

С. Жаринов

О детальном и укрупнённом планировании¹

Слишком детальное планирование это такое же зло, как избыточные запасы.

Эли Шрагенхайм²

Убедившись, что все приглашённые на месте, председатель, - он же главный акционер группы производственных предприятий, - открывает внеочередное заседание совета директоров:

– Господа, я собрал вас для того, чтобы сообщить пренеприятное известие. Нет, к нам пока не едет ревизор. Дело гораздо серьёзнее. Вероятно, многие уже слышали о том, что общие итоги работы группы за прошедший год оказались значительно хуже плановых показателей. Как вы знаете, мы всегда возлагали особые надежды на наш завод, который после завершения всех основных мероприятий по оптимизации производственных процессов должен был выпускать не менее 100 изделий в месяц. Мы даже одобрили им кредит на закупку нового оборудования. Конечно, никто не ожидал, что в первый же год мы будем «в шоколаде», но вполне можно было рассчитывать хотя бы на скромные дивиденды. К сожалению, фактически завод весь год в среднем ежемесячно отгружал чуть больше 80 единиц готовой продукции и регулярно приносил нам убытки. И если бы не фабрика, которая продемонстрировала удивительно высокий рост доходности, мы все с вами сегодня сидели бы в глубокой ... , - как бы это поделикатнее выразиться, - яме. Поэтому предлагаю заслушать руководителей обоих предприятий, а потом решим, как нам быть. Начнём с плохих новостей.

– Прежде всего, надо признать, что мы действительно пока не справились с задачей выхода на утверждённый акционерами уровень прибыли, – берёт слово директор завода. – Однако за прошлый год нам удалось реализовать все запланированные ранее изменения для перехода на новую схему организации производства по принципу сбалансированных мощностей (как на Тойоте), и мы уверены в том, что в самое ближайшее время это позволит получить значительный эффект.

– Насколько я помню, про ваши достижения в балансировании мощностей вы нам докладывали ещё полгода назад, – прерывает выступающего один из членов совета директоров, хорошо знакомый с современными подходами к управлению производством и изначально скептически относившийся к этой идее. – Что же мешало заводу за вторую половину года получить хотя бы «незначительный» эффект?

– Дело в том, что неожиданно выявилась странная особенность, которой раньше мы не придавали большого значения. Оказалось, что на величину выпуска конечной продукции сильно влияет так называемая вариабельность отдельных этапов производственного процесса, причём наличие нескольких последовательных элементов в цепочке только усугубляет эту негативную тенденцию. Мы даже заказали консультантам специальное исследование, результаты которого есть в представленном совету отчёте³. В частности, там доказывается, что если значительно сократить эту самую вариабельность, то можно будет гарантировать устойчивый выпуск на уровне запланированных 100 изделий в месяц. Именно этим мы и занимались в последнее время. Уже есть определённые подвижки, хотя об окончательном успехе пока говорить рано. Но мы намерены и дальше твёрдо идти по пути Тойоты.

– А консультанты не говорили вам, что Тойота идёт по этому пути уже больше 50 лет? – не удовлетворившись полученным ответом, продолжает своё наступление «скептик». – И что до сих пор с целью нейтрализации эффектов вариабельности и зависимости процессов в «идеально» сбалансированных ячейках они продолжают создавать специальные страховые запасы, хотя и не очень большие? Надеюсь, вам известно о назначении «супермаркетов» при организации материальных потоков на принципах бережливого производства? По сути, это и есть те самые страховые запасы, которые предназначены для буферирования остаточной вариабельности. А в вашей схеме я не увидел вообще никаких механизмов защиты от неопределённости. Или вы полагаете, что акционеры будут ждать ещё 50 лет, пока вы сократите отклонения на всех этапах до приемлемого уровня рисков?

– Честно говоря, консультанты и в самом деле высказывали сомнения в возможности быстрого изменения ситуации и даже предлагали свою помощь в разработке альтернативной схемы организации производственного процесса. Но мы абсолютно уверены в том, что движемся в правильном направлении и в состоянии за несколько месяцев самостоятельно реализовать все необходимые улучшения.

– И всё же, можно ли поподробнее ознакомиться с рекомендациями ваших консультантов? – не сдаётся оппонент. – Мне кажется, прежде чем принимать окончательное решение, было бы неплохо сравнить несколько вариантов.

– Правильно, ... согласен, ... поддерживаю, – одобрительно закивали головами другие члены совета, включая председателя.

– Да никаких конкретных рекомендаций и не было, – пытается парировать выпад директор завода, – только пять страничек с общим описанием подхода. Речь шла об отказе от принятой нами схемы сбалансированных мощностей в пользу синхронизации всего потока по какому-то «ограничению». Мы даже не стали разбираться и не включили этот раздел в окончательную версию отчёта. Впрочем, я могу прямо сейчас раздать его копию всем присутствующим.

