Приложение 1

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ *LS12*

Ниже приводится краткая характеристика (без обоснований и детализации) основных информационных объектов и элементов модели управления, реализованных в «*Системе планирования и контроля производства LS12*».

Производство рассматривается как разновидность цепочки поставок, то есть как некоторая сеть из процессов и мест хранения, предназначенная для преобразования входного сырья в выходную готовую продукцию.

Структура производства в самом общем случае представляется в виде двух крупных блоков (заготовительные / обрабатывающие подразделения и сборка), разделённых точкой комплектации, и как минимум трёх логических складов, – сырья и материалов, комплектации и готовой продукции. При этом элементарным объектом операционной среды считается *производственный участок*, то есть обособленная (организационно и/или территориально, физически и/или логически) совокупность производственных ресурсов (рис. П.1.1; здесь ДСЕ это деталь либо сборочная единица). Допускается вложенность и многоуровневая (в том числе древовидная) организация подчинённости подразделений.

Изделие – информационный объект с обязательными атрибутами: уникальный артикул, название, единица измерения, тип, класс, вид управления с указанием необходимых параметров, а для изготавливаемых изделий хотя бы одна маршрутная карта (рис. П1.2.а). *Маршрутная карта* представляет собой упо-

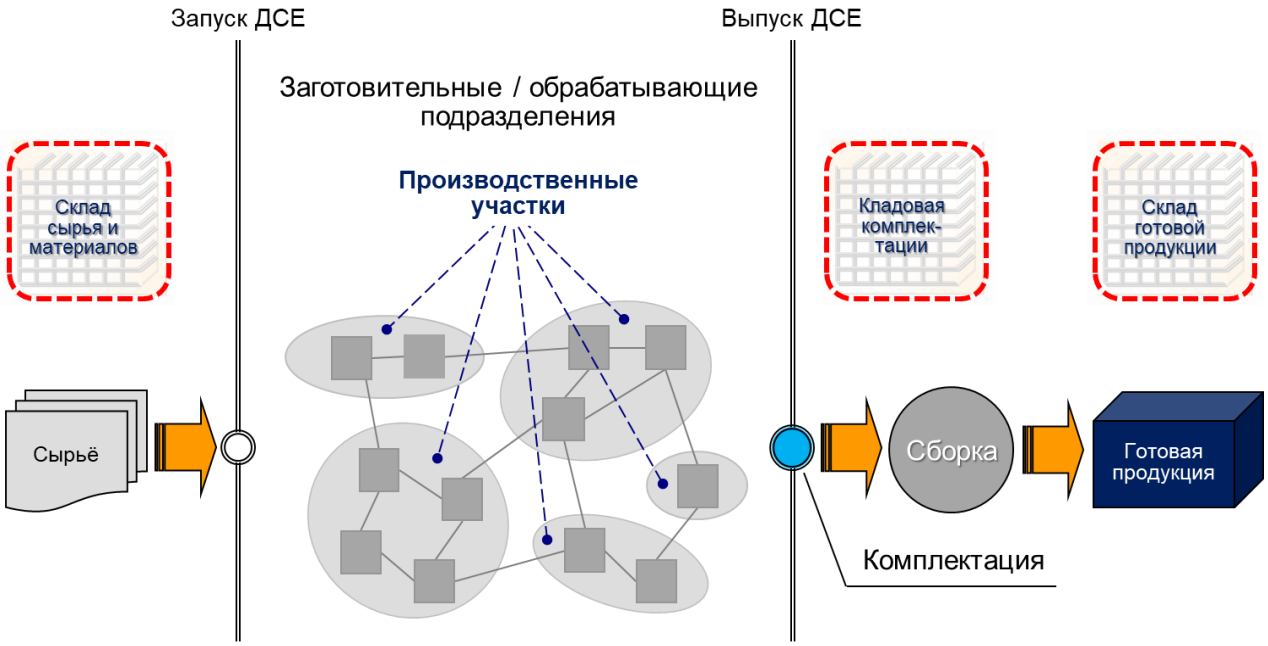

Рис. П1.1. Условная схема базовой структуры производства.

рядоченный список «обобщённых производственных операций» (ОПО), соответствующих отдельным этапам обработки, например, совокупности технологических операций по изготовлению ДСЕ, выполняемых последовательно на одном и том же производственном участке из одного и того же набора применяемых материалов.

Важнейшим атрибутом ОПО является «*готовность*», характеризующая долю конкретного этапа обработки в процессе изготовления изделий по данной маршрутной карте, значение которой может устанавливаться исходя из любых содержательных соображений, в том числе, – но не обязательно, – в соответствии с трудоёмкостью отдельных переделов (суммарная готовность по всем ОПО в

