

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 658.5.011 + 658.512.8

DOI: 10.22213/2410-9304-2017-1-52-59

А. В. Вожаков, кандидат технических наук

ПАО «Мотовилихинские заводы»

М. Б. Гитман, доктор физико-математических наук, профессор

В. Ю. Столбов, доктор технических наук, профессор

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

### ЗАДАЧА СИНХРОНИЗАЦИИ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В МЕЛКОСЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Рассматривается математическая задача синхронизации материальных потоков в мелкосерийном производстве, приводится постановка задачи, критерии оптимизации и демонстрационный пример. Предлагается использовать лучшие практики подходов Lean и QRM в применении к мелкосерийному производству с учетом специфики. Рассматривается подход к оптимизации работы производства путем создания модуля синхронизации материальных потоков в соответствии с математической постановкой задачи синхронизации производства. В качестве критериев используются критерий максимизации приоритетов текущих заказов и критерий приоритезации работ с минимальным планируемым временем начала работ. Рассмотрен тестовый пример, наглядно демонстрирующий принцип работы синхронизированной системы управления производством в условиях постоянно меняющихся условий производства. Для демонстрации работы системы выбрано виртуальное производство, состоящее из пяти производственных участков. Использование синхронизированной системы управления производством позволило получить прибыль от выполнения заказов на 30 % выше, чем без применения. Если оценить уровень незавершенного производства, и время, и количество замороженных средств, то станет очевидно, что применение синхронизированной системы управления позволяет со временем снизить и другие прямые и косвенные затраты, что еще более позитивно отразится на чистой прибыли предприятия.*

*Модуль синхронизации производства рассматривается как дополнительный модуль ERP-системы, встраиваемый в уже существующую ERP.*

**Ключевые слова:** материальный поток, оптимизация, система изготовления деталей по потребностям выпуска, мелкосерийное производство, подходы Lean и QRM, система ERP.

#### Введение

Текущий уровень развития технологий диктует новые правила работы производства – пришло время максимальной кастомизации товаров под потребности потребителя, что требует от производителей товаров снижать размер партии заказов, постоянно быть готовыми производить новые виды продукта, производить продукцию по индивидуальным заказам. Вкупе с изменчивостью спроса на рынке это ставит перед руководством предприятия сложные задачи, которые тем сложнее, чем сложнее процесс производства продукта, чем больше деталей входит в его состав, чем длиннее технологические цепочки на предприятии. За последние годы получили свое развитие автоматизированные системы управления производством (ERP/MES) [1–3], практики построения и оптимизации производственных процессов (Lean, TOC, QRM) [4–6], однако в полной мере данные практики работают лишь для массовых поточных производств [7, 8] и часто неприменимы для мелкосерийных позаказных производств сложной наукоемкой продукции. При этом эффективность данных производств остается низкой, в системе крайне много потерь, остаются длительные циклы производства продукции и высокий уровень запасов на всех этапах производства.

#### Предпосылки создания синхронизированной системы

В статье [9] дается последовательное обоснование того, что ERP-система является выталакивающей системой управления, что означает организацию

движения материальных потоков через производственную систему, при которой материальные ресурсы подаются с предыдущей операции на последующую в соответствии с заранее сформированным жестким графиком поставок. Материальные ресурсы «выталакиваются» с одного звена производственной логистической системы на другое. Каждой операции общим расписанием устанавливается время, к которому она должна быть завершена. Полученный продукт «проталкивается» дальше и становится запасом незавершенного производства на входе следующей операции. Однажды рассчитанный план является обязательным для исполнения производством, если на этапе сборки изделий возникнет серьезная проблема, не позволяющая длительное время производить определенный вид продукции, ERP-система не остановит заготовительное производство по данному заказу, что далее приведет к производству невостребованных деталей незавершенного производства, загрузке мощностей невостребованной продукцией и т. д. Пересчет графика производства продукции происходит достаточно редко (занимает длительное время, требуется подведение итогов, организационные проблемы), что не позволяет с помощью пересчета добиться постоянно актуального плана производства. На практике постоянные отклонения, возникающие в производстве, приводят производство под управлением ERP-системы в состояние, при котором уровень незавершенного производства постоянно увеличивается, срывы сроков становятся все более частыми, при этом оборудование постоянно простаивает

ввиду отсутствия нужных деталей для обработки. Элементы системы (производственные подразделения) живут своей жизнью (выполняют рассчитанный план) без учета отклонений, возникающих в других элементах системы.

В противовес выталкивающей системе приводится понятие «вытягивающей» логистической системы, т. е. такой организации движения материальных потоков, при которой материальные ресурсы подаются («вытягиваются») на следующую технологическую операцию с предыдущей по мере *необходимости*, а поэтому жесткий график движения материальных потоков отсутствует. Существует и более простое определение, система вытягивания – это система управления производством, объем запасов в которой определенным образом ограничен [10].

