

СИНХРОНИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МЕЛКОСЕРИЙНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

А.В. Вожяков (ОАО «Мотовилихинские заводы»)

Рассматривается подход к оптимизации работы мелкосерийного производства, заключающийся в создании модуля синхронизации материальных потоков. В качестве критериев используются максимизация приоритетов текущих заказов и приоритезация работ с минимальным планируемым временем начала работ. Приведен тестовый пример, демонстрирующий принцип работы синхронизированной системы управления производством при постоянно меняющихся условиях производства.

Ключевые слова: материальный поток, оптимизация, вытягивающие системы, мелкосерийное производство, ERP, бережливое производство, оптимизация, математическое моделирование, QRM, ERP.

Введение

Современный уровень развития технологий диктует новые правила организации производства товаров и услуг. Времена массового производства одинаковых товаров остались в прошлом, пришло время максимальной кастомизации товаров под потребности потребителя, что связано со снижением размеров партии заказов, постоянной готовностью производить новые виды продукта, в том числе по индивидуальным заказам. Вместе 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. В последние годы активно развивались 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 и часто неприменимы для мелкосерийных позаказных производств сложной наукоемкой продукции. Как правило, на таких производствах внедрена ERP-система, часто используется принцип 5 С [7], и на этом использование современных инструментов заканчивается. При этом эффективность данных производств остается низкой, в системе крайне много потерь, сохраняются длительные циклы производства продукции и высокий уровень запасов на всех этапах производства.

Предпосылки создания синхронизированной системы

В [8] дается последовательное обоснование того, что ERP-система является выталкивающей системой управления, то есть материальные ресурсы подаются с предыдущей операции на последующую в соответствии с заранее сформированным жестким графиком поставок. Материальные ресурсы «выталкиваются» с одного звена производственной логистической системы на другое. Для каждой операции общим расписанием устанавливается время, к которому она должна быть завершена. Полученный продукт «проталкивается» дальше и становится запасом незавершенного производства (НЗП) на входе следующей операции. Однажды рассчитанный план является обязательным для исполнения. 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. Это приведет к производству невостребованных деталей НЗП, загрузке мощностей невостребованной продукцией и т.д. Пересчет графика производства продукции происходит достаточно редко (занимает длительное время, требуется подведение итогов, организационные проблемы).

В различных источниках, посвященных практике внедрения бережливого производства, теории ограничений и быстро реагирующего производства, приводится подробное обоснование того, что выталкивающие системы, сталкиваясь с постоянными отклонениями и, не имея внутренних механизмов для их контроля, быстро увеличивают уровень НЗП, производят невостребованную продукцию и несут другие потери.

В противовес выталкивающей системе приводится понятие «вытягивающей» логистической системы, то есть 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. Другими словами, система вытягивания — это система управления производством, объем запасов в которой определенным образом ограничен.

Однако известные способы организации вытягивающего производства являются частными случаями организации производства (крупносерийное производство или цепочка производственных ячеек). Необходима постановка и решение задачи построения и автоматизации вытягивающего производства для общего случая организации производства без дополнительных ограничений к объекту автоматизации.

Таким образом, целесообразным является разработка автоматизированной системы синхронизации производства, позволяющей организовать вытягивающее производство при мелкосерийном производстве сложной продукции, которая в режиме реального времени способна отслеживать состояние производства в целом, выявлять отклонения и автоматически приостанавливать выполнение невостребованных работ и, наоборот, повышать приоритет

работ, выполнение которых в данный момент наиболее актуально.

Постановка задачи

В качестве объекта исследования рассмотрим мелкосерийное дискретное универсальное производство с широким спектром высоко-номенклатурной разнообразной продукции. Производство организовано в нескольких цехах, которые разделены на производственные участки с технологическим оборудованием, объединенным либо по типу выполняемых технологических операций, либо по принципу формирования ячейки QRM.

При этом, исходя из практического опыта авторов статьи, для обеспечения управляемости размер участков не должен быть слишком велик в масштабах производства. Размеры участков следует подбирать таким образом, чтобы каждый участок в один момент времени был способен параллельно обрабатывать 1...10 партий деталей при нормальной работе производства. Если производственный участок в среднем обрабатывает 10 и более различных партий деталей, следует провести анализ технологических цепочек на участке и разбить участок на более мелкие участки, для которых норма управляемости будет выполняться.