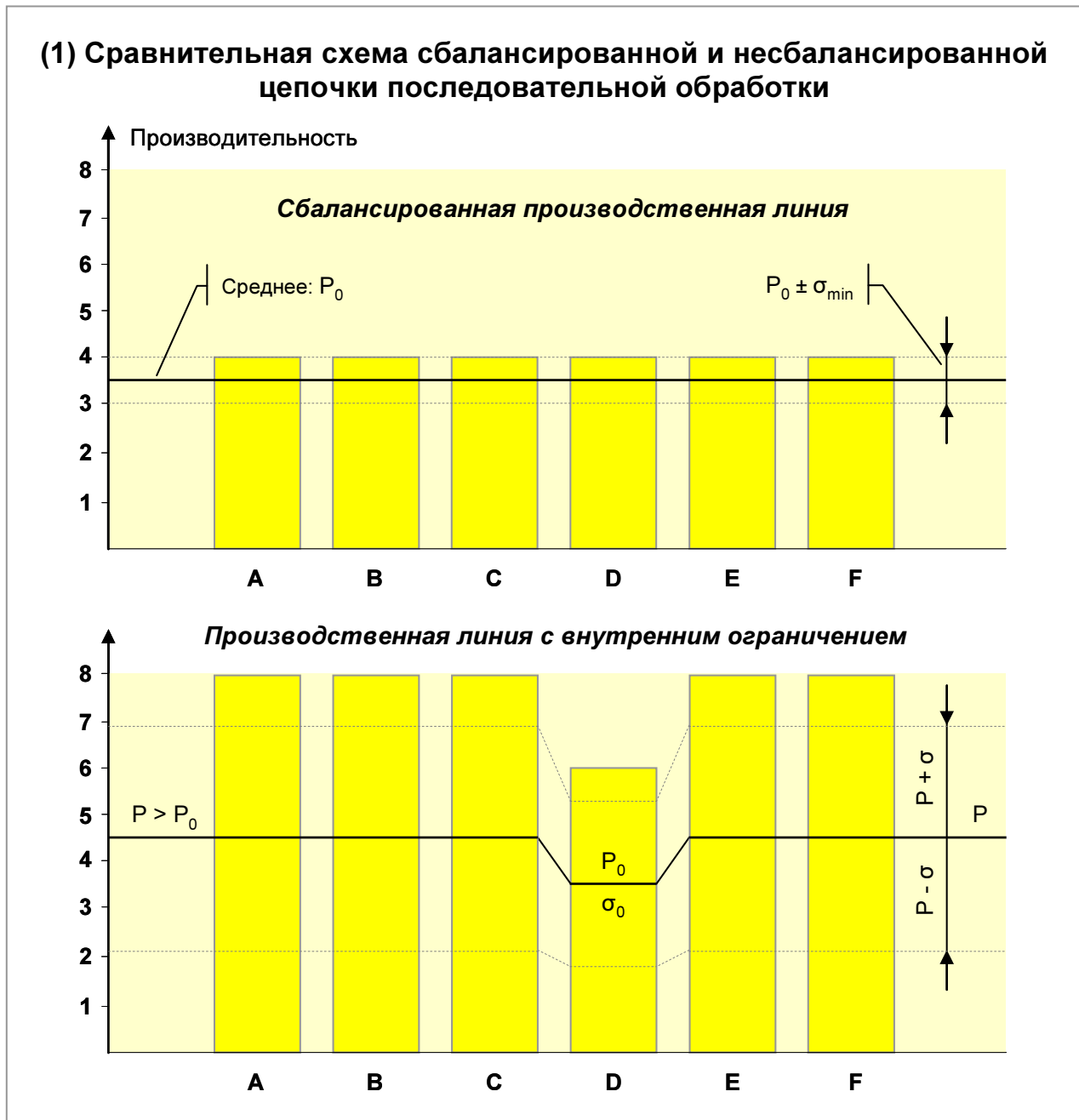
АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА (дополнительные предложения консультантов, не вошедшие в отчёт)

Как было показано в основной части исследования, для гарантированного обеспечения средней производительности системы на уровне 100 изделий в месяц по схеме со сбалансированными мощностями необходимо сократить вариабельность всех этапов процесса и поставок в три с половиной раза (с 0,49 до 0,14; см. верхнюю диаграмму на врезке 1, где $P_0 = 3,5$, $\sigma_{\min} = 0,5$)⁴. С нашей точки зрения, на это потребуется не один год, и выполнить такую работу в производственной среде типичного отечественного предприятия за несколько месяцев практически нереально.