В литературе по бережливому производству описаны следующие виды вытягивающего производства [11], которые хорошо себя зарекомендовали в крупносерийном производстве:

- Восполнение супермаркета.
- Лимитированные очереди ФИФО.
- Барабан – буфер – веревка.
- Лимит НЗП.

В быстрореагирующем производстве [12] предлагается система контроля POLCA (накладывающиеся друг на друга циклы взаимодействия попарно соединенных ячеек при помощи карточек и авторизации, *paired-cell overlapping loops of cards with authorization*), разработанная для применения на мелкосерийных производствах, организованных по принципам QRM, которая, с одной стороны, использует план, рассчитанный в ERP-системе для определения объема работ, и циркулирующие карточки пар ячеек, находящихся в единой цепочке работ. Задача карточек аналогична супермаркету, но адаптированному для мелкосерийного производства – если производственное подразделение (цех, ячейка, рабочий центр) не имеет карточки от потребителя – оно не может выполнять работы, а когда есть карточка – подразделение выполняет план из ERP-системы.

Описанные выше методы реализуются в производстве либо без использования автоматизированной системы, либо используя ее как источник информации о следующих работах. Описанные способы организации вытягивающего производства являются частными случаями организации производства (крупносерийное производство или цепочку производственных ячеек). Необходима постановка и решение задачи построения и автоматизации вытягивающего производства для общего случая организации производства, без накладывания дополнительных ограничений на объект применения системы.

#### Концептуальная постановка задачи

В качестве объекта исследования рассмотрим мелкосерийное дискретное универсальное производство с широким спектром высокономенклатурной разнообразной продукции.

Производство организовано в нескольких цехах  $n \in \overline{1, N}$ , где  $N$  – общее количество цехов, которые, в свою очередь, разделены на производственные участки  $k \in \overline{1, K}$ , где  $K$  – количество участков во всех цехах, на которых сосредоточено определенное количество технологического оборудования, объединенного либо по типу выполняемых технологических операций, либо по принципу формирования ячейки QRM. При этом для обеспечения управляемости размер участков не слишком велик в масштабах производства. Введем принадлежность участка цеху с помощью  $n_k, k \in \overline{1, K}$  – номер цеха, в котором находится участок.

На рис. 1 представлен пример организации производства и деления на участки, а также стрелками обозначены основные направления движения материального потока, образующие технологические цепочки на производстве. Анализ технологических цепочек крайне важен для построения эффективного процесса производства и для синхронизации производства, в частности.

Считается, что на предприятии внедрена автоматизированная система управления предприятием, построенная на стандартной для MRP II модели данных:

- Заданы ресурсные спецификации на изделия и полуфабрикаты.
- Заданы технологические маршруты изготовления, содержащие как минимум маршрут обработки деталей и сборок по участкам и расширяемые перечнем технологических операций с указанием трудоемкости и используемого оборудования.
- Введены календарные нормативы длительности маршрутных переходов.
- Сформирован главный календарный план производства, определяющий потребность в выпуске продукции по датам потребности, разделенный по заказам клиента и по партиям выпуска продукции внутри заказа.

Производство деталей и сборок осуществляется партиями, размер которых определяется в ERP-системе, партии пронумерованы индексом  $p, p \in \overline{1, P}$ .

Для каждой партии известен маршрут обработки. Известно количество маршрутных переходов для каждой партии –  $m_p$ , для каждого маршрутного перехода определен номер участка исполнителя  $M_{mp}, m \in \overline{1, m_p}, p \in \overline{1, P}$ .

Партии деталей движутся в производстве строго по маршруту, передача партии деталей с участка на участок осуществляется дискретно.

В каждый момент времени известно текущее состояние незавершенного производства. Для каждой партии деталей определен текущий маршрутный переход  $C_p \in \overline{0, m_p}$ , где значение 0 соответствует состоянию завершения обработки партии деталей.