Также будем считать, что на предприятии используется ERP-система, 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;
- для каждой партии известен маршрут обработки, число маршрутных переходов для каждой партии, для каждого маршрутного перехода определен номер участка исполнителя;
- партии деталей движутся в производстве строго по маршруту, передача партии деталей с участка на участок осуществляется дискретно;
- в каждый момент времени известно текущее состояние НЗП. Для каждой партии деталей определен текущий маршрутный переход;
- 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 «завершен»;

- для текущего состояния НЗП определены дополнительные дискретные состояния: партия находится в стадии транспортировки или комплектования; партия находится на участке, обеспечена ресурсами и готова к обработке; партия определена к выполнению; начата обработка партии; завершена обработка партии на участке;

– следует отметить, что перевод статуса партии в следующее состояние является необратимым;

- 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, где единице соответствуют максимальные значения важности заказа;

– рассчитан календарный план производства, определяющий для каждого пункта маршрута обработки каждой партии деталей плановые даты начала обработки, плановую длительность обработки и фактическую дату начала обработки партий деталей на участках.

– для каждой партии сборочных единиц определены партии деталей, которые войдут в сборку и которые должны быть завершены для успешного начала сборки. При этом должно выполняться ограничение, запрещающее перевод системы в состояние готовности к выполнению работы на первом переходе сборки в том случае, если множество незавершенных предшественников не является пустым.

В соответствии с требованиями подхода just in time участок k может и должен выполнять работы плана производства, которые достигли даты начала и находятся в состоянии готовности к выполнению. При этом в статус «к выполнению» переводятся все работы, для которых дата начала уже наступила, партия находится на участке и обеспечена всеми необходимыми ресурсами.

Однако практика управления производством показывает, что слепое следование рассчитанному в ERP-системе плану производства из-за неизбежно 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, используемым в QRM [6], но логика работы будет отличаться. 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. Число карточек получателя для поставщика может быть увеличено, если материальный поток между участками особенно интенсивен. Также допускается выдача карточки на цех, а не на участок, в этом случае участки используют общий пул карточек цеха.

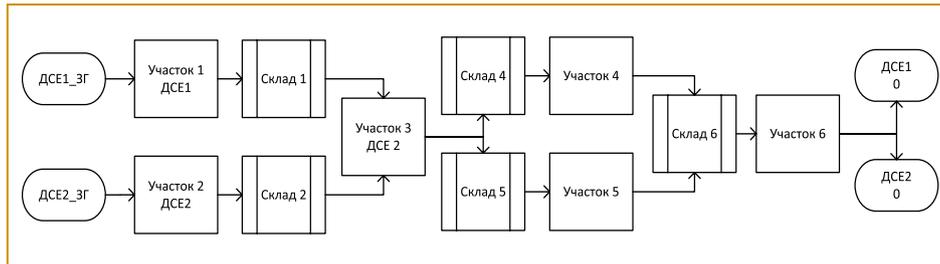


Рис. 1. Схема производства

Таблица 1. Простои оборудования

/	1	2	3	4	5	6	7	8		%
4	3		3	1	5	4			17	43%
5		2	3		5		2	4	16	40%

Число используемых поставщиком карточек участка потребителя определяется путем подсчета числа партий деталей, обрабатываемых на участке-поставщике, следующим участком обработки которых является потребитель. При этом в каждый момент времени число карточек, используемых в данный момент не должно превышать число доступных карточек синхронизации.

Если некоторая работа выполняется на участке-отправителе с последующей передачей на участок-получатель, то используется одна карточка синхронизации.

Требуется разработать систему синхронизации производства, которая, основываясь на информации, находящейся в ERP-системе в режиме реального времени, определяет и передает к выполнению оптимальный набор партий, выполнение которых наиболее целесообразно в текущий момент t с учетом принципов вытягивания, ограничения на НЗП и приоритетности заказов.

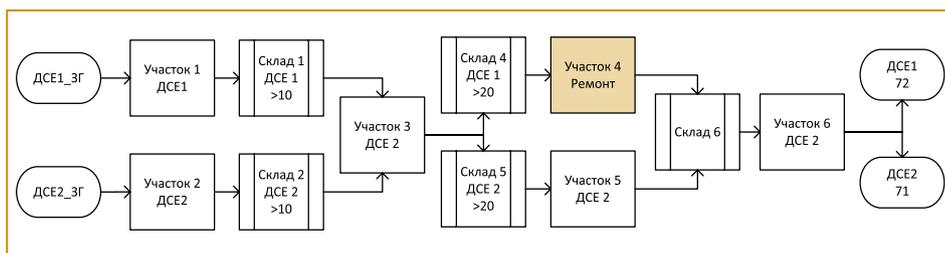


Рис. 2. Классическое производство через три недели после начала работ

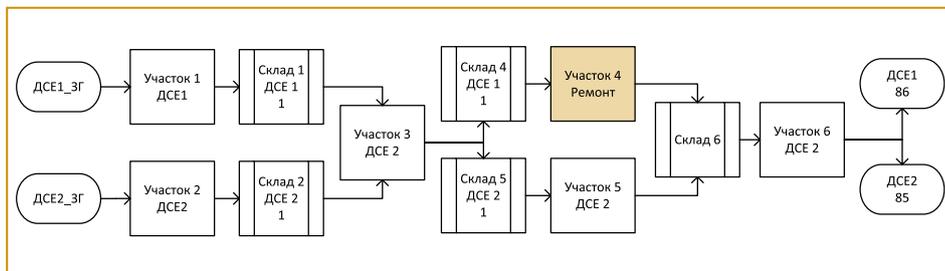


Рис. 3. Синхронизированное производство через три недели после начала

Пример работы синхронизированной системы

Рассмотрим простой пример, наглядно демонстрирующий принцип работы синхронизированной системы управления производством в постоянно меняющихся условиях производства. Для объективного моделирования процессов производства использовалось ПО Plant Simulation от компании Siemens PLM Software.

