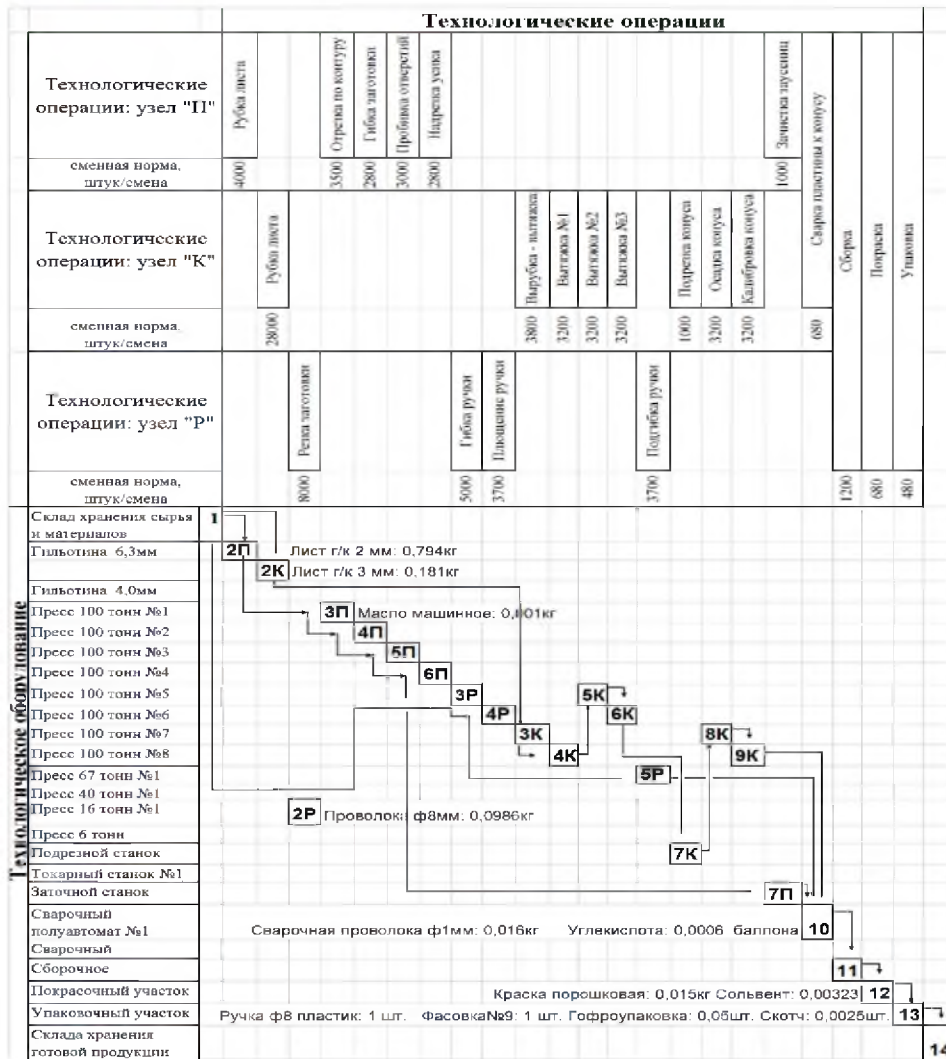


Рис. 9. Схема изготовления изделия "Операция-оборудование"
Fig. 9. Scheme of manufacturing products "Operation-equipment"

При построении производственной функции требуется анализ, как структуры обобщенной единицы, так и реакции системы на внешние воздействия, в частности на изменения структуры ресурсов. Типовая схема производства изделия, учитывающая взаимосвязь операции с оборудованием, представлена на рис. 9, позволяет установить главную линию технологического процесса, определить связи и осуществить выбор ведущего изделия [20], задействовав сетевой график технологического процесса (рис. 10), условно отображающий взаимосвязи между операциями, использующими одно и то же оборудование и поступление ресурсов для выполнения операции. Выбор варианта главной линии и ведущего изделия определяется особенностями планирования и управления технологическим процессом. Ведущим выбирается изделие с трудоемким маршрутом изготовления, содержащим критический путь.

Производственные процессы для узлов «К», «П», «Р» являются связанными, используют для выполнения операции одну группу оборудования. Для каждой обобщенной единицы строится производственная функция, которая является комбинацией множества производственных функций элементарных производственных единиц, расположенных вдоль технологического маршрута параллельно или последовательно. Разбиение может быть доведено до простейших актов процесса производства, о которых можно судить по конструкторско-технологической документации. Технологические параметры, определяющиеся в процессе конструирования оборудования и его опытной эксплуатации, служат основой для системы нормативов, регламентирующие затраты трудовых и сырьевых ресурсов, производительность оборудования и затраты на ремонт и частоту его проведения.