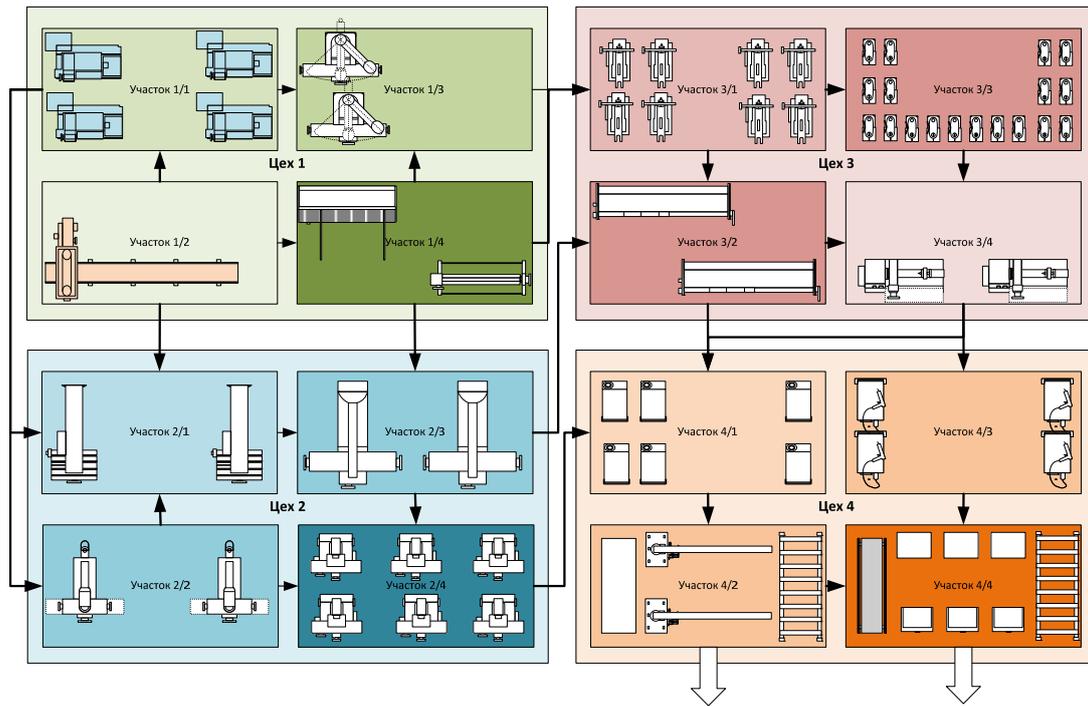


Рис. 1. Пример организации производства и деления на участки

Партия деталей переходит на следующий этап обработки сразу же после завершения обработки на предыдущем этапе, после завершения выполнения последнего этапа текущее состояние автоматически переходит в состояние 0, при этом значение текущего перехода изменится согласно формуле

$$C_p^* = \begin{cases} M_{C_p+1}, & C_p < m_p, \\ 0, & C_p = m_p. \end{cases} \quad (1)$$

Для текущего состояния незавершенного производства определены дополнительные дискретные состояния  $S_p \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ , где 0 – партия находится в стадии транспортировки или комплектования; 1 – партия находится на участке, обеспечена ресурсами и готова к обработке; 2 – партия определена к выполнению; 3 – начата обработка партии; 4 – завершена обработка партии на участке.

Следует отметить, что перевод статуса партии в следующее состояние является необратимым, перевод партии в предыдущее состояние невозможен.

Для более детального учета в ERP-системе могут быть выделены дополнительные статусы текущего состояния, такие как: ожидание поступления, ожидание начала обработки, начата обработка и т. д.

Для каждой партии определен приоритет заказа, содержащий агрегированную информацию о важности заказа клиента, прибыльности, стоимости и прочих параметрах заказа, влияющих на важность заказа для предприятия  $w_p \in [0, 1]$ , где единице соответствуют максимальные значения важности заказа.

Рассчитан календарный план производства, определяющий для каждого пункта маршрута обработки каждой партии деталей плановые даты начала обра-

ботки  $DP_{mp}$ , плановую длительность обработки  $DL_{mp}$  и фактическую дату начала  $DF_{mp}$  обработки партий деталей на участках, где  $m \in \overline{1, m_p}$ ,  $p \in \overline{1, P}$ .

Для каждой партии сборочных единиц определены партии деталей, которые войдут в сборку и которые должны быть завершены для успешного начала сборки. Номера партий, идущих в сборку, определены в массиве:  $L_{pl} \in \overline{1, P}$ , где  $p \in \overline{1, P}$ ,  $l \in \overline{1, l_p}$  – количество предшествующих партий деталей. При этом должно выполняться ограничение (2), делающее невозможным перевод состояния работы в состояние готовности к выполнению ( $S_p = 1$ ) на первом переходе ( $C_p = 1$ ) сборки в том случае, если множество незавершенных ( $C_{L_{pl}} > 0$ ) предшественников не является пустым:

$$\{L_{pl} | C_{L_{pl}} > 0, l \in \overline{1, l_p}\} \neq \emptyset \Rightarrow C_p = 1 \wedge S_p = 0, p \in \overline{1, P}. \quad (2)$$

В соответствии с требованиями подхода «just in time» участок  $k$  может и должен выполнять работы плана производства ( $\bar{F}$ ), которые достигли даты начала и находятся в состоянии готовности к выполнению ( $S_p = 1$ ), при этом в статус  $k$  выполнения ( $S_p = 2$ ) переводятся все работы, для которых выполняются условия:

$$\bar{F} = \{p | t \geq DP_{C_p, p} \wedge S_p = 1\}. \quad (3)$$

Однако практика управления производством показывает, что слепое следование рассчитанному в ERP-системе плану производства вследствие неиз-

бежно возникающих отклонений приводит к рассинхронизации деятельности участков.