Пусть производство состоит из шести производственных участков (рис. 1). На данный момент необходимо выполнить два заказа с одинаковым приоритетом на два типа изделий (ДСЕ1 и ДСЕ2) по 200 ед. каждого типа. Оба заказа должны быть отгружены через шесть недель (1,5 мес.), а за срыв срока отгрузки предусмотрены пени в размере 3% стоимости контракта за каждую неделю задержки. Для наглядности допустим, что стоимость ДСЕ1 и ДСЕ2 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.

ДСЕ1 обрабатывается на участках 1, 3, 4, 6. ДСЕ2 обрабатывается на участках 2, 3, 5, 6. Время обработки на каждом участке одинаково и составляет 40 мин. (60 ед./нед.). На каждом участке в один момент времени может обрабатываться только одно изделие. На начальном этапе незавершенное производство отсутствует.

Кроме того, оборудование на участках 4 и 5 сильно изношено, что постоянно приводит к остановкам производства (случайные по времени) на данных участках. Время ремонта оборудования составляет в среднем неделю. Общая доступность оборудования составляет 60% времени. Это означает, что на длительном промежутке времени участки работают в среднем 60% времени, остальное время оборудование находится в ремонте, но время поломки оборудования и срок ремонта заранее неизвестны и являются случайными величинами.

Таблица 2. Результаты классической и синхронизированной систем производства по неделям

	1	2	1	2	
1	18	24	27	27	12
2	58	42	58	56	14
3	72	71	86	85	28
4	95	108	109	122	28
5	97	123	109	123	12
6	106	174	117	185	22
7	147	195	160	200	18
8	194	200	200	200	4

Для демонстрации работы алгоритма было необходимо дважды повторить численный эксперимент в равных условиях, для этого были зафиксированы следующие периоды простоя, полученные с помощью генератора случайных чисел (табл. 1).

Для начала рассмотрим стандартную работу производства с заранее известным планом производства. Поскольку производство происходит с опозданием, участки № 1 и № 2 стараются максимально быстро выполнить заказы, непрерывно запуская в работу заготовки ДСЕ1 и ДСЕ2, результаты работы передаются на промежуточные склады «Склад1» и «Склад2», где хранятся в ожидании начала обработки на участке № 3.

Таким образом, участок № 3 имеет на входе заведомо избыточное число полуфабрикатов ДСЕ1 и ДСЕ2. Допустим, что начальник участка принял сбалансированное решение поочередно обрабатывать ДСЕ1 и ДСЕ2. Начальник участка мог бы принять решение об увеличении партии обработки (вплоть до размера заказа), что приведет только к ухудшению конечного результата (предлагается проверить самостоятельно). Участок № 3 передает результаты работы на склады № 4 и № 5, где полуфабрикаты находятся в ожидании обработки на участках № 4 и № 5 соответственно.

После обработки на участках № 4 и № 5 полуфабрикаты попадают на участок № 6 для финальной обработки и подготовки к отгрузке.

На выходах отображается число выпущенных ДСЕ1 и ДСЕ2. В участках № 3 и № 6 дополнительно отображается число изделий, обрабатываемых на текущий момент. Несмотря на простои оборудования участка № 4, перед участком № 6 образовался склад полуфабрикатов, позволяющий оптимально загрузить узкое место — участок № 6.

Таблица 3. Результаты моделирования

	1	2	1	2
, /	40/8	36/7	38/8	31/6
1 ..	8	4	1	1
, .	~36	~36	~5	~5
, %	9	16	60	62
, %	91	84	40	38
, %	6	3	6	0
, %	16		17	

Теперь рассмотрим, как в этой же ситуации работала бы синхронизированная система управления производством. У каждого участка есть по одной карточке синхронизации с участком - потребителем, — самый простой случай. Сроки и приоритетность заказов одинаковая, поэтому решение задачи оптимизации выбора партии обработки становится тривиальной.

За первую неделю произведено 54 изделия (сравним с 42 ед. в первом случае), что фактически соответствует теоретическому максимуму и на 30% больше, чем в первом случае.

В табл. 2 представлены результаты выпуска изделий в двух системах производства по неделям работы.