Возникает вопрос: а можно ли, - и если да, то каким образом, - реорганизовать систему, чтобы решить ту же задачу в сжатые сроки и при существующем высоком уровне отклонений от средней пропускной способности отдельных ресурсов? Как известно, единственным надёжным средством защиты от неопределённости является «буферирование», иными словами, формирование страховых резервов. Чаще всего для этой цели используются запасы сырья и незавершённого производства. Однако применительно к «сбалансированной» цепочке проблема состоит в том, что для обеспечения её общей пропускной способности на уровне средней производительности отдельных элементов такие запасы требуется поддерживать на каждом этапе процесса. Поэтому при большом числе этапов обработки суммарный размер НЗП в системе (и, соответственно, общая длительность производственных циклов изготовления конечной продукции) значительно возрастает.

В качестве альтернативы предлагается отказаться от схемы сбалансированных мощностей и построить цепочку, в которой средняя производительность всех этапов процесса, - кроме одного, - была бы *немного выше* величины желаемой пропускной способности системы в целом P_0 , а для одного из внутренних ресурсов (ограничения) эта величина в точности равнялась бы P_0 (см. нижнюю диаграмму на врезке 1, где за ограничение принят рабочий центр **D**). В таком случае отпадает необходимость в поддержании значительных избыточных запасов на всех этапах процесса, а функции страховых резервов выполняют так называемые «спринтерские» или «защитные» мощности ресурсов, не являющихся внутренними физическими ограничениями системы.

Описанная схема известна под названием DBR (Drum – Buffer – Rope) или «барабан – буфер – верёвка» и представляет собой классическое решение ТОС в области производственной логистики⁵. Здесь в роли «барабана», задающего ритм и определяющего пропускную способность всей системы в целом выступает то самое внутреннее ограничение в потоке; «буфер» измеряется временем, в течение которого задание с высокой вероятностью проходит весь



путь от запускающего этапа до ограничения; под «верёвкой» понимается специальный механизм синхронизации входного потока с ритмом работы ограничения. Таким образом, в предлагаемой схеме неопределённость будет «буферироваться» не запасами, а временем.

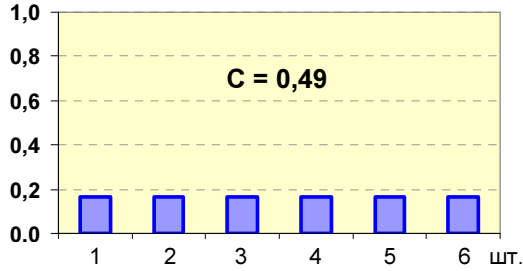
На врезке 2 представлены результаты моделирования ситуации (сценарий Г), когда параметры входного потока заготовок и производительности рабочего центра **D** соответствуют первоначальному сценарию (с равной вероятностью от 1 до 6 единиц в день): $P_0 = 3,5$; $\sigma_0 = 1,71$, - а производительность остальных рабочих центров в цепочке составляет с равной вероятностью от 1 до 8 штук в день, то есть $P = 4,5$; $\sigma = 2,29$. Следовательно, в рассматриваемом примере

(2) Результаты моделирования «несбалансированной» производственной линии с внутренним ограничением

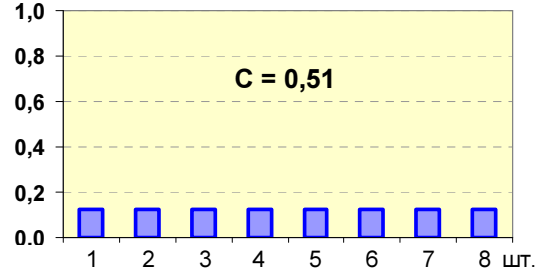
Модель входного потока и производительности ограничения