Введем понятие карточки синхронизации, предназначенной для синхронизации деятельности участков с целью минимизации производства невостребованной продукции, излишних запасов, повышения оперативности реагирования производства и снижения производственных циклов. Суть понятия аналогична карточкам POLCA, используемым в QRM [13], но логика работы будет отличаться, что требует выделения отдельного определения. Карточка синхронизации имеет два обязательных атрибута – участок-отправитель и участок-получатель. Каждый участок (получатель) выдает минимум по одной карточке каждому участку, который по технологическим цепочкам является поставщиком деталей (сборок) на участок. Количество карточек получателя для поставщика может быть увеличено, если материальный поток между участками особенно интенсивен.

Количество доступных для использования карточек синхронизации определим в массиве  $K_{k_1 k_2}$ , где  $k_1$  – участок-получатель, а  $k_2$  – участок-поставщик.

Количество используемых поставщиком  $k_2$  карточек участка  $k_1$  определяется путем подсчета количества партий деталей, находящихся в цехе  $k_1$ , предыдущим участком обработки которых является  $k_2$ . При этом в каждый момент времени, количество карточек, используемых в данный момент  $K_{k_1 k_2}^*$ , не должно превышать количество доступных карточек синхронизации:

$$K_{k_1 k_2}^* = \sum_{p=1}^p q(p, k_1, k_2) \leq K_{k_1 k_2},$$

где

$$q(p, k_1, k_2) = \begin{cases} 1, & M_{C_p p} = k_2 \wedge M_{C_{p+1} p} = k_1 \wedge S_p \in [2, 3], \\ 0, & M_{C_p p} \neq k_2 \vee M_{C_{p+1} p} \neq k_1 \wedge S_p \in [0, 1, 4]. \end{cases} \quad (4)$$

Если некоторая работа  $p$  выполняется ( $S_p \in [2, 3]$ ) на участке  $k_2$  ( $M_{C_p p} = k_2$ ) с последующей передачей на участок  $k_1$  ( $M_{C_{p+1} p} = k_1$ ), то считается, что используется одна карточка синхронизации  $k_1 k_2$ .

Требуется разработать систему синхронизации производства, которая основываясь на информации, находящейся в ERP-системе в режиме реального времени определяет и передает к выполнению ( $S_p = 2$ )

оптимальный набор партий  $\overline{FA}$ , выполнение которых наиболее целесообразно в текущий момент  $t$  с учетом принципов вытягивания, ограничения на незавершенное производство и приоритетности заказов.

Другими словами, требуется определить и перевести к выполнению такие партии  $p^* \in \overline{FA}$ , для которых выполняются следующие условия:

$$p^* \in \overline{F} = \left\{ p \mid t \geq DP_{C_p p} \wedge S_p = 1 \right\}, \quad (5)$$

$$\sum_{p^* \in \overline{FA}} \omega(p^*, k_1, k_2) + K_{k_1 k_2}^* \leq K_{k_1 k_2}, \quad (6)$$

$$J_1 = \sum_{p^* \in \overline{FA}} \omega \rightarrow \max, \quad (7)$$

$$J_2 = \sum_{p^* \in \overline{FA}} DP_{C_p p} \rightarrow \min. \quad (8)$$

Приведенная выше постановка задачи является двухкритериальной задачей оптимизации с двумя независимыми критериями. Для того чтобы задача была разрешимой, требуется ввести обобщенный критерий оптимальности плана. При этом на практике обычно один из критериев выбирают как «главный», то есть имеющий наивысшую важность. Однако все эксперты сходятся во мнении, что про другие критерии также нельзя забывать – все они имеют важность. Однако соотношение важности этих критериев весьма нечетко. Для решения данной задачи может быть использован обобщенный критерий оптимальности с использованием расширенного специального нечеткого множества над частными критериями оптимальности [14, 15].

На основе предложенных частных критериев может быть введен обобщенный критерий оптимальности с использованием расширенного специального нечеткого множества над частными критериями оптимальности:

$$J^r = \left\{ \frac{\mu_1}{J_1}, \frac{\mu_2}{J_2} \right\},$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – важности частных критериев  $J_1$  и  $J_2$  соответственно. Отметим, что  $\mu_i \in [0, 1]$ ,  $i = 1, 2$ ;  $r$  – номер рассматриваемого варианта производственного плана. Для определенности будем считать, что оба частных критерия оптимальности необходимо минимизировать. В данном случае для этого достаточно в критерий (7) поменять знак на « $\leftarrow$ ».

Теперь, используя четкую функцию от нечеткого аргумента (специальный индекс ранжирования), сравнение вариантов производственного плана  $r_1$  и  $r_2$  по обобщенному критерию  $J^r$  можно осуществить по формуле:

$$H(J^{r_1}, J^{r_2}) = \text{sign} R_i, \quad (9)$$

$$\text{где } R_i = \frac{\mu_i^{r_1} \cdot J_i^{r_1} - \mu_i^{r_2} \cdot J_i^{r_2}}{\max(J_i^{r_1}, J_i^{r_2})}.$$

Из всех значений  $R_i$  выбирается максимальное значение по модулю, знак которого определяет индекс ранжирования (9).

