

**Степаненко В. Е., Фролов Д.Н.**

**МЕТОД ПРОГНОЗА И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АГРЕГАТНОЙ СБОРКИ СТАНДАРТИЗОВАННЫМИ МАТЕРИАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ**

**Степаненко В. Е., Фролов Д. Н.**

**V.E.Stepanenko, D.N.Frolov**

**МЕТОД ПРОГНОЗА И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АГРЕГАТНОЙ СБОРКИ СТАНДАРТИЗОВАННЫМИ МАТЕРИАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ**

**A METHOD FOR THE FORECAST AND STATUS ASSESSMENT OF PROCESSES OF MODULAR ASSEMBLAGE SUPPLY WITH STANDARDIZED MATERIAL RESOURCES**



**Степаненко Виктор Евгеньевич** – аспирант кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [vices@rambler.ru](mailto:vices@rambler.ru).

**Mr. Victor E. Stepanenko** – PhD Candidate, Department of Information Systems, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: [vices@rambler.ru](mailto:vices@rambler.ru).



**Фролов Дмитрий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: [frolov.dnn@mail.ru](mailto:frolov.dnn@mail.ru).

**Mr. Dmitry N. Frolov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: [frolov.dnn@mail.ru](mailto:frolov.dnn@mail.ru).

**Аннотация.** Рассмотрена проблема создания имитационных моделей оценки состояния и прогноза, производственных организационно-технических систем, а также систем производственной логистики. На примере системы обеспечения стандартизованным ресурсом показано, как при помощи структурно-функционального анализа и математического аппарата расширенных сетей Петри создать имитационную модель, обеспечивающую поддержку принятия решений при управлении системой снабжения процессов производства.

**Summary.** The paper considers the problem of creating simulated models of status assessment and forecast, of industrial engineering & management systems, as well as systems of industrial logistics. By the example of a system of standardized resource supply/management, we show how, by means of structure-function analysis and mathematical apparatus of augmented Petri nets, it is possible to create a simulated model providing decision-making support for the management of an industrial supply system.

**Ключевые слова:** агрегатная сборка, моделирование, прогноз и оценка состояния, расширенные сети Петри.

**Key words:** modular assemblage, modeling, forecast and status estimation, augmented Petri nets.

УДК 519.876

Жесткие рамки рыночных условий обуславливают потребность в совершенствовании процессов материально-технического снабжения промышленного предприятия. Важными инструментами управления этими процессами являются автоматизированные корпоративные системы. Организация таких систем на предприятии предполагает решение задач трех уровней [1]:

*Первый уровень* предусматривает обработку, введение учета и хранение информации о запасах;

*Второй* – предполагает разработку правил принятия решения, на основе которых устанавливаются срок и размер заказа, необходимого для пополнения запасов или их перемещения;

*Третий* – позволяет на основе разработанных правил принятия решений построить модель системы управления запасами и, в соответствии с этой моделью, определить стратегию функционирования системы на длительную перспективу.

Далее будет описан подход к решению задач третьего уровня. Данный подход основан на использовании имитационной модели, построенной с помощью цветных сетей Петри, предложенных Йенсеном [2]. В качестве примера выбран процесс обеспечения агрегатной сборки стандартизованными деталями. Предполагается, что управление производством осуществляется при помощи ERP (enterprise resource planning) системы со встроенным MRP (Material Requirement Planning) [3] модулем.

Опишем процесс обеспечения агрегатной сборки стандартизованными деталями. Стандартизованные детали – крепежные и соединительные изделия (болты, винты, шайбы и т.п.), изготавливаемые по государственным стандартам, отраслевым нормам и стандартам предприятия. Предприятие, производитель авиационной техники, специализируется на изготовлении среднемагистральных пассажирских авиалайнеров. Сборка основной части фюзеляжа разбита на несколько этапов, на каждом из них производится сборка одного из отсеков (агрегатов). Планирование процессов материально-технического обеспечения производится при помощи ERP-системы. Одним из видов ресурсов, используемых в процессе агрегатной сборки, являются *стандартизованные детали*. Процесс движения подобных ресурсов на предприятии изображен на рис. 1.