Модель производительности нелимитирующих ресурсов

Вероятность

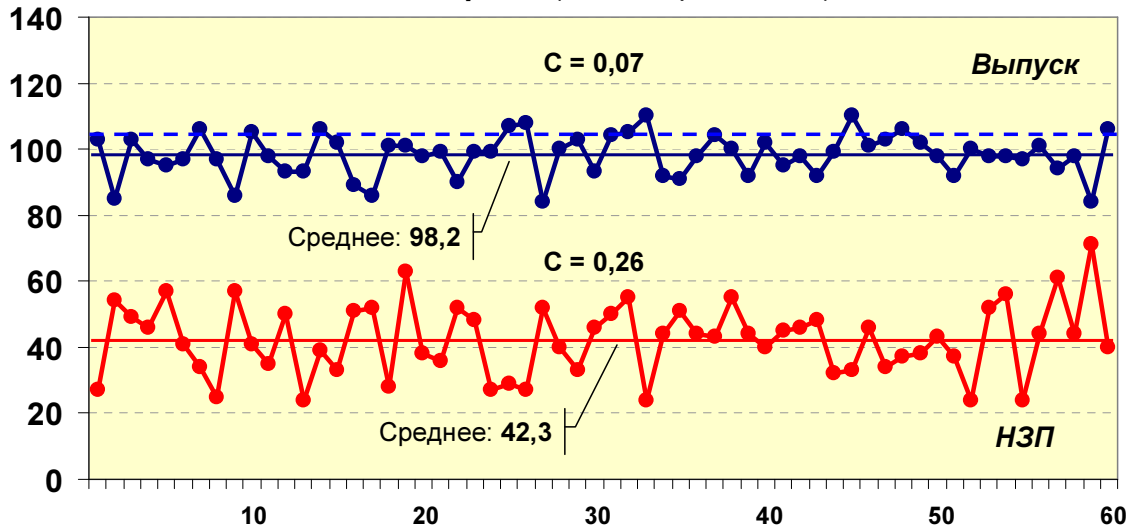


Вероятность

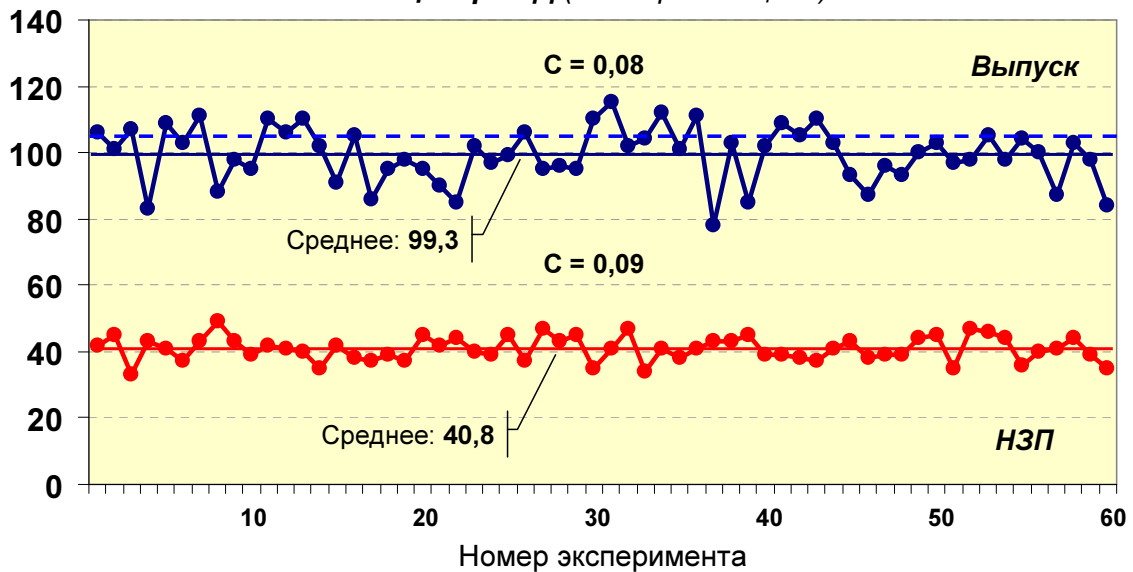


Объём выпуска и незавершённого производства (за месяц, шт.)

Сценарий Г (без синхронизации)



Сценарий Д (с синхронизацией)



средняя мощность каждого из нелимитирующих ресурсов (4,5) превышает среднюю мощность ограничения (3,5) примерно на 30%. Как и раньше, один сеанс моделирования имитирует поведение системы за условный месяц (30 рабочих дней); выполняется 60 независимых экспериментов, в каждом из которых подсчитывается общее число выпущенных изделий и НЗП (сумма размеров очередей перед рабочими центрами) в конце 30-го дня работы; пунктирной линией отмечен средний уровень входного потока 105 штук.

Для определения начального размера «буфера» применяется эмпирическое правило⁶, согласно которому суммарное операционное время обработки заготовки на этапах перед ограничением ($A \rightarrow B \rightarrow C$, 3 дня) утраивается, что при переводе в запасы означает: 9 дней \times 3,5 шт. = 31,5 шт. На рабочий центр **A** в среднем поступает 3,5 заготовки в день, поэтому если – как и раньше – на начало первого дня держать перед **B** и **C** по 4 заготовки, то на ограничение **D** остаётся 20 единиц. Перед рабочими центрами **E** и **F** в начале каждого сеанса моделирования по-прежнему размещается по 4 заготовки, так что начальный уровень НЗП в системе составляет 36 единиц.