Теперь, если значение  $H(J^{r_1}, J^{r_2}) = +$ , то  $J^{r_1} > J^{r_2}$ , в противном случае  $J^{r_1} < J^{r_2}$ .

Таким образом, поставленную выше двухкритериальную задачу дискретной оптимизации можно свести к следующей однокритериальной задаче с обобщенным нечетким критерием оптимальности:

найти такие оптимальные партии  $p^* \in \overline{FA}$ , при которых достигается минимум обобщенного критерия

$$J^r \rightarrow \min \quad (10)$$

и выполняются ограничения (5) и (6).

Для решения задачи (10) с использованием индекса ранжирования (9) могут быть использованы различные численные методы дискретной оптимизации. Однако на практике более удобным бывает переход от задачи оптимизации к задаче выбора на заданном множестве возможных альтернатив. В рассмотренном случае количество допустимых производственных планов, удовлетворяющих ограничениям (5) и (6), бывает невелико, что позволяет осуществить такой переход и проводить выбор наилучшего плана напрямую с помощью индекса (9).

**Пример работы синхронизированной системы**

Рассмотрим простой пример, наглядно демонстрирующий принцип работы синхронизированной системы управления производством в условиях постоянно меняющихся условий производства.

Пусть производство состоит из пяти производственных участков. На рассматриваемый момент необходимо выполнить два заказа с одинаковым приоритетом на два типа изделий (изделие А и изделие В) по 5 единиц каждого типа.

Оба заказа должны быть отгружены на 10-й неделе, а за срыв срока отгрузки предусмотрены пени в размере 3 % от стоимости контракта за каждую неделю задержки. Для наглядности допустим, что стоимость изделий А и В одинакова. Также допустим, что плановая прибыльность заказов составляет 20 % от стоимости изделий.

Планы производства были рассчитаны в ERP-системе, но поступление материалов произошло с опозданием, что привело к позднему запуску производства.

Изделие А обрабатывается на участках 1, 3, 4. Изделие В обрабатывается на участках 2, 3, 5. Время

обработки на каждом участке одинаково и составляет одну неделю. На каждом участке в один момент времени может обрабатываться только одно изделие. На начальном этапе незавершенное производство отсутствует.

Для начала рассмотрим стандартную работу производства с заранее известным планом производства. На рис. 2 представлена работа производства в течение первых трех недель, слева от цехов отображаются остатки заготовок изделий, справа количество выпущенных изделий А (участок 4) и В (участок 5). Сверху над участками отображается количество изделий А, находящихся на участке, снизу под участками отображается количество изделий В, находящихся на участке. В участке номер 3 дополнительно отображается, какое изделие на текущей неделе обрабатывается – А или В.

На первой неделе участки 1 и 2 начинают производство, остальные участки вынужденно простаивают. На второй неделе два полуфабриката А и В поступают на участок 3. Поскольку оба заказа идут не по графику и имеют одинаковый приоритет, к производству на участке 3 принимается полуфабрикат А.

На третьей неделе полуфабрикат А начинает обработку на участке 4, еще два полуфабриката поступают на участок 3. Теперь на участке 3 уже 3 полуфабриката, и начальнику участка следует выбрать, какой из трех полуфабрикатов следует обрабатывать. В данном примере мы рассмотрим вариант, когда в целях соблюдения ритмичности производства начальник участка решает сбалансировать производство и чередовать изделия А и В. В реальной ситуации, оценив, что переналадка занимает время, начальник участка мог бы принять решение об увеличении партии обработки и снова выбрать полуфабрикат А, который как раз есть в наличии. Это бы только усугубило описываемую ниже ситуацию.

Далее рассмотрим, как происходило производство на неделях 4–6 (рис. 3).