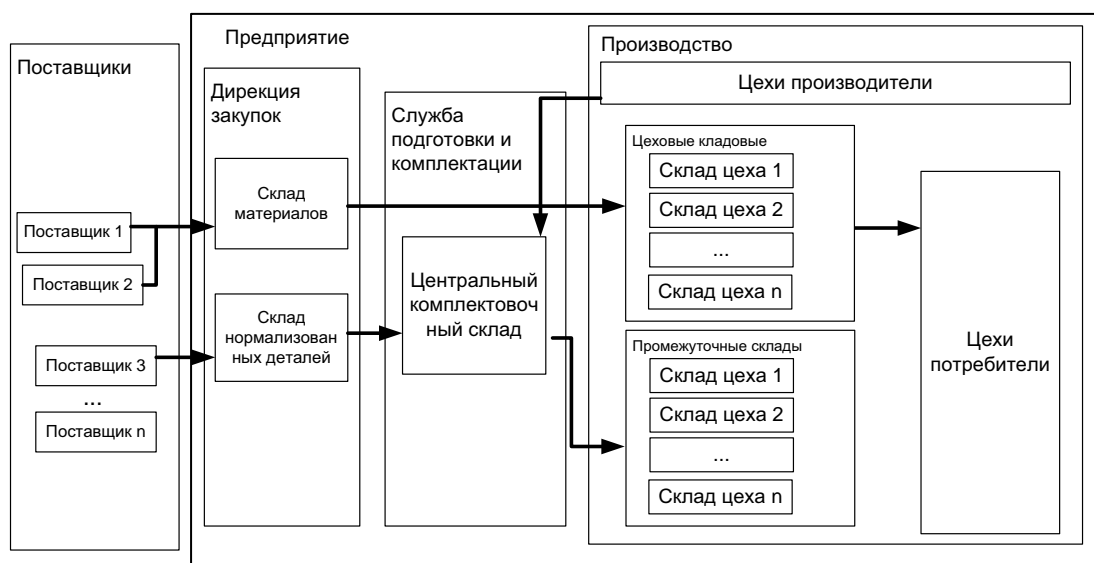


Рис. 1. Схема движения ресурсов

Первым этапом создания модели процесса обеспечения агрегатной сборки является формализованное описание на структурно-функциональном уровне (модель процесса в нотации IDEF0). Результаты анализа позволяют представить процесс обеспечения на системном уровне и сформировать структуру сети (см. рис. 2). Приведем формальное определение расширенной сети Петри, используемой для построения модели. Стоит отметить, что в основу положен математический аппарат, предложенный Йенсеном [2]. Временная цветная сеть Петри есть набор десяти кортежей

$$TCPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I, D),$$

где  $D: T \rightarrow EXPR_d$  – временная функция, выставляющая каждому переходу  $t$  пару чисел  $d_{\min}$  и  $d_{\max}$ .