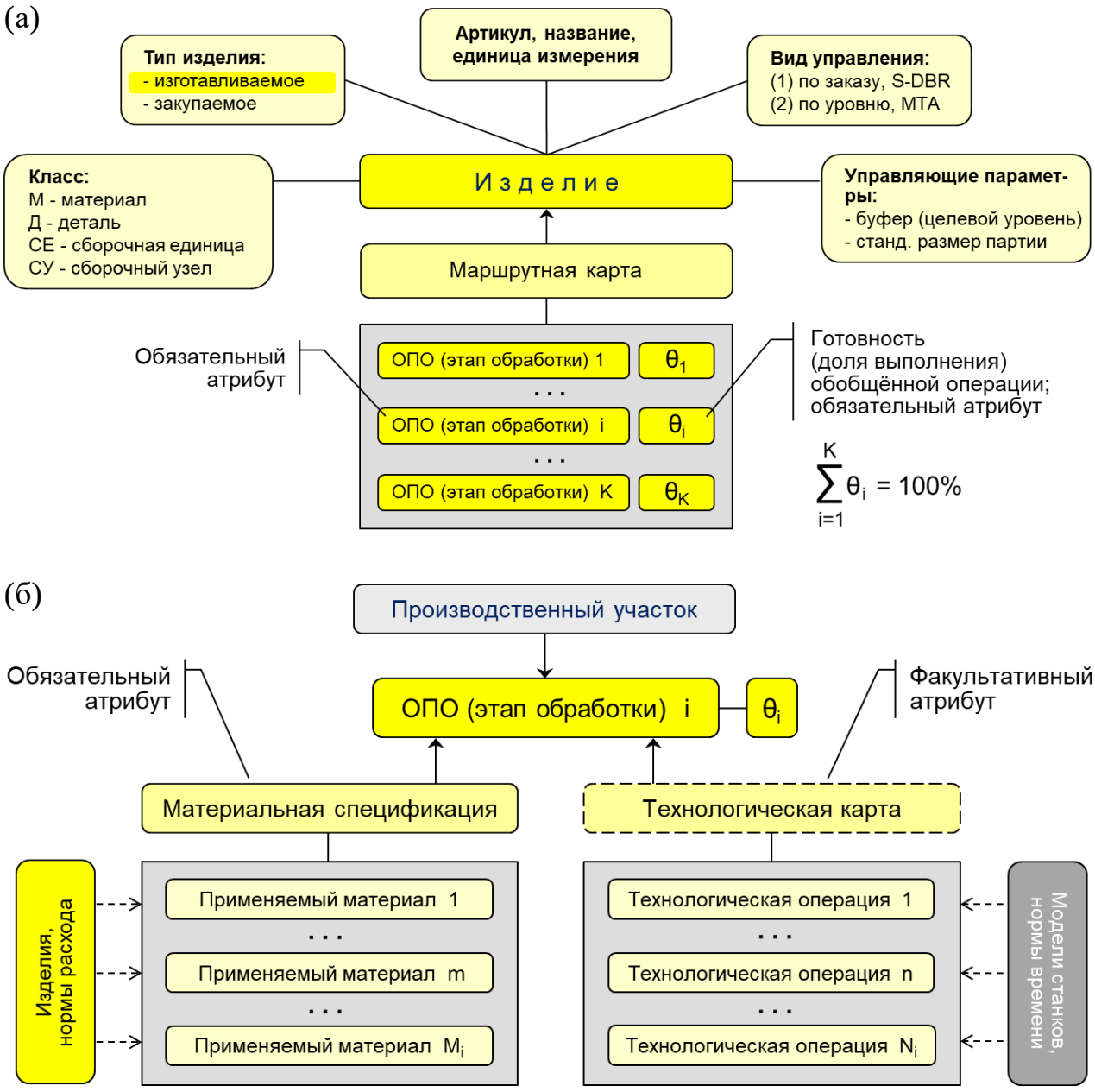

Рис. П1.2. Структура изделия, маршрутной карты (а) и этапа обработки (б).

каждой маршрутной карте составляет 100%). Кроме того, к любому этапу при необходимости может быть привязана материальная спецификация в виде перечня входящих материалов, ДСЕ или сборочных узлов с установленными нормами расхода, а также (факультативно) технологическая карта в виде упорядоченного списка конкретных технологических операций с указанием моделей станков и соответствующих нормативов времени (рис. П1.2.б). Имеется возможность представления производственного маршрута изготовления изделия в виде серии вложенных друг в друга «заводов типа I» (по схеме так называемой *конвейерной сборки*).

Реализованное информационное представление структуры производства и составов изделий позволяет в рамках различных логистических схем моделировать любые типовые стратегии рыночного позиционирования, включая:

- изготовление под заказ (make-to-order),
- изготовление на склад (make-to-stock),
- сборку под заказ (assemble-to-order),
- разработку под заказ (engineer-to-order).

Собственно **модель управления производством** построена на главных логистических принципах *Toyota Production System* и показана на рис. П1.3 в общем случае для «завода типа А» и позаказного позиционирования с комбинированным (под заказ / на склад) контролем питающих потоков. Её основными компонентами являются:

➢ *задающий ритм процесс*, расположенный на сборке (в точке схождения основных материальных потоков) и выполняющий роль стратегического огра-