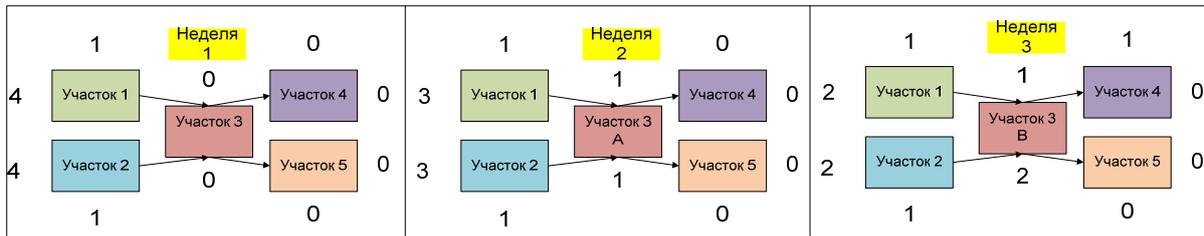


Рис. 2. Первые три недели работы производства

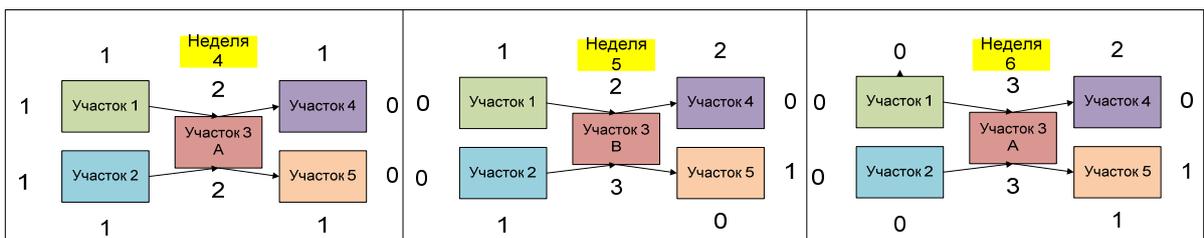


Рис. 3. Работа производства на неделях 4–6

Допустим, что на участке 4 возникли некоторые организационные задержки, которые привели к тому, что на неделе 4 (забегая вперед, это продлится до недели 8), изделие А так и не было выпущено. Как правило, эта информация даже не доводится до подразделений смежников, которые продолжают работать согласно действующим планам производства.

Участки 1 и 2 продолжают запускать производство изделий каждую неделю, количество незавершенных изделий на участке 3 постоянно увеличивается. На 5-й неделе осуществляется выпуск изделия В.

На рис. 4 представлена информация о завершающих периодах производства.

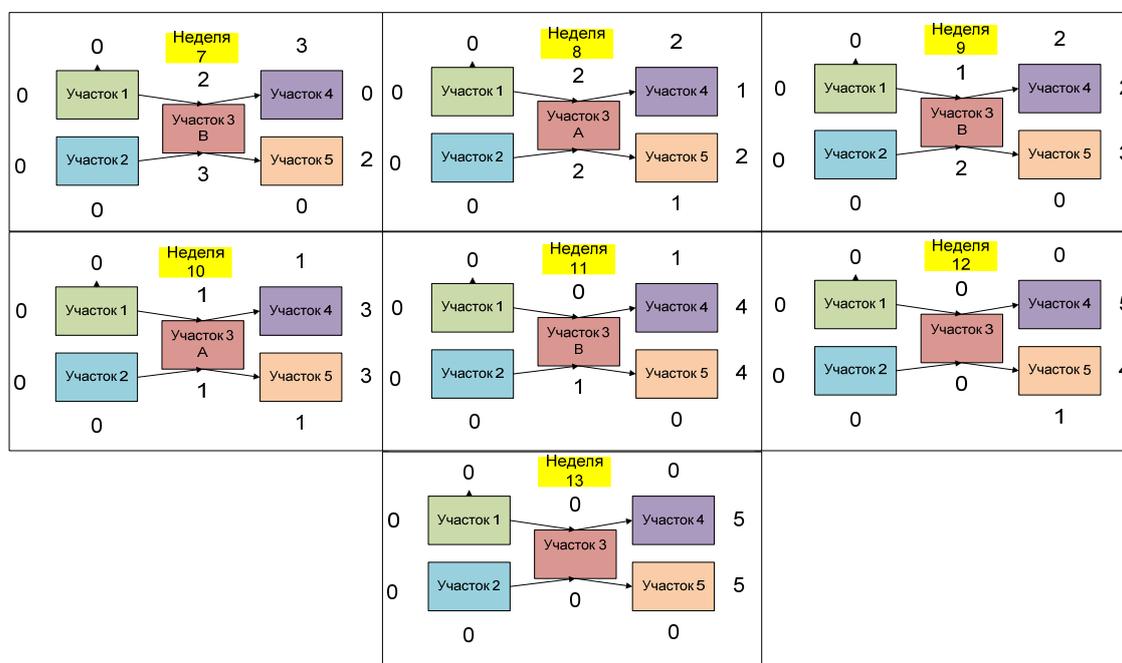


Рис. 4. Завершение выполнения заказов

Начиная с 8-й недели участок 4 начинает планомерно выпускать изделие за изделием каждую неделю, и благодаря избытку мощностей на участках 4 и 5 уже на 12-й неделе завершается выполнение заказа изделий А и на 13-й неделе завершается выполнение работ заказчиком были предъявлены пени по заказу изделий А в размере 6 % от стоимости заказа, а по заказу изделий В в размере 9 % от стоимости заказа, что привело к снижению прибыли от заказов на 37,5 % от планового значения прибыльности.

Теперь рассмотрим, как в этой же ситуации работала бы синхронизированная система управления производством (5)–(8). У каждого участка есть по одной карточке синхронизации с участком-потре-

бителем. Решение задачи (5)–(8) становится тривиальным, ввиду того что выполнение ограничений, накладываемых на систему, делает допустимым на каждом шаге лишь одно решение. Эта ситуация является прямым следствием упрощений, введенных в демонстрационный пример.

На рис. 5 представлена работа производства в первые три недели. Разница заметна уже на неделе 2. Ввиду того что на участке 3 уже есть изделие В – участок 2 на второй неделе простаивает, и лишь на неделе 3, когда на участке 3 начинается обработка полуфабриката В, на участке 2 завершается обработка полуфабриката В.