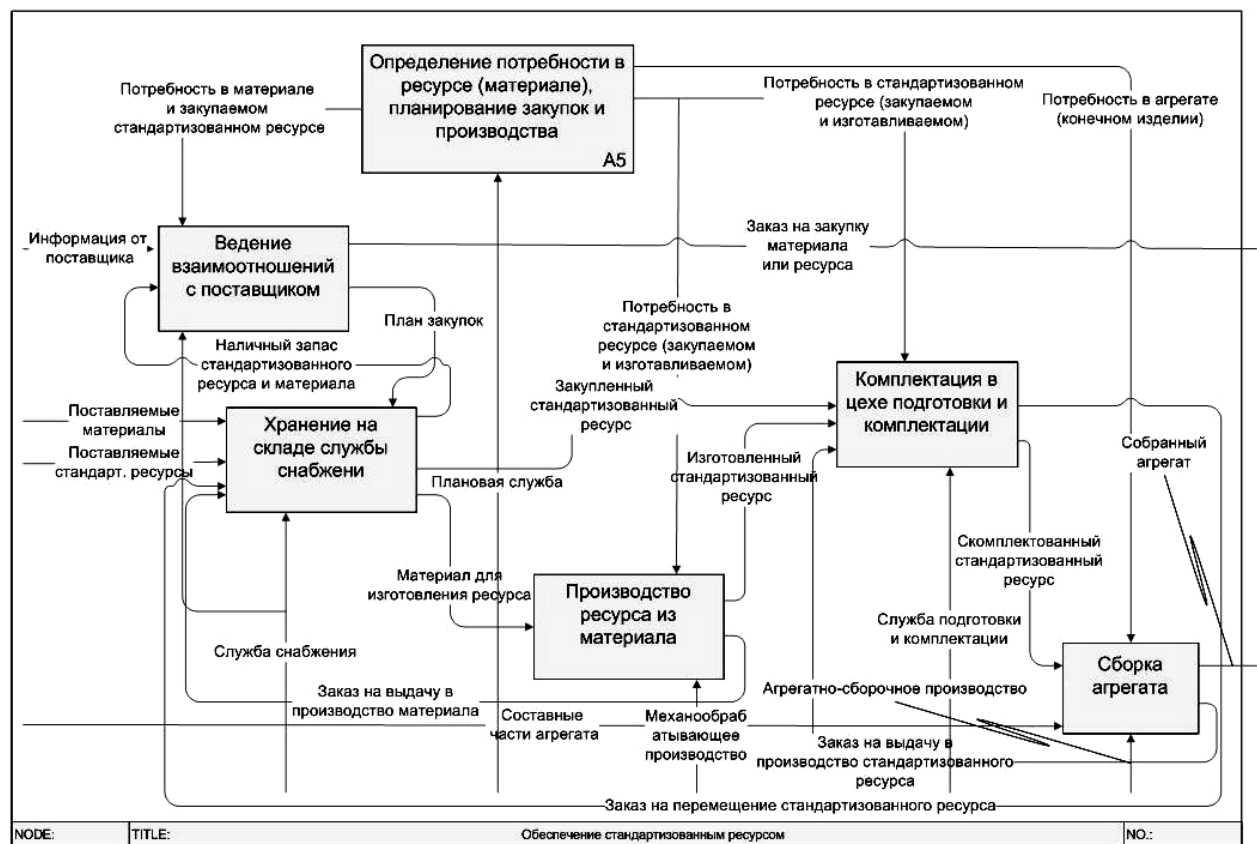


Рис. 2. IDEF0 диаграмма процесса движения стандартизованных деталей

В момент  $\tau$ , когда переход начинает работать, из каждой входной позиции изымаются фишки в количестве, соответствующем кратности дуги, ведущей из этой позиции к переходу. Время действия перехода длится в пределах интервала  $[\tau + d_{\min}, \tau + d_{\max}]$ . В момент окончания действия перехода  $\tau + d$  во все выходные позиции помещаются фишки в соответствии с кратностью выходных дуг. Время действия  $d$  перехода является величиной случайной и формируется в соответствии с заранее определенным правилом. В случае, если во время выполнения перехода возникает необходимость прервать его выполнение, то фишки возвращаются на свои места только по прошествии временного промежутка, равного времени, которое прошло с момента  $\tau$  до момента прерывания.

Временная цветная сеть Петри с возможностью оценки стоимости моделируемого процесса есть набор

$$TCPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I, D, X),$$

где  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_D\}$  – множество векторов  $x_i$  с длиной  $L$ , каждый из которых ассоциирован с конкретным переходом  $t_i \in T$ .

Можно представить  $x_i$  в виде вектора произведений

$$x_i = \begin{Bmatrix} l_1 \alpha_1^i \\ l_2 \alpha_2^i \\ \dots \\ l_L \alpha_L^i \end{Bmatrix},$$

где  $l$  – элемент вектора, характеризующий структуру стоимости действия;  $\alpha$  – количество вхождений элемента в вектор (вес элемента).

Таким образом, каждому из переходов  $t_i \in T$  ставится в соответствие конкретный комплект величин, характеризующий стоимость его срабатывания.

Пусть работа сети  $N$  описывается последовательностью срабатывания  $\lambda = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  ( $n$  – конечное число) и приводит к появлению разметки  $M$ . Тогда стоимость  $PC$  достижения разметки  $M$  можно определить по формуле  $PC = x_1 + x_2 + \dots + x_n$ .

Раскроем каждый из элементов формального определения. Модель процесса обеспечения есть набор из 11 кортежей  $TCPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I, D, X)$ .

Множество  $P$  отражает состояние ресурса (см. табл. 1) на протяжении всего процесса обеспечения.