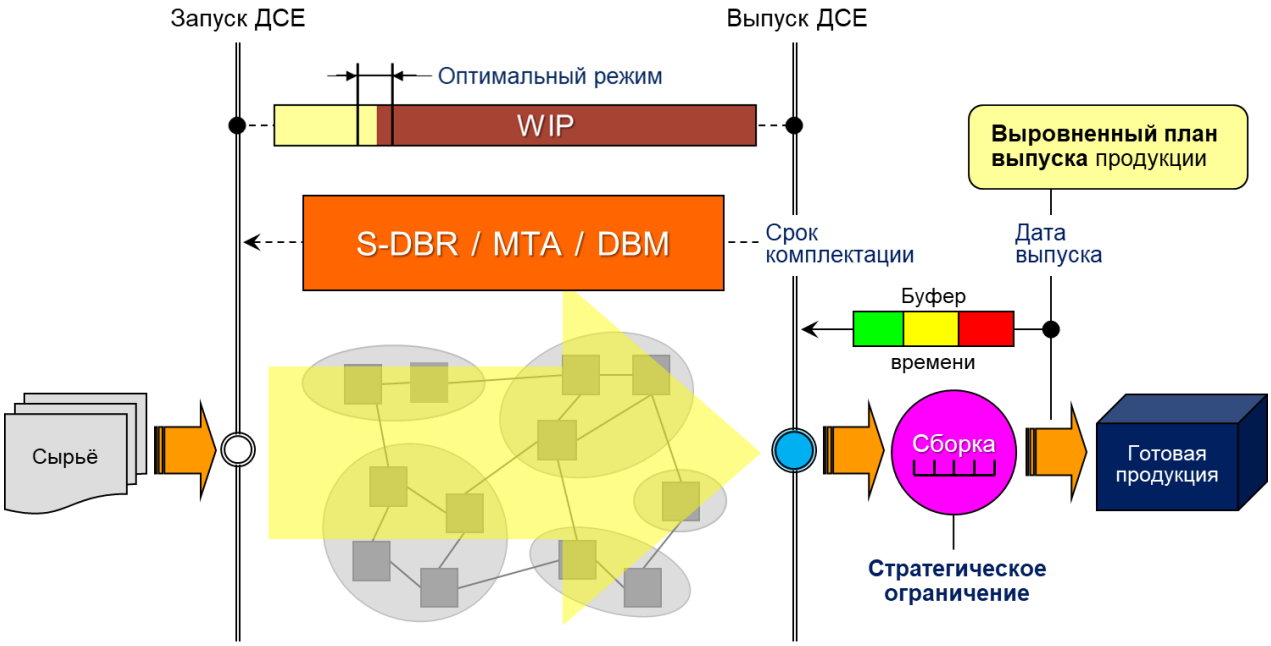

Рис. П1.3. Базовая модель управления производством (завод типа А).

ничения системы, для которого составляется *выровненный план выпуска*, – «вручную» либо на основе решения задачи математической оптимизации, обеспечивающего при равномерной загрузке сборки максимально возможное количество различных видов конечной продукции, планируемых к изготовлению в каждом из интервалов времени (день, неделя, месяц, – аналог большой хейдзунки);

- *вытягивание на сборку* в виде набора методик планирования и диспетчирования материальных потоков изготовления ДСЕ с целью получения комплектующих в заданном количестве к заданным срокам (при управлении «по заказу», *S-DBR / DBM*) либо поддержания соответствующих складских запасов (при управлении «по уровню», *MTA/DBM*);
- *стабилизация потоков* с помощью встроенных механизмов прямого контроля размеров незавершённого производства (*WIP*) и *визуализация процессов* с применением ряда оригинальных графических инструментов в составе «приборной доски» управления системой (см. Приложение 2).

S-DBR (Simplified Drum-Buffer-Rope) – логистическое решение TOC типа «барабан-буфер-верёвка». Схема этого механизма на примере позаказного поступления ДСЕ в кладовую комплектации показана на рис. П1.4. Здесь в результате планирования «назад» от известного срока комплектации или выпуска на величину *буфера времени цикла изготовления* (главного параметра решения) определяются предварительные сроки запуска в производство соответствующих партий изделий. Так, в приведенном модельном примере с тремя разными ДСЕ плановые даты начала изготовления будут установлены за 6, за 9 и за 15 дней до срока комплектации.