Если бы эксперимент завершался бы через четыре недели, выводы можно было бы сделать автоматически: 231 и 203 изделия. Однако на пятой неделе участки № 4 и № 5 простаивают, излишнее незавершенное производство отсутствует, поэтому участок № 6 вынужденно останавливается ввиду отсутствия полуфабрикатов. Остальные участки также простаивают ввиду поломки оборудования. Таким образом все производство простаивает в течение целой недели. Данная ситуация характерна для вытягивающих производств, и это одна из сильных сторон организации такого производства. Как будет показано в конце статьи, даже такой длительный простой не смог изменить картины в целом.

Рассмотренный демонстрационный пример построен таким образом, чтобы наиболее объективно отразить особенности выталкивающего и синхронизированного производства, — достигнутый результат лишь отчасти отражает потенциальную полезность от использования предлагаемого подхода. В реальных условиях вынужденные простои производства позволят увидеть резервы и направить их на выпуск востребованной в данный момент продукции или же на развитие самого производства. В то время как производство невостребованной продукции лишь увеличивает уровень незавершенного производства и объем замороженных средств предприятия, лишая производство прозрачности и управляемости, что характерно для большинства предприятий России.

Практическая реализация

На сегодняшний день применение лучших практик оптимизации производственных процессов в стандартных механизмах ERP-систем крайне низок. На данный момент неизвестно о случаях реализации механизмов синхронизации производственных процессов в распространенных ERP-системах как отечественных, так и зарубежных [9].

Для практической реализации синхронизированной системы управления мелкосерийным производством (далее системы) потребуется разработка математического аппарата и собственно программная реализация синхронизированной системы управления производством вкупе с компонентами интеграции или же инкапсуляция системы в существующую ERP-систему предприятия.



Рис. 4. Схема автоматизации системы

Для реализации системы может быть выбрана произвольная программно-аппаратная платформа, позволяющая с минимальными затратами получать из ERP-системы всю необходимую для работы системы информацию, например, это могут быть внешние доработки, расширяющие функциональность базовой ERP-системы.

Для решения задачи оптимизации [10] в разрабатываемой системе предлагается реализовать эмпирический алгоритм, способный с необходимой скоростью и точностью решать задачу оптимизации, описание данного алгоритма выходит за рамки данной статьи (рис. 4).

Данная схема содержит минимальное число связей, а следовательно, минимизирует сложность задачи интеграции информационных систем. Данные, необходимые для работы системы, поступают напрямую из ERP-системы. Далее осуществляется решение задачи оптимизации. Информация о партиях деталей, которые сейчас доступны к обработке, выводится на информационные панели участков, где начальник участка (мастер) принимает данный план к выполнению. Также информация передается в ERP-систему, активируя соответствующие работы.

Для успешной практической реализации необходима также организационная поддержка на всех уровнях управления. Следует обеспечить строгое выполнение рекомендаций системы, увязать систему с действующей оплатой труда таким образом, чтобы нарушение рекомендаций системы влекло за собой снижение реального уровня оплаты труда ответственных сотрудников и, наоборот.

Кроме того, в учетные процедуры также должны быть внесены изменения. Работники ОТК, бухгалтерии, логистических служб не должны принимать

документы и осуществлять контроль партий деталей, работа по которым не была активирована системой.

Заключение

Практическая реализация синхронизированной системы управления мелкосерийным производством позволит значительно повысить эффективность производства, радикально снизить уровень НЗП, цикл производства продукции, затраты на производство. Дополнительно это приведет к значительному повышению прозрачности производства, качества планирования, актуальности данных в системе и повышению организационной управляемости производства. При этом внедрении синхронизированной системы управления не требует слишком много

ресурсов от предприятия, где уже внедрена и используется ERP-система.

Список литературы

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 быстро-реагирующего производства/Пер. с англ. В.В. Дедюхина. 2-е изд. (эл.). М: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 326 с.
7. Федосеев С.А., Гитман М.Б., Столбов В.Ю., Возжаков А.В. Управление качеством продукции на современных промышленных предприятиях: монография. Пермь: Изд. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. 2011. 229с.
8. Фролов Е.Б. Производственная логистика или что такое «вытягивающее» планирование?//<http://www.i-mash.ru/economy/7691-vytalkivajushhaja-vytjagivajushhaja-sistem.html>
9. Доан М. Синяя книга SAP. Краткий бизнес-путеводитель по миру SAP. М.: Эксперт РП. 2013. 224 стр.
10. Федосеев С.А., Возжаков А.В., Гитман М.Б. Управление производством на тактическом уровне планирования в условиях нечеткой исходной информации // Проблемы управления. 2009. №5. С.36-43.

Возжаков Артем Викторович – ПАО «Мотовилихинские заводы»
 Контактный телефон (342) 260-71-70.
 E-mail: vozjakov@ya.ru