Рис. 10. Сетевой график изготовления изделия
Fig. 10. Network diagram of product manufacture

Рассмотрим построение производственных функций для технологического процесса с ведущим изделием «П» (рис. 11). В технологическом процессе «П» используются ресурсы: сырье, комплектующие, материалы, энергоресурсы, труд. Затраты ресурсов в единицу времени и темп обработки предметов труда при выполнении технологической операции определяются техническими показателями оборудования, на основании которых возможно дать описание технологического процесса, сформулировать производственную функцию для каждой единицы обобщенного технологического оборудования. Нормативы, рассчитанные на основе технологических данных, характеризуют предельные возможности оборудования. Соответствующие производственные функции

описывают идеальное производство. В действительности качество сырья непостоянно, технологические параметры оборудования зависят от факторов внешней среды, которые вызывают случайные колебания производительности и интенсивности потребления технологических ресурсов на каждой операции. В реальных условиях производительность и затраты могут значительно отличаться от нормативных. Проблема усложняется, если в производственном процессе важную роль играет квалификация рабочих. При этом существенное влияние оказывают организационные и социально-экономические факторы, в основе которых лежит система стимулирования производства [23].



Рис. 11. Сетевой график технологического процесса с ведущим изделием «П»
Fig. 11. Network diagram of the process with the leading product "P"

При построении производственной функции для отдельного оборудования часто возникают вопросы, не связанные с технологией производства, требующие анализа социально-

экономических факторов. Существует зависимость интенсивности обработки предмета труда на отдельной операции технологического маршрута от качества и количества трудовых

ресурсов. Распределение работников с различной производительностью труда по операциям определяет темп работы поточной линии. Учет социально-экономических факторов в процессе производства осуществляется путем введения в производственную функцию переменных стохастической природы. Построение теоретической производственной функции, опирающейся на предположение о рациональной организации производства, позволяет создать представления об идеально функционирующей производственной системе, оценить ее возможности и выявить потери, возникшие из-за недостатков экономического механизма регулирования производственной деятельности.

График теоретической производственной функции совпадает с множеством эффективных точек производственных возможностей. Учет стохастических социально-экономических и производственно-технических факторов является одним из основных путей построения теоретически и практически обоснованных производственных функций. Для описания производственного процесса использовано понятие производственного способа, что позволило рассмотреть в сетевой модели разные способы производства в зависимости от значений параметров производственной линии. После выбора ведущего изделия типовой сетевой график технологического маршрута представлен в виде трех поточных линий, синхронизированных на операции «П10» (рис. 11). Узлы, изготовленные на параллельных синхронизированных технологических линиях «К» и «Р» поступают в межоперационный задел, цель которого является ликвидация асинхронности в производительности поточных линиях «П», «К» и «Р». При моделировании поточной линии с ведущим изделием «П» узлы «К» и «Р» условно представлены как комплектующие, поступающие со склада. Количество узлов «К» и «Р» регламентируется складским критическим запасом. Поступление узлов «К» и «Р» синхронизированы балансовыми соотношениями с параметрами поточной линии ведущего изделия. Сетевой график технологического процесса в зависимости от требуемой точности описания представлен в виде детализации операции на технологические и вспомогательные переходы, позиции и установки, рабочие и вспомогательные хода, технологические приемы. Операция может быть разбита на составные части или укрупнена в более масштабные. Моделируемая поточная

линия представляется в виде совокупности большого числа обобщенных единиц, каждая из которых описывается своей производственной функцией. Вопрос о том, в виде какой совокупности обобщенных единиц представить производственную линию решается в зависимости от поставленной задачи.

Заключение

Перенос технологических ресурсов на предмет труда в результате воздействия технологического оборудования является случайным процессом. Закономерности, характеризующие данный процесс, значительным образом влияют на потоковые характеристики производственных линий. Однако, несмотря на свою важность, данные закономерности достаточным образом не исследованы. Как правило, исследователи ограничивались построением производственных функций для производственной системы в целом, не рассматривая структуры времени выполнения технологической операции и структуры технологических ресурсов, переносимых на предмет труда в результате выполнения технологической операции. Разработке детального предметно-технологического описания управляемого производственного процесса, основанного, на стохастическом механизме переноса технологических ресурсов на предмет труда в результате воздействия оборудования в ходе выполнения технологической операции, должно уделяться.

В статье приведен краткий обзор различных подходов, используемых при построении модели переноса технологических ресурсов на предмет труда. Особое внимание уделяется структуре времени технологической обработки предмета труда и структуре технологических ресурсов, переносимых на предмет труда.