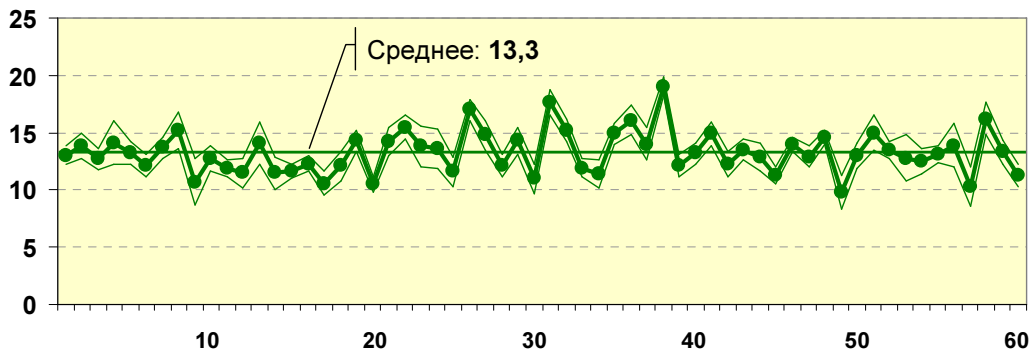
Как следует из результатов моделирования, среднемесячный объём выпуска вплотную приближается к желанной цифре 100 изделий (98,2 по сравнению с провальным значением 80,8 штук для сбалансированной линии), а размер НЗП остаётся почти без изменений (42,3 для сценария Г против 43,6 для исходного сценария). Ситуация с выпуском существенно улучшается, однако от месяца к месяцу продолжают сохраняться значительные колебания размеров НЗП, что, в свою очередь, приводит к большой неопределённости оценок времени производственного цикла и, соответственно, сильно затрудняет планирование отгрузок готовой продукции заказчикам.

С целью снижения уровня вариабельности незавершённого производства в системе предлагается применить механизм синхронизации запуска, который в методике DBR называется «верёвкой». Предположим, что каждый день наш поставщик станет подавать на вход рабочего центра **A** не случайное число заготовок (с равной вероятностью от 1 до 6), а ровно столько, сколько их за предыдущий день переработало ограничение (в данном случае, рабочий центр **D**, - тоже от 1 до 6 шт.). Тогда объём НЗП внутри цепочки $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ будет поддерживаться на постоянном уровне, а вся его вариабельность будет создаваться на этапах **D**, **E** и **F**. Результаты моделирования этой ситуации показаны на врезке 2 (сценарий Д; для определённости в первый день каждого эксперимента на вход системы поступает 4 заготовки). Видно, что средние значения показателей в сравнении с предыдущим сценарием как минимум не ухудшаются, но коэффициент вариабельности НЗП сокращается почти в 3 раза (с 0,26 до 0,09)! Как это влияет на общее время производственного цикла, наглядно демонстрируют два верхних графика на врезке 3⁷.

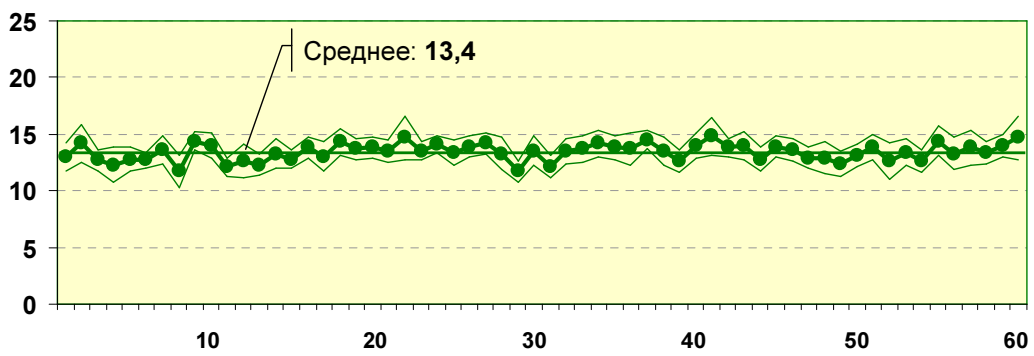
(3) Результаты моделирования «несбалансированной» производственной линии с внутренним ограничением

**Время производственного цикла (дн.),
среднее ± стандартное отклонение**

Сценарий Г (без синхронизации)

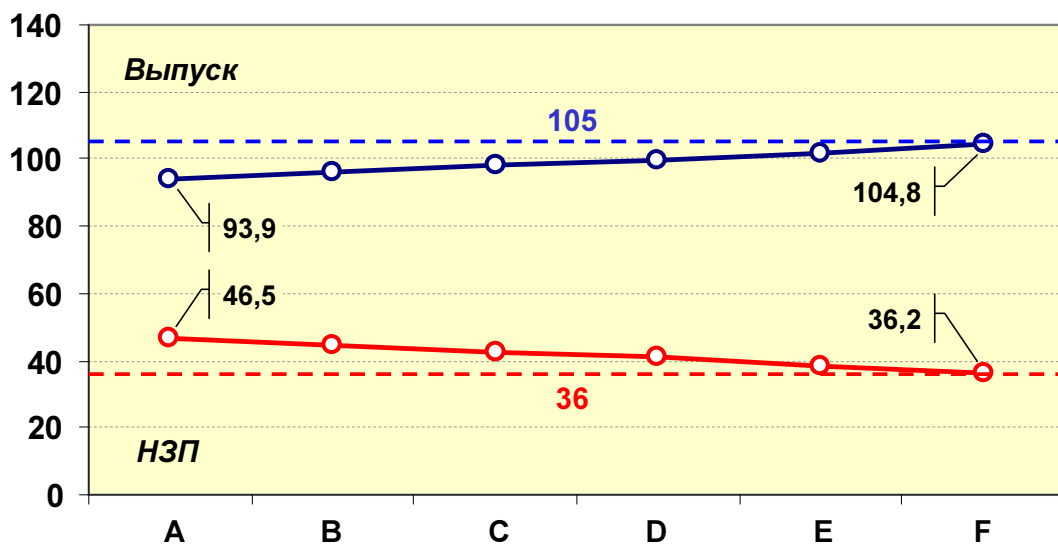


Сценарий Д (с синхронизацией)