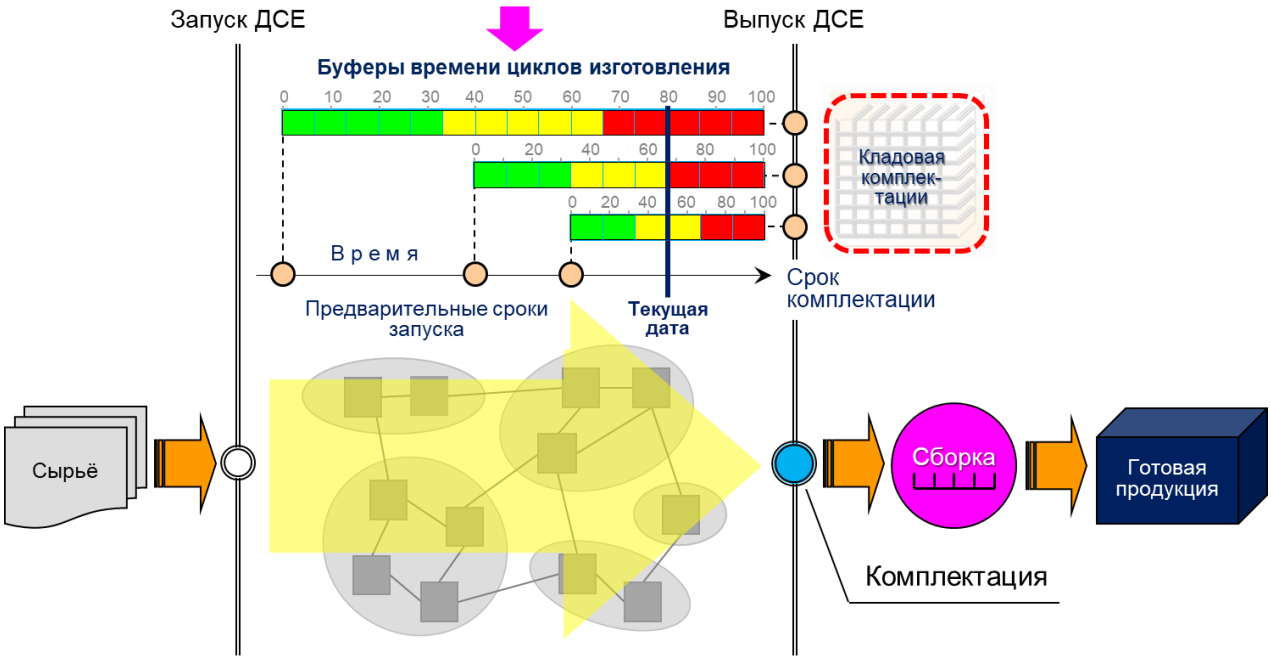

Рис. П1.4. Схема вытягивания ДСЕ на сборку по методике *S-DBR*.

Что касается исходных *сроков выпуска* входящих управляемых «по заказу» деталей, сборочных единиц и узлов, а также сроков поставки закупаемых материалов и комплектующих, то они определяются структурой применяемости. Предположим, что для некоторого головного изделия задан срок выпуска T_1 и буфер времени T, так что плановая дата его запуска равна $(T_1 - T)$. Если маршрутная карта изготовления этого головного изделия содержит K этапов обработки, причём входящее изделие применяется на этапе с номером i, то плановое время начала этапа i и, следовательно, срок завершения производства либо поставки соответствующего закупаемого входящего изделия определяется из соотношения:

$$t_i = (T_1 - T) + \frac{2}{3} \cdot T \cdot \sum_{j=1}^{i-1} \theta_j, \quad i = 1, \ldots, K$$

где коэффициенты θ_i, $i = 1, \ldots, K$, представляют собой установленные значения готовности по этапам обработки.

MTA (Make-To-Availability) – логистическое решение TOC для обеспечения наличия изделий при работе «на склад». Схема этого механизма на примере некоторой ДСЕ в кладовой комплектации показана на рис. П1.5. Здесь анализируется «буфер запасов», представляющий собой сумму имеющихся в наличии изделий и объёма незавершёнки (то есть находящихся на разных стадиях обработки партий их изготовления $P_1, \ldots, P_{M-1}$). В случае, если в какой-то момент времени фактическое значение буфера запасов оказывается ниже установленного для данной ДСЕ *целевого уровня* (главного параметра решения), то формируется потребность на пополнение в размере образовавшегося дефицита. Так, в приведенном модельном примере дефицит составляет 15% от целевого уровня и, следовательно, – в зависимости от заданного вида партионности, – в

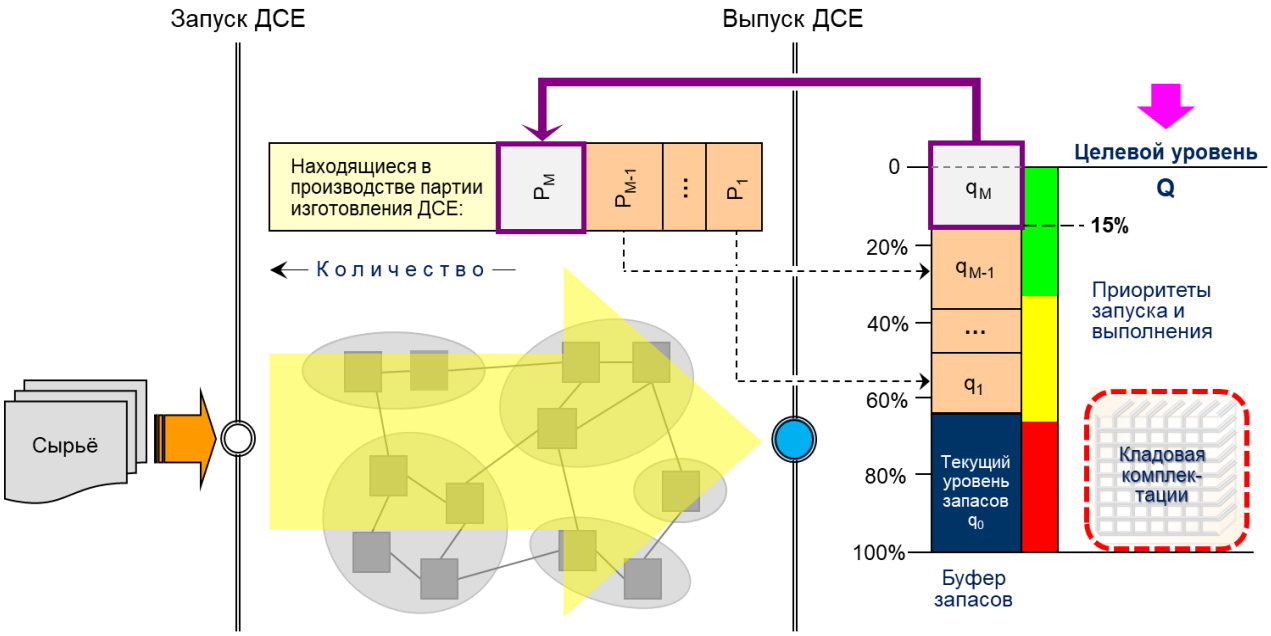

Рис. П1.5. Схема вытягивания ДСЕ на сборку по методике *MTA*.