Список литературы

1. Пигнастый О.М. 2014. О новом классе динамических моделей поточных линий производственных систем. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Белгород: БГУ, 31/1: 147-157.
2. Пигнастый О.М. 2015. Обзор моделей управляемых производственных процессов поточной линии производственных систем. Научные ведомости Белгородского государственного университета. 34/1: 137-152.
3. Пигнастый О.М. 2015. Анализ моделей переходных управляемых производственных

процессов. Научные ведомости Белгородского государственного университета. 35/1: 133-144.

4. Пигнастый О.М. 2007. Статистическая теория производственных систем. Х., ХНУ, 388 с.

5. Пигнастый О.М. 2016. Анализ принципов и методов построения систем управления производственным процессом. Научные ведомости Белгородского государственного университета. 37: 152-161

6. Пигнастый О.М. 2007. О построении целевой функции производственной системы. Доповіді Національної академії наук України. 5: 50-55.

7. ГОСТ 15467.79. 2001. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Госстандарт России, 25.

8. ГОСТ 50779.10.2000. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения. – М.: Госстандарт России, 38.

9. Демуцкий В.П., Пигнастая В.С., Пигнастый О.М., 2005. Стохастическое описание экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции. Доповіді Національної академії наук України. 7: 66-71.

10. Демуцкий В.П., Пигнастый О.М. 2007. Теория функционирования производственного процесса с серийным или массовым выпуском продукции. Математичні моделі та інформаційні технології в сучасній економіці. 62-98.

11. Пигнастый О.М. 2009. Расчет производственного цикла с применением статистической теории производственно-технических систем. Доповіді Національної академії наук України. 12: 38-44.

12. Локтев И.И. 2005. Вопросы моделирования технологического процесса. Известия Томского политехнического университета. 308(6): 90 – 94.

13. Петров Б.Н. 1978. Теории моделей в процессах управления. М.: Наука. 224.

14. Якимович С.Б. 2003. Постановка и решение задачи синтеза и оптимального управления технологическими процессами лесозаготовок. Лесной вестник. 3: 149-160.

15. Летенко В.А. 1979. Организация, планирование и управление машиностроительным предприятием. М., Высшая школа. 232.

16. ГОСТ 3.1109.82. 2003. Термины и определения основных понятий. М., Госстандарт России. 15.

17. Holt C.C., Modigliani F., Muth J.F. 1960. Planning Production: Inventories and Work Force. Prentice-Hall. 419.

18. Jacobs J.H., Campen E.J., Rooda J.E. 2003. Characterization of the operational time variability using effective processing times. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. 16(3): 511-520.

19. Lefeber E., Berg R.A., Rooda J.E. 2004. Modeling, Validation and Control of Manufacturing. Proceeding of the 2004 American Control Conference. 4583-4588.

20. Шкурба В.В., Болдырева В.А., Вьюн А.А. 1975. Планирование дискретного производства в условиях АСУ. К., Техника. 296.

21. Венцель Е.С., Овчаров Л.А. 2000. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М., Высшая школа. 480.

22. Венцель Е.С., Овчаров Л.А. 2000. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М., Высшая школа. 383.

23. Вейнберг А.М., Данилочкина Н.Г. 1989. Совершенствование проектирования трудовых процессов. Рига: Зинатне. 86

24. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 356 с.

25. Первозванский А.А. Математические методы в управлении производством / А. А. Первозванский. – М.: Наука, 1975. – 616 с.

26. Zhang Liang. 2009. System-theoretic properties of Production Lines. A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Michigan. 289.

27. Пигнастый О.М. 2005. Инженерно-производственная функция предприятия с серийным или массовым выпуском продукции. Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Харьков: НАКУ. 42(3): 111 – 117.

28. Митрофанов С.П. Технологическая подготовка гибких производственных систем / С. П. Митрофанов, Д.Д. Куликов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 352 с.

29. Тихонов А.Н. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении / А. Н. Тихонов, В.Д. Кальнер, В.Б. Гласко. – М.: Машиностроение, 1990. – 264 с.

30. Tian F. 2011. An iterative approach to item-level tactical production and inventory planning. International Journal of Production Economics. 133: 439-450.

31. Simon J.T., Hopp J. 1991. Availability and Average Inventory of Balanced Assembly. NFORM Global. 161-168.

References

1. Pihnastyi O.M. A New Class of Dynamic Models of Flow Lines of Production Systems // Nauchnye vedomosti BelGU. 2014. No 15 (186). Pp. 147-157.