Номер эксперимента

**Средний выпуск и НЗП (шт.)
в зависимости от положения ограничения
в синхронизированной цепочке**



Наконец, на нижней диаграмме врезки 3 приведена расчётная зависимость среднего выпуска и среднего размера незавершённого производства в системе с синхронизированным запуском от места фиксации лимитирующего ресурса в цепочке. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что чем ближе к выходу потока находится внутреннее ограничение, тем эффективнее работа системы в целом, - выше её производительность и ниже уровень НЗП. Причём размер накопленного (по сравнению с исходным) НЗП стремится к нулю, а выпуск, соответственно, устойчиво растёт, превышая порог в 100 единиц для случая **Е** и почти достигая предельного значения 105 штук для случая **Ф**.

ХОРОШИЕ НОВОСТИ

– Что это такое? – быстро просмотрев полученные материалы и не скрывая разочарования, спрашивает председатель. – Какие-то барабаны и верёвки. Не говоря уже о странном предложении почти на всём производстве держать избыточные ресурсы. Как это понимать? Мы с вами еле-еле наскребли деньги на закупку нового оборудования, а нам советуют не загружать его на полную мощность. Как же мы будем отбивать инвестиции?

– Лично я всё это понимаю следующим образом, – вступает в дискуссию «скептик». – Есть два варианта развития событий: либо на заводе продолжают совершенствовать сбалансированную линию и тогда в лучшем случае мы начнём получать от неё отдачу через несколько лет, либо они реорганизуют производство по схеме DBR и тогда выход на запланированные показатели доходности можно будет ожидать уже в текущем году.

– Но при втором варианте для обеспечения резервных мощностей заводу потребуются дополнительные ресурсы, – возражает председатель.

– Совсем не обязательно. Я почти на сто процентов уверен в том, что эти ресурсы уже есть в наличии, просто сегодня они не задействованы. Взять хотя бы ту историю с закупкой NCX-10. Давайте спросим представителей завода, - пусть напомнят, почему тогда вообще возникла эта тема.

– Что значит почему? – удивлённо поднимает глаза директор завода. – Нам поставили задачу выпускать не меньше сотни изделий в месяц. Мы тщательно проанализировали возможности имеющегося оборудования и выяснили, что главные трудности связаны с запускающим этапом, где на тот момент средняя производительность старого станка едва дотягивала до трёх единиц в день. А нужно было как минимум три с половиной.

– Совершенно верно, – продолжает развивать свою мысль оппонент, – но потом я читал ваш отчёт о вводе NCX-10 в эксплуатацию. Там написано, что станок может легко обрабатывать по четыре заготовки за смену, причём в идеальных условиях даже шесть. А если заглянуть в технический паспорт? Полагаю, что мы увидим там цифру не менее восьми. Правильно?

– Правильно, но только в том случае, если он все 8 часов будет работать без перерывов. Если операторы не болеют, ничего не ломается и забыть про профилактику. Вы же прекрасно понимаете, что мы не можем устанавливать такие нереальные нормативы.

– Понимаю, но ведь никто и не требует, чтобы станок эксплуатировался в форсированном режиме постоянно. Вам нужна средняя производительность всего четыре с половиной штуки. А «спринтерские» мощности имеет смысл включать только при возникновении непредвиденных обстоятельств.

– Подождите, ... с этого места, пожалуйста, поподробнее, – оживляются некоторые члены совета, до сих пор не принимавшие участия в обсуждении. – Вы хотите сказать, что потенциал заводского станочного парка используется не эффективно? Что у них много избыточных ресурсов?

– А как вы себе представляете балансирование мощностей? Предположим, в линейке всего два станка. Первый может за смену обработать 6 заготовок, а второй только 4. Тогда второй процесс вы объявляете «ритм задающим» и по нему рассчитываете так называемое «время такта» (в данном случае это 2 часа). А для первого процесса устанавливаете соответствующий норматив - те самые 2 часа на операцию, хотя фактически работу можно выполнять гораздо быстрее (за час и двадцать минут). Я излагаю достаточно подробно?

– Никогда не поверю, чтобы на Тойоте так нерационально относились к использованию своих ресурсов, – бросает реплику председатель.

– Конечно нет. Там для начала попытались бы устранить потери на втором станке, довели бы его производительность до 6 штук за смену и затем для всей цепочки установили бы время такта час двадцать. А у нас в аналогичной ситуации предпочитают выбивать деньги на новое оборудование.