дополнение к уже имеющимся создаётся ещё одно задание P_M (на всю величину дефицита или, как в примере, с профицитом), либо набор заданий на изготовление данной ДСЕ несколькими партиями стандартного размера. При этом так называемый *статус SKU* определяется как 100% минус доля наличных запасов относительно целевого уровня (в примере 64%).

DBM (Dynamic-Buffer-Management) – набор методов «ручной» либо автоматической корректировки главных параметров логистических решений *S-DBR* и *MTA* по результатам анализа изменений во времени характеристик операционной среды и/или внешнего окружения.

Потребность – информационный объект с обязательными атрибутами: изделие, количество (в единицах измерения изделия), срок реализации и *обеспечение*. Потребности бывают двух видов: исходные (или плановые) и чистые (или текущие). Так, если по заказу нужно поставить клиенту 100 единиц некоторой готовой продукции, и 30 из них уже отгружено в рассматриваемом плановом периоде, то количество по исходной потребности – 100, а по чистой – 70.

Обеспечение – специальный атрибут потребности, совокупность активных ресурсов (запасов, *производственных заданий* или заказов на закупку), сумма размеров которых перекрывает количество по данной потребности. При этом отдельные задания или заказы могут иметь плановые даты выпуска или поставки, превышающие сроки реализации самóй обеспечиваемой потребности.

$\mathbf{r}^i = \{d^i, q^i\}$, d^i – срок реализации, q^i – количество, $i = 1, \ldots, N$; $d^1 \le \ldots \le d^i \le \ldots \le d^N$

$P_m = \{d_m, q_m\}$, d_m – дата выпуска, q_m – размер, $m = 1, \ldots, M$; $d_1 \le \ldots \le d_m \le \ldots \le d_M$

Баланс: $\sum_{m=0}^{M} q^i_m = q^i$, $i = 1, \ldots, N$; $\hat{}q^i = \sum_{\{m:\, d_m > d^i\}} q^i_m$, $i = 1, \ldots, N$; $\tilde{}q_m = q_m - \sum_{i=1}^{N} q^i_m$, $m = 0, \ldots, M$

Чистые потребности по изделию $\mathbf{r}^i$: $i = 1, \ldots, N$		Складской запас по изделию	Производственные задания (заказы на закупку): P_m, $m = 1, \ldots, M$					
			d_1	⋯	d_m	⋯	d_M	Дата
Срок	Кол-во	q_0	q_1	⋯	q_m	⋯	q_M	Размер
d^1	q^1	q^1_0	q^1_1	⋯	q^1_m	⋯	q^1_M	$\hat{}q^1$
…	…	…	…	…	…	…	…	…
d^i	q^i	q^i_0	q^i_1	⋯	q^i_m	⋯	q^i_M	$\hat{}q^i$
…	…	…	…	…	…	…	…	…
d^N	q^N	q^N_0	q^N_1	⋯	q^N_m	⋯	q^N_M	$\hat{}q^N$
	Профицит:	$\tilde{}q_0$	$\tilde{}q_1$	⋯	$\tilde{}q_m$	⋯	$\tilde{}q_M$	Дефицит:

Рис. П1.6. Схема обеспечения потребностей активными ресурсами.

Так, сформированное сегодня задание на партию изделий с буфером времени цикла изготовления T получит плановую дату завершения не раньше, чем через T дней, что предполагает повышенный риск дефицита при обеспечении им более ранних потребностей. Поэтому в рамках рассматриваемой модели управления действует механизм регулярного пересчёта обеспеченности, формальное описание которого представлено на рис. П1.6, а суть состоит в том, что потребности с более ранними сроками реализации должны удовлетворяться активными ресурсами с более ранними датами выпуска или поставки. При этом любая потребность может обеспечиваться несколькими заданиями или заказами на закупку, а текущая структура обеспеченности, – по мере изменения состояния производства и условий внешнего окружения, – подвержена динамическим корректировкам.

Производственное задание (ПЗ) – особый объект для описания сквозного процесса изготовления партии деталей, сборочных единиц или узлов от запуска до выпуска с основными атрибутами, указанными на рис. П1.7. Отсутствие подобного объекта в информационной модели (как, например, в 1С) существенно ограничивает возможности организации процессного управления.

Первоначально производственные задания создаются автоматически в ходе планирования, синхронизации и обеспечения активными ресурсами потребностей всех уровней, причём по умолчанию принимаются параметры составов изделий из исходных маршрутных карт. Однако в дальнейшем, – с учётом текущего состояния и потребностей производства, – отдельные реквизиты ПЗ

Рис. П1.7. Структура информационного объекта «производственное задание».