Таблица 1

Позиции сети Петри

Позиция	Описание
$P_1$	Материал для изготовления стандартизованной детали находится на складе поставщика
$P_2$	Материал для изготовления стандартизованной детали находится на центральном складе службы снабжения
$P_3$	Материал для изготовления стандартизованной детали находится в цеховой кладовой в ожидании обработки (изготовления детали)
$P_4$	Закупаемая стандартизованная деталь находится у поставщика
$P_5$	Закупаемая стандартизованная деталь находится на центральном складе службы снабжения
$P_6$	Закупаемые и изготавливаемые детали находятся на складе службы подготовки и комплектации, подготовленные для непосредственного отпуска в производство
$P_7$	Процесс сборки осуществлен, агрегат собран
$P_8$	Заказ на изготовление детали создан MRP системой, перемещение материала для осуществления производства разрешено
$P_9$	Заказ на изготовление детали создан MRP системой, запуск производства разрешен
$P_{10}$	Заказа на изготовление готового изделия от заказчика
$P_{11}$	Заказ на изготовление агрегата сгенерирован MRP системой
$P_{12}$	Заказ на закупку создан MRP системой, перемещение нормали на склад службы подготовки и комплектации разрешено

Множество  $T$  отражает события, происходящие с ресурсом или системой управления (см. табл. 2).

Таблица 2

Переходы сети Петри

Переход	Описание
$I$	2
$t_1$	Доставка материала от поставщика до центрального склада службы снабжения
$t_2$	Перемещение материала со склада поставщика до цеховой кладовой (непосредственно в производство)
$t_3$	Осуществление изготовления стандартизованной детали из материала, сдача изготовленной детали на склад службы подготовки и комплектации

1	2
$t_4$	Доставка стандартизованной детали от поставщика до центрального склада службы снабжения
$t_5$	Перемещение стандартизованной детали с центрального склада на склад службы снабжения
$t_6$	Осуществление сборки агрегата
$t_7$	Запуск MRP системы расчет плановой потребности

$A$  – конечное множество дуг заданных матрицами инцидентности. Далее будут представлены остальные компоненты сети. Основные конструкции описаны при помощи языка моделирования CPN ML [2] (см. рис 3).