– Вы что же, намекаете на то, что мы намеренно вводим акционеров в заблуждение? – отнеся последнее утверждение на свой счёт, раздражённо спрашивает директор завода.

– Я хочу сказать только то, что по моему мнению наш совет в своё время принял неверную установку, в соответствии с которой мы потребовали от своих предприятий обеспечивать максимальную загрузку оборудования. А организация сбалансированной производственной цепочки это лучший способ продемонстрировать отсутствие неиспользуемых мощностей. К сожалению, стремление к ложным ориентирам сыграло с нами злую шутку: мы получили свою «сбалансированную» линию, однако в условиях сильной вариабельности и зависимости процессов её фактическая пропускная способность оказалась гораздо ниже прогнозируемой.

– И теперь вы предлагаете отказаться от прежней политики максимальной эффективности использования ресурсов? – задаёт вопрос один из членов совета, представляющий миноритарных акционеров. – А что взамен?

– А что бы вы сами предпочли получить в качестве дивидендов: бумажку с выведенным на ней коэффициентом загрузки станка или реальные деньги? ...

Председатель объявляет перерыв в заседании, а после его завершения снова берёт слово:

– Друзья, мне кажется, что наш скептически настроенный коллега сильно драматизирует ситуацию. Тем более, как я говорил в самом начале встречи, есть и хорошие новости. Предлагаю послушать директора нашей фабрики, которая в прошедшем году показала лучшие за всю свою историю результаты. Насколько я понимаю, этого удалось добиться как раз благодаря повышению эффективности использования оборудования. Как вы все, вероятно, помните, раньше мы часто критиковали их за слабую отдачу, а проведенный год назад аудит выявил массовые случаи простоя станков, - иногда по полсмены и даже больше. При этом постоянно оплачивались переработки и сверхурочные, а уровень незавершённого производства превышал все разумные пределы. И вот, наконец, произошли серьёзные сдвиги в лучшую сторону. Без ложной скромности могу сказать, что и сам приложил к этому руку.

– Видите ли, – неожиданно пытается прервать его директор фабрики, – дело в том, что не всё так просто

– Конечно, было совсем просто найти правильное решение, – увлечённо продолжает председатель. – И вот как-то раз совершенно случайно я попал на презентацию одной компьютерной программы, которая всего за несколько секунд составляла подробнейшие производственные расписания для десятков станков и сотен одновременно изготавливаемых изделий со сложнейшими технологическими маршрутами. Сильное впечатление произвела возможность формирования детальных сменно-суточных заданий, - на каждую операцию для каждого станка, причём на любом горизонте планирования, хоть на год. А главное - оптимизация по критерию максимальной загрузки оборудования.

– Вообще-то применение этой программы ... , – снова пытается что-то объяснить директор фабрики. Но председателя уже не остановить:

– Естественно, у нас всего четыре крупных передела и очень небольшая номенклатура выпускаемой продукции. Но, в отличие от завода, нет единой цепочки последовательной обработки, а для каждого изделия имеется свой особый технологический маршрут. Поэтому составление пооперационных графиков работы станков всегда было большой проблемой. Посоветовавшись с нашими специалистами, как раз год назад я рекомендовал эту программу для внедрения на фабрике. Мы подумали, что если она так хорошо справляется с сотней станков, то для наших-то четырёх будет все задачи щёлкать как орехи. А теперь давайте послушаем, как всё было на самом деле.

Директор фабрики наконец-то получает возможность высказаться:

– Видите ли, дело в том, что не всё так просто Вообще-то применение

этой программы Короче говоря, мне бы не хотелось расстраивать нашего уважаемого председателя, но если уж быть совсем откровенным, то поработав с этим чудом оптимизации пару месяцев в тестовом режиме, мы поняли, что если будем им пользоваться на практике, то очень скоро вылетим в трубу!

– Как же так?! – растерянно восклицает председатель. – Вы же сами мне на днях сообщали, что каждый месяц считаете расписания по программе.

– А мы их действительно считаем. Только не в начале месяца, а в конце, так сказать «постфактум», - чтобы лишний раз убедиться в том, что без этой штуковины у нас получается гораздо лучше.

– Вы хотите сказать, что лучше компьютера составляете сменно-суточные задания и при этом обеспечиваете более эффективное использование своего оборудования? Специалисты убеждали меня в том, что расчёт максимальной загрузки станков это сложнейшая математическая задача, решение которой требует применения специальных приёмов и алгоритмов.

– Вообще-то для работы нам не нужны детальные расписания, и мы не стремимся максимально загружать станки. А эффективность использования оборудования оцениваем по конечным результатам. И, судя по объявленным показателям фабрики за год, такой подход себя вполне оправдывает. ...