могут быть скорректированы средствами диспетчирования, включая замену этапов обработки, применяемых материалов и технологических операций из альтернативных маршрутных карт. При этом одно и то же незавершённое ПЗ в разные моменты времени может обеспечивать одну или несколько потребностей, а может не обеспечивать ни одной (см. Приложение 2).

Производственный план – информационный объект в виде объединения плановых потребностей (то есть чистых потребностей на момент утверждения данного плана). В рамках рассматриваемой модели управления для позаказного позиционирования в общем случае используется следующий иерархический набор из пяти связанных между собой составляющих:

- *План продаж* (отгрузки готовой продукции, *SOP*, Sales & Operations Plan), – в виде списка позиций внешних заказов, скорректированного по факту уже выполненных поставок.
- *Главный план производства* (выпуска конечных изделий, *MPS*, Master Production Schedule), получаемый из *SOP* после учёта текущего состояния склада готовой продукции, – с возможностью разбиения по количеству и срокам на отдельные позиции при помощи встроенных инструментов ручного и автоматического «выравнивания» выпуска.
- *План выпуска сборочных узлов* (график работы сборки, *ARS*, Assembly Release Schedule), – по позициям *MPS* с учётом всех входящих сборочных узлов и текущего состояния незавершённого производства в сборочных подразделениях.
- *План выпуска ДСЕ* (график работы основного производства, *PRS*, Parts Release Schedule), – по потребностям *ARS*, скорректированным на величину запасов в кладовых комплектации и с учётом текущего состояния незавершённого производства в заготовительных и обрабатывающих подразделениях.
- *План поставки материалов* (*MRP*, Material Requirements Plan), – по потребностям *ARS* и *PRS* с учётом текущего состояния склада материалов и уже сделанных ранее заказов на закупку.

Рис. П1.8 на примере одной исходной потребности в виде позиции внешнего заказа иллюстрирует работу процедуры формирования и календарной синхронизации потребностей остальных уровней, для обеспечения которых по всему составу и структуре входимости конечного изделия, – сверху вниз, – анализируются и резервируются имеющиеся в наличии свободные складские запасы и незавершённые производственные задания. При этом по расчётным «чистым» потребностям в дополнительном запуске изготавливаемых входящих автоматически создаются новые обеспечивающие задания, а для закупаемых изделий формируются заказы на их поставку к заданным срокам.

Заметим, что для изделий (материалов, деталей, сборочных единиц или узлов) с видом управления «по уровню» изначально предполагается, что заранее не известно, – когда, в каком количестве и под какие конкретные задания либо заказы они будут использованы. Потребности их поставки или производства определяются не сроками, а общей динамикой спроса, так что фактически эти изделия изготавливаются либо закупаются независимо друг от друга. Поэтому предварительное составление планов запуска и выпуска для них лишено смысла, как и синхронизация потребностей разных уровней, а наличие соответствующих складских запасов поддерживается описанными ранее инструментами методики *MTA/DBM* (см. также примеры в основном тексте).