2. Pihnastyi O.M. Review of Governance Models of Production Lines Manufacturing Systems // Nauchnye vedomosti BelGU. 2015. No 7 (204). Pp. 137-152.

3. Pihnastyi O.M. Analysis of the Models of Transition Processes Controlled Manufacture // Nauchnye vedomosti BelGU. 2015. No 13(210). Pp. 133-144.

4. Pihnastyi O.M. Statistical Theory of Production Systems. Kh.: HNU. 2007. 388 p.

5. Pihnastyi O.M. Analysis of the Principles and Methods of Construction Control Systems of Technological Process // Nauchnye vedomosti BelGU. 2016. No 2(223). Pp. 152-161

6. Pihnastyi O.M. The Construction of the Objective Function of the Production System // Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2007. No 5. Pp. 50-55.
7. GOST 15467.79. 2001. Quality Management. Basic concepts. Terms and Definitions. M.: Gosstandart of Russia. 25 p.
8. GOST 50779.10-2000. Statistical Methods. Probability and Statistics Basics. Terms and Definitions. M.: Gosstandart of Russia. 38 p.
9. Demuckij V.P., Pihnastaja V.S., Pihnastyi O.M. Stochastic Description of the Economic and Production Systems with Mass Production // Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2005. No 7. Pp. 66-71.
10. Demuckij V.P., Pihnastyi O.M. The Theory of Operation of the Production Process with a Serial and Mass Production // Mathematical models and information technology in the modern economy. 2007. Pp. 62-98.
11. Pihnastyj O.M. The Calculation of the Production Cycle with the Use of the Statistical Theory of Technological Systems // Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2009. No 12. Pp. 38-44.
12. Loktev I.I. Questions of Modeling Process // Bulletin of the Tomsk Polytechnic. 2005. No 308(6). Pp. 90-94.
13. Petrov B.N. Theories of Models in Management Processes. M.: Nauka. 1978. 224 p.
14. Jakimovich S.B. Statement and Solution of the Problem of Synthesis of Optimal Control and Process Logging // Lesnoj Vestnik. 2003. No 3. Pp. 149-160.
15. Letenko V.A. Organisation, Planning and Management of a Machine Builder. M., Vysshaja shkola. 1979. 232 p.
16. GOST 3.1109.82. 2003. Terms and Definitions of Basic Concepts. M.: Gosstandart of Russia. 15 p.
17. Holt C.C., Modigliani F., Muth J.F. Planning Production: Inventories and Work Force. Prentice-Hall. 1960. 419 p.
18. Jacobs J.H., Campen E.J., Rooda J.E. Characterization of the operational time variability using effective processing times. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. 2003. No 16(3). Pp. 511-520.
19. Lefebvre E., Berg R.A., Rooda J.E. Modeling, Validation and Control of Manufacturing // Proceeding of the 2004 American Control Conference. 2004. Pp. 4583-4588.
20. Shkurba V.V., Boldyreva V.A., V'jun A.A. Planning Digital Production in ACS. K.: Tehnika. 1975. 296 p.
21. Vencel' E.S., Ovcharov L.A. Theory of Probability and its Engineering Applications. M.: Vysshaja shkola. 2000. 2-e izd. 480 p.
22. Vencel' E.S., Ovcharov L.A. The Theory of Random Processes and its Engineering Applications. 2000. 383 p.
23. Vejnberg A.M., Danilochkina N.G. Perfection Design of Work Processes. Riga: Zinatne. 1989. 86 p.
24. Buslenko N.P. Modeling of Complex Systems. M.: Nauka. 1978. 356 p.
25. Pervozvanskij A.A. Mathematical Methods in Production Management. M.: Nauka, 1975. 616 p.
26. Zhang Liang. System-theoretic Properties of Production Lines. A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Michigan. 2009. 289 p.
27. Pihnastyi O.M. Engineering and Manufacturing Businesses Function with Serial and Mass Production // Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov. Kh: NAKU. 2005. No 42(3). Pp. 111-117.
28. Mitrofanov S.P., Kulikov D.D. Technological Preparation of Flexible Manufacturing systems. L.: Mashinostroenie, 1987. 352 p.
29. Tihonov A. N., Kal'ner V.D., Glasko V.B. Mathematical Modeling of Technological Processes and the Method of Inverse Problems in Engineering. M.: Mashinostroenie. 1990. 264 p.
30. Tian F. An Iterative Approach to Item-level Tactical Production and Inventory Planning // International Journal of Production Economics. 2011. No 133. Pp. 439-450.
31. Simon J.T., Hopp J. Availability and Average Inventory of Balanced Assembly. NFORM Global. 1991. Pp. 161-168.