Далее рассмотрим, как происходило производство на неделях 4–6 (рис. 6).

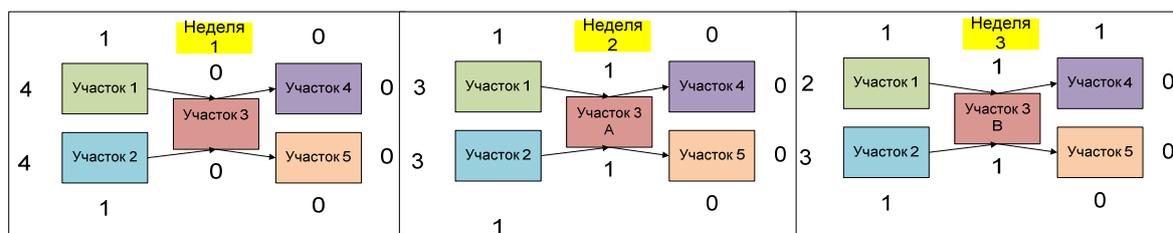


Рис. 5. Синхронизированная система в первые три недели

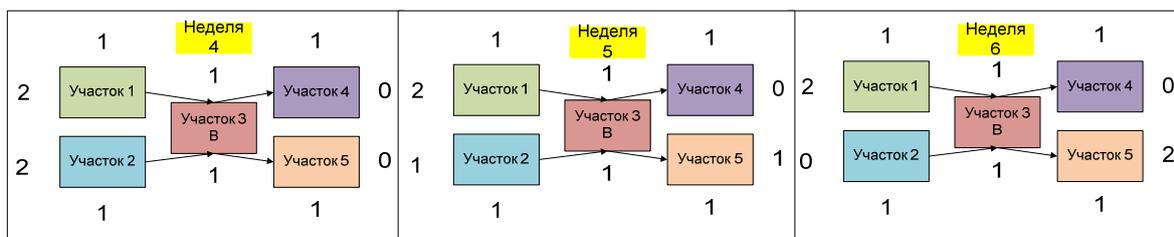


Рис. 6. Работа производства на неделях 4–6

Цепочка по производству изделия А вынужденно простаивает, потому что нет свободных карт синхронизации – участок 4 не выпускает продукции. По

этой же причине участок 3 обрабатывает только изделия В. На первый взгляд, картины производства не сильно отличаются друг от друга.

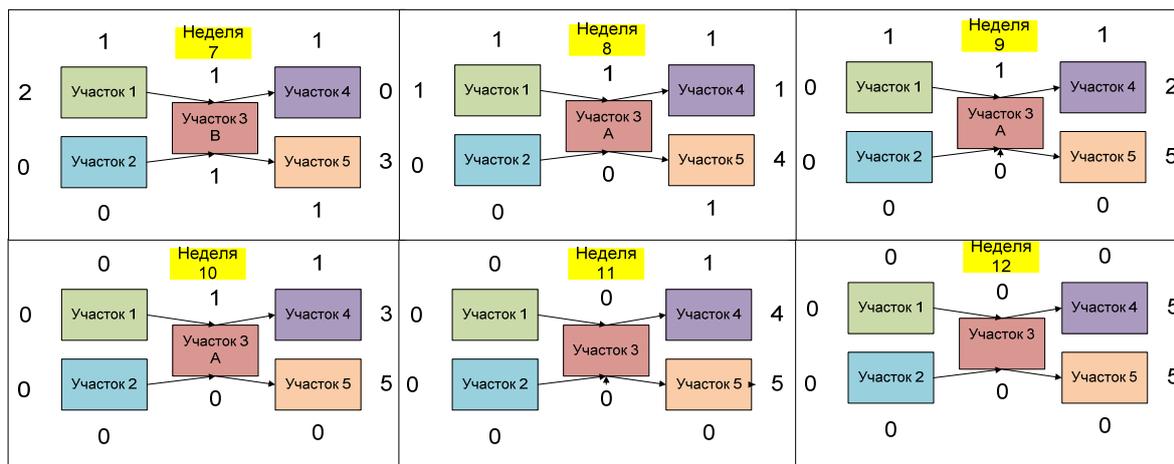


Рис. 7. Завершение выполнения заказов в синхронизированной системе

На рис. 7 представлены итоговые результаты работы синхронизированной системы управления производством. Первым и самым очевидным результатом работы системы является то, что производство завершилось на неделю раньше. Если смотреть внимательнее, то видно, что производство изделия В завершилось на 9-й неделе, что на четыре недели раньше, чем в предыдущем примере, и не нарушает срок, оговоренный в контракте.

При использовании синхронизированной системы управления производством заказчиками были предъявлены пени по заказу изделий А в размере 6 % от стоимости заказа. Прибыль от реализации двух заказов снизилась на 10 % от планового значения. В сравнении с первым случаем удалось **сократить убыток почти в четыре раза!** Полученная прибыль от выполнения заказов **на 30 %** выше, чем без применения синхронизированной системы управления.