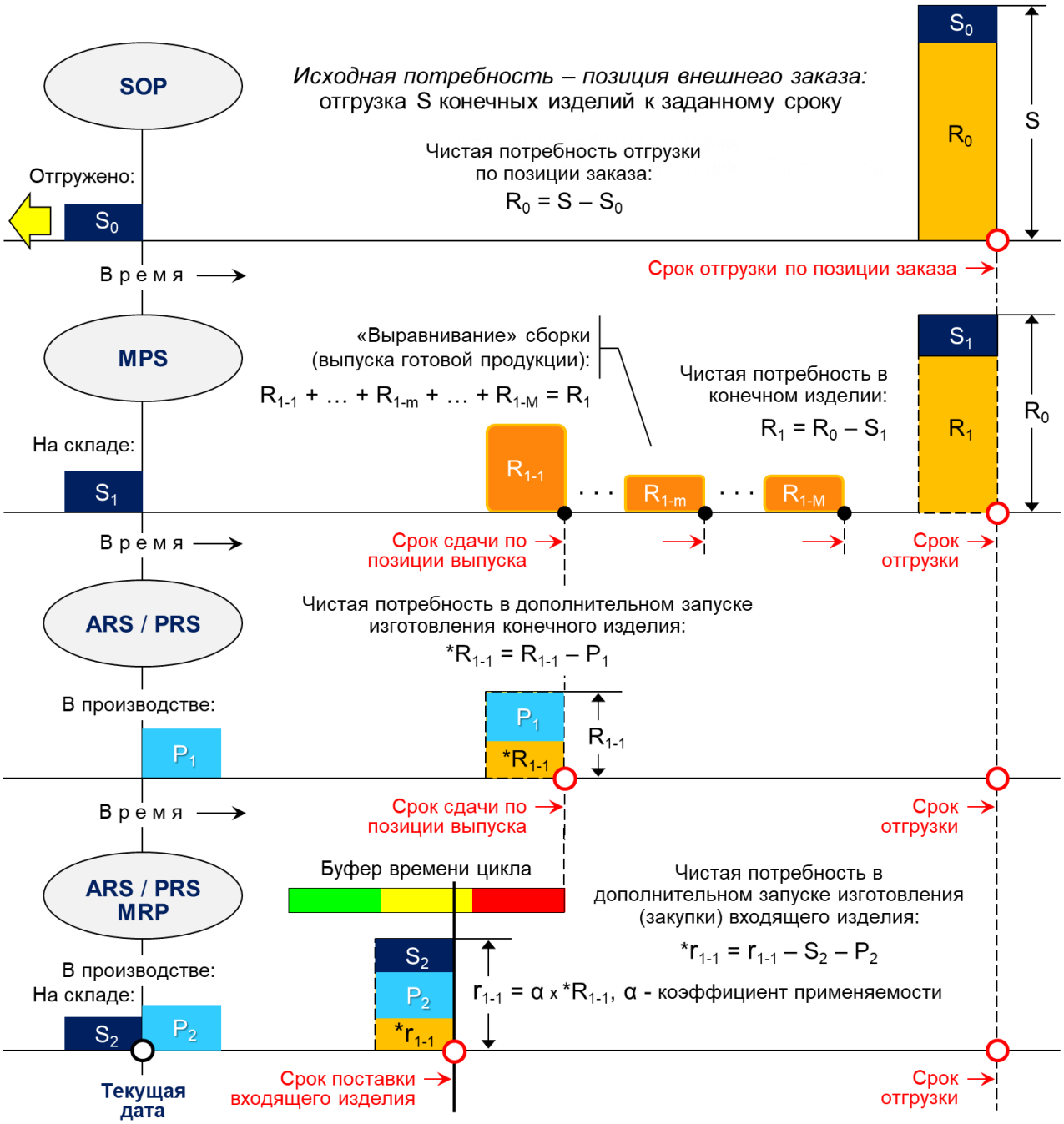

Рис. П1.8. Схема формирования производственных планов.

Приоритет – одна из двух ключевых характеристик текущего состояния ПЗ, показатель срочности выполнения данного производственного задания относительно обеспечиваемой им потребности (число в диапазоне от 0 до 100%). В модельном примере по методике *S-DBR* на рис. П1.4 с тремя партиями изделий, начатыми за 6, 9 и 15 дней до предполагаемой даты выпуска, приоритеты соответствующих заданий на текущую дату (за три дня до единого срока комплектации) определяются степенями «пробоя» буферов времени и составляют 3/6 = 50%, 6/9 ≈ 67% и 12/15 = 80%. Согласно принятым в TOC стандартным правилам цветовой индикации первое задание находится в жёлтой зоне, второе – на границе жёлтой и красной зон, а третье уже пробило границу своей красной зоны. В общем случае в рамках рассматриваемой модели для изделий с позаказным видом управления значение приоритета задания P рассчитывается по следующему правилу:

$$pr<P>(S\text{-}DBR) = \begin{cases} 0, \text{ если } D^*+T < D \\ \left(1 - \dfrac{D-D^*}{T}\right) \times 100\%, \text{ если } D^* \le D \le D^*+T \\ 100\%, \text{ если } D < D^* \end{cases}$$

где T – величина буфера времени цикла изготовления изделия, D – срок реализации обеспечиваемой потребности, D* – текущий момент времени.

На рис. П1.9 показан пример ПЗ на изготовление партии из 10 штук некоторых изделий, начатого 7-го числа с плановым сроком завершения 21-го (время цикла 15 дней). На текущую дату (в конце дня 13-го числа) оказалось, что сейчас это задание обеспечивает три потребности с разными сроками реализации (17-го, 24-го и 31-го). Тогда в соответствии с приведенным правилом его приоритет относительно самой ранней из потребностей составляет 80% (красная зона), средней ~33% (на границе жёлтой и красной зон), а самой поздней – 0%. Абсолютный приоритет ПЗ определяется максимальным из относительных по всем обеспечиваемым потребностям и в данном случае равен 80%.

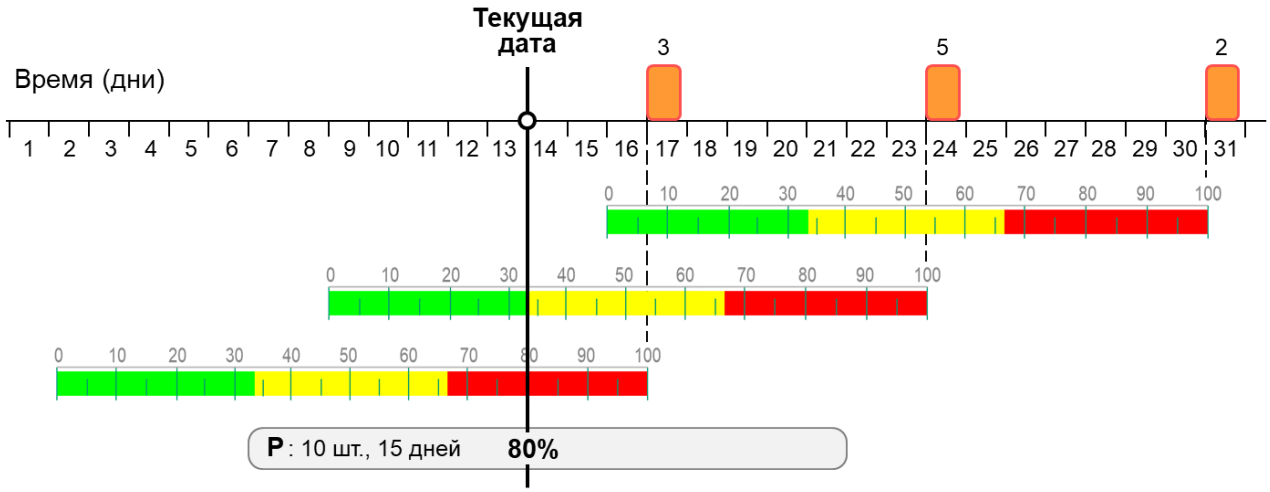

Рис. П1.9. Иллюстрация к расчёту приоритетов производственного задания.