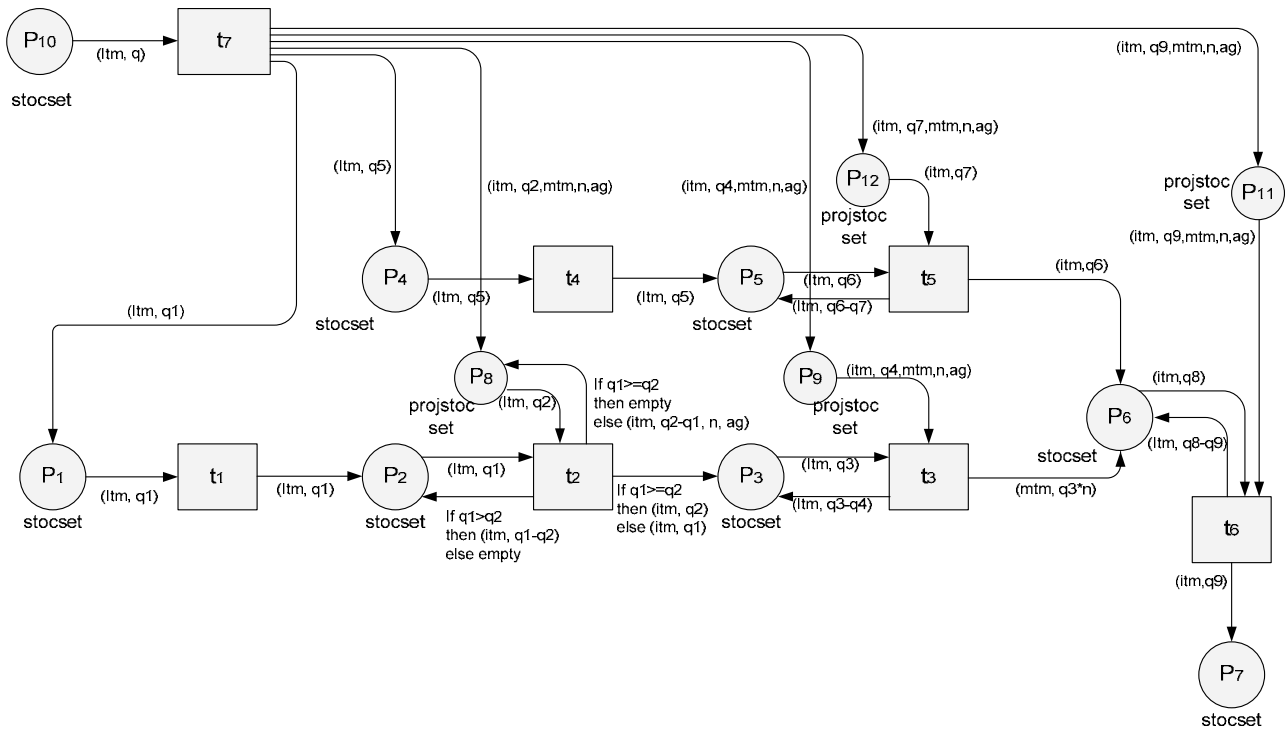


Рис. 3. Структура модели сети Петри

$\Sigma = \{item, quan, mitm, nor, agr, stocset, projstocset\}$  – множество цветных наборов.

$V = \{q:quan, q1:quan, q2:quan, q3:quan, q4:quan, q5:quan, q6:quan, q7:quan, q8:quan, q9:quan, q10:quan, n:nor, itm:item, mtm:mitm, ag:agr\}$  – конечное множество типов переменных.

Функция набора цветов имеет вид:

$$C(p) = \begin{cases} stocset & p \in \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_{10}\} \\ projstocset & p \in \{P_8, P_9, P_{11}, P_{12}\} \end{cases}.$$

Спусковая функция определена как

$$G(t) = \begin{cases} \begin{cases} \text{if } q3 \geq q4 \\ \text{then true} \end{cases} & \text{if } t = t_3 \\ \begin{cases} \text{if } q8 \geq q9 \\ \text{then true} \end{cases} & \text{if } t = t_6 \\ \text{true for } t \notin \{t_3, t_6\} \end{cases}.$$

Функция выражений дуг  $E$  показывает преобразования ресурсов и информации об их потребности. Инициализирующая функция  $I$  задает начальное состояние модели

$$I(p) = \begin{cases} 1'(itm, q) & \text{if } p = p_{10} \\ 0_{MS} & \text{otherwise} \end{cases}.$$

Здесь переменная  $itm$  хранит наименование изделия, которое необходимо изготовить для выполнения заказа, а  $q$  хранит заказанное количество. Ограничительные величины  $d_{\min}$  и  $d_{\max}$  формируются на основе параметров планирования цикла заказа и резервного времени.

Определим структуру вектора стоимости перехода  $X$ :  $l_1$  – основные материалы;  $l_2$  – сдельная зарплата;  $l_3$  – повременная зарплата;  $l_4$  – транспортно-заготовительные расходы;  $l_5$  – отчисления по единому социальному налогу и страхование несчастных случаев;  $l_6$  – общепроизводственные расходы;  $l_7$  – амортизация основных средств. Величина  $\alpha$  определяется на основании статистических данных.

Опишем место и порядок использования модели в процессе планирования материально-технического снабжения стандартизованными ресурсами процесса агрегатной сборки (см. рис. 4).

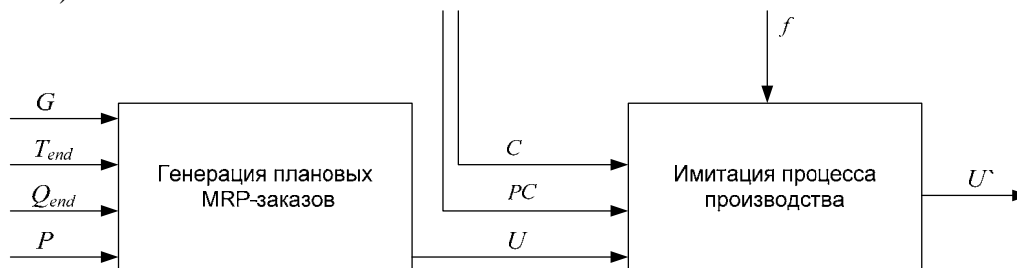


Рис. 4. Использование имитационной модели при планировании производства на основе MRP систем.

Данные о производственном процессе, необходимые для функционирования модели, формируются на основе данных ERP системы предприятия.

### 1. Входные данные для генерации MRP-заказов:

а) Спецификация конечного изделия, материальные нормы и применяемость компонентов. Формируются службой, отвечающей за конструкторско-технологическую проработку изготавливаемого изделия. В представленной модели спецификация изделия формируется как граф  $G = (V, E)$ , где  $V$  – множество вершин, каждая из которых моделирует изделие;  $E$  – множество нагруженных ребер, моделирующих количество вхождений одного изделия в другое (*материальная норма* или применяемость выражается в заранее заданной единице измерения, привязанной каждому из изделий).