Возможно, тестовый пример может показаться надуманным, однако анализ практической работы реальных производственных предприятий показывает, что в аналогичных ситуациях результаты работы, как правило, еще хуже.

### Заключение

Анализируя результаты применения синхронизированного подхода к управлению производством, мы рассмотрели только прямые следствия. Если оценить

уровень незавершенного производства, и время, и количество замороженных средств, то станет очевидно, что применение синхронизированной системы управления позволяет со временем снизить и другие прямые и косвенные затраты, что еще более позитивно отразится на чистой прибыли предприятия.

Для практического использования предлагаемого подхода требуется разработать алгоритм решения задачи оптимизации (10) и реализовать решение в виде автоматизированной системы управления, способной интегрироваться с существующей на предприятии информационной системой. Кроме того, для получения экономического эффекта нужна организационная поддержка со стороны руководства. Однако практическая реализация синхронизированной системы управления мелкосерийным производством позволит значительно повысить эффективность производства, радикально снизить уровень незавершенного производства, цикл производства продукции, затраты на производство. Дополнительно это приведет к значительному повышению качества планирования, актуальности данных в системе и повышению организационной управляемости производства.

### Библиографические ссылки

1. Гаврилов Д. А. Управление производством на базе стандарта MRP II. – СПб. : Питер, 2002.

2. Meyer H., Fuchs F., Thiel K. Manufacturing Execution Systems: Optimal Design, Planning and Deployment, 2009. – 248 с.
3. О'Лири Д. ERP системы Современное планирование и управление ресурсами предприятия. – М., Вершина, 2004. – 258 с.
4. Оно Т. Производственная система Тойоты. Уходя от массового производства / пер. с англ. – М. : Институт комплексных стратегических исследований, 2005. – 192 с.
5. Хитоси Такеда. Синхронизированное производство / пер. с англ. – М. : Институт комплексных стратегических исследований, 2008. – 288 с.
6. Сури Р. Время – деньги. Конкурентное преимущество быстрореагирующего производства / пер. с англ. В. В. Дедюхина. – 2-е изд. (эл.). – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 326 с.
7. Ротер М. Учитесь видеть бизнес-процессы. Практика построения карт потоков создания ценности / пер. с англ. – М. : Альпина Бизнес Букс : CBSD, Центр развития деловых навыков, 2005. – 144 с.
8. Stamatis D. H. The OEE primer : understanding overall equipment effectiveness, reliability, and maintainability / NY: CRS Press, 2010. – 465 с.
9. Фролов Е. Б. Производственная логистика, или что такое «вытягивающее» планирование? – URL: <http://www.i-mash.ru/economy/7691-vytalkivajushhaja-vytjagivajushhaja-sistemy.html>.
10. Хэллетт Д. Обзор систем вытягивания. – URL: <http://www.PullScheduling.com> (дата обращения: 15.04.2016).
11. Там же.
12. Сури Р. Время – деньги. Конкурентное преимущество быстрореагирующего производства. 326 с.
13. Там же.
14. Управление качеством продукции на современных промышленных предприятиях: монография / С. А. Федосеев, М. Б. Гитман, В. Ю. Столбов, А. В. Вожаков. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 229 с.
15. Федосеев С. А., Вожаков А. В., Гитман М. Б. Управление производством на тактическом уровне планирования в условиях нечеткой исходной информации // Проблемы управления. – 2009. – № 5. – С. 36–43.

\*\*\*

A. V. Vozhakov, PhD in Engineering, JSC «Motovilikhinskiye zavody»

M. B. Gitman, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Perm National Research Polytechnic University

V. Yu. Stolbov, DSc in Engineering, Professor, Perm National Research Polytechnic University

#### **Problem of Synchronization of Material Flows in Small-Scale Production**

*The paper considers the mathematical problem of synchronization of material flows in small-scale production, the statement of objectives, optimization criteria and the demonstrative example are presented. It is proposed to use the best practices of Lean and QRM approaches as applied to small-scale production, taking into account its specifics. An approach to optimization of production, by creating a module synchronization of material flows, in accordance with the mathematical statement of the problem of production synchronization is considered. The criterion of maximizing the priorities of current orders and criteria for prioritization of work with minimal planned start time are used. The test case is considered that illustrates the principle of a synchronized system of production management in ever-changing production conditions. To demonstrate the system operation, the virtual production has been selected that consists of five production sites. Application of the synchronized system of production management allowed to profit from the execution of orders by 30% higher than without it. If you assess the level of work in progress, and the time and the amount of frozen assets, it becomes obvious that the use of a synchronized control system allows you to reduce the time and other direct and indirect costs, thus positively affecting the net profit of the enterprise.*

*The synchronization production module is considered as an additional module of the ERP-system built into the existing one.*

**Keywords:** material flow, optimization, pull system, small-scale production, Lean, QRM, ERP.

Получено: 27.02.17