Для изделий с видом управления «по уровню» в рамках методики *MTA* (см. рис. П1.5) абсолютный приоритет производственного задания определяется по формуле:

$$pr\,\langle P\rangle\,(MTA) = \left(1 - \sum_{i=0}^{m-1} q_i / Q\right) \times 100\%$$

либо принимается равным нулю при отрицательном расчётном значении, где Q – целевой уровень, q_0 – текущий уровень запасов, q_i – размер обеспечивающего задания P_i, i = 1, …, M. Фактически это доля целевого уровня за вычетом вклада текущих запасов и всех ранее созданных заданий. Так, в модельном примере на рис. П1.5 первое из находящихся в производстве заданий P_1 имеет приоритет 64% (совпадающий со статусом данной SKU), а вновь сформированное задание P_M – 15%. При стандартных правилах цветовой индикации P_1 приближается к границе красной зоны, а P_M располагается в зелёной зоне.

Готовность – вторая ключевая характеристика текущего состояния ПЗ, показатель степени его выполнения (число в диапазоне от 0 до 100%). В рамках рассматриваемой модели управления предполагается организация мониторинга движения материальных потоков в ключевых точках, а именно, начала и завершения заданий, а также прохождения промежуточных постов контроля по маршрутам изготовления партий ДСЕ или сборочных узлов, например, – как представлено на рис. П1.10, – с применением сопроводительных документов типа «маршрутного листа». Действует правило: «пока заказчик (то есть последующий этап) не подтвердил получение, задание числится за поставщиком (то есть предыдущим по маршруту этапом обработки)». При таком подходе готовность производственного задания определяется суммой готовностей по всем уже завершённым этапам обработки.

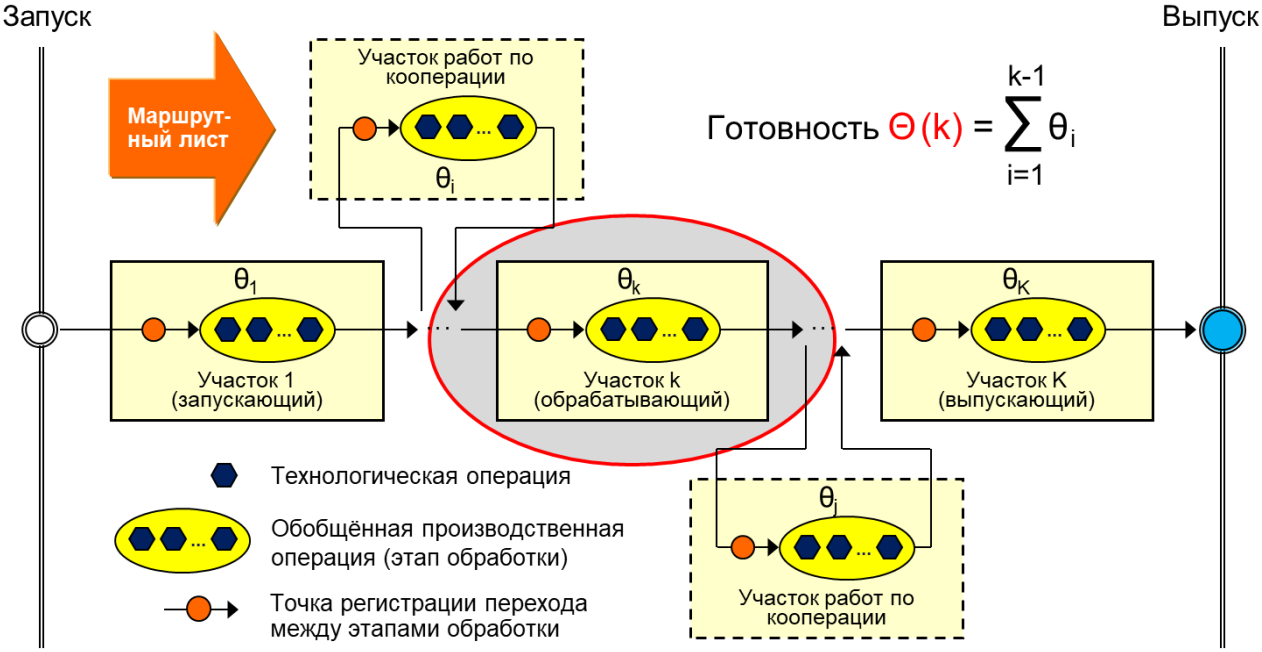

Рис. П1.10. Схема учёта готовности заданий по маршрутам обработки.