б) Плановая дата изготовления. Выражается в качестве константы  $T_{end}$  и задается исходя из плана основного производства на базе даты сдачи готового изделия, заранее согласованной с заказчиком.

в) Размер изготавливаемой партии. Выражается в качестве константы  $Q_{end}$  и задается исходя из плана основного производства, на базе количества готового изделия, которое необходимо изготовить для заказчика.

г) Параметры планирования. Набор параметров, отражающих условия доставки (закупки) материалов или изготовления компонентов, влияющих на плановую потребность в материале или компоненте. Представляются вектором  $P = (p_1, p_2, \dots, p_9)$ , где  $p_1$  – интервал заказа;  $p_2$  – минимальный объем;  $p_2$  – максимальный объем;  $p_3$  – цикл заказа;  $p_4$  – резервное время;  $p_5$  – оптимальный объем;  $p_6$  – фиксированный объем;  $p_7$  – пополнение до максимума;  $p_8$  – объем заказа кратен;  $p_9$  – метод заказа.

2. *Выходные данные MRP-алгоритма:* запланированные заказы на закупку материальных ресурсов (дата заказа, заказываемое количество); запланированные заказы на изготовление компонента (дата запуска в производство, изготавливаемое количество).

Запланированный заказ можно представить в виде кортежа:  $u = (e, q, t)$ , где  $e$  – ресурс;  $q$  – плановая потребность в изделии;  $t$  – дата изготовления. Все заказы можно представить в виде вектора  $U = (u_1, u_2, \dots, u_i)$ , где  $i$  количество компонентов изделий, то есть количество вершин  $v_i$  графа  $G$ .

3. *Входные данные для имитации процесса производства:*

а) Запланированные заказы  $U$ ;

б) Плановая себестоимость компонентов изделия, выраженная в виде вектора  $C = (c_1, c_2, \dots, c_i)$ .

в) Процент простоя  $f$  – величина задается непосредственно перед запуском имитационного алгоритма. Характеризует предполагаемое время простоев, вызванных случайными факторами (поломка оборудования, задержка поставок);

г) Стоимость закупаемых материалов  $PC$ , предварительно согласованная с поставщиком, формируется на основе данных из ERP системы, формируемых службой снабжения. Данную величину можно представить в виде вектора  $PC = (pc_1, pc_2, \dots, pc_i)$ .

4. *Выходные данные имитации процесса производства:*

а) В ходе процесса имитации – состояние процесса производства, отклонение от плановой даты выполнения заказов на закупку или производство  $U'$ .

б) После завершения процесса имитации – дата сборки, стоимость партии собранных агрегатов – готовых изделий.

Таким образом, порядок использования имитационной модели состоит в следующем: на основании входных данных производится генерация плана закупок и производства, в результате чего формируется вектор плановых заказов. Затем на основании вектора заказов и других данных о внешней и внутренней среде предприятия запускается процесс имитации, в ходе которого формируется вектор отклонений плановых дат выполнения заказа от фактических.

Предложенный подход позволяет реализовать процесс имитации движения материальных ресурсов (ранее не реализованный) в соответствии с планом закупок и производства, на основании чего руководители производства получают возможность:

- оценить и спрогнозировать состояние плана производства и закупок;
- оценить прогнозируемый наличный запас ресурса;
- оценить стоимость осуществления производственного процесса в разрезе по компонентам себестоимости конечного продукта;
- сформировать наиболее приемлемый набор параметров планирования;
- обеспечить поддержку принятия решений о закупке или производстве материального ресурса;
- определить «узкие места» системы управления материально-техническими ресурсами;
- обеспечить оперативную обратную связь при осуществлении управленческих решений различного уровня;
- оценить эффект от преобразований в организационно-технической системе материально-технического обеспечения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов, А. В. Системный анализ : учеб. для вузов / А. В. Антонов. – М.: Высш. шк., 2004.
2. Kurt Jensen. Coloured Petri Nets Modelling and Validation of Concurrent Systems / Kurt Jensen, Lars M. Kristensen. – Springer, 2009.
3. Колесников, С. Н. Производственное и функциональное управление: от MRP к ERP и CSR. Стратегии бизнеса: управление ресурсами и запасами / С. Н. Колесников. – М.: Статус-Кво 97, 2000.