Чтобы заполнить возникшую паузу, во время которой присутствующие пытаются осмыслить услышанное, директор фабрики быстро добавляет:

– Я предполагал, что у членов совета будет много вопросов, поэтому подготовил подробный доклад. Сейчас я вам расскажу по порядку, как всё было на самом деле. А текст моего выступления раздам всем желающим.

УПРАВЛЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ (доклад директора фабрики)

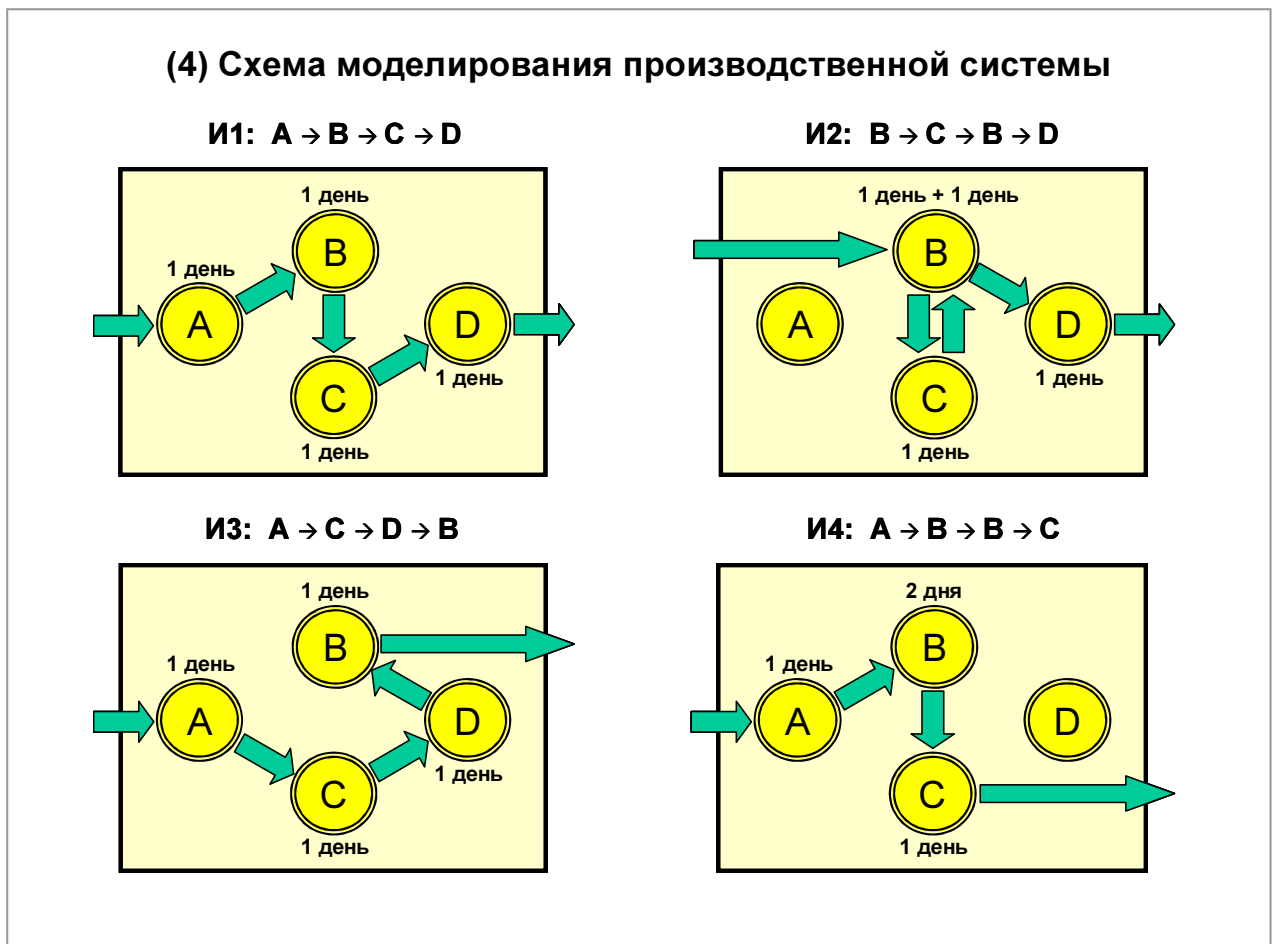
Наше предприятие выпускает четыре типа изделий: **И1, И2, И3, И4**, - которые изготавливаются на четырёх рабочих центрах **А, В, С, D**. Маршруты обработки и операционные времена показаны на соответствующих диаграммах врезки 4. При этом выполняются следующие условия⁸:

1. Все изделия производятся из одинаковых заготовок, с которыми проблем нет (поставщик держит у нас свой склад и оплата происходит по факту списания заготовок в производство).
2. Выполнение каждой из операций на любом станке занимает ровно 1 день (обратите внимание на изделие типа **И4**, для которого на рабочем центре **В** последовательно выполняются две разные операции).
3. Перед началом каждого рабочего дня на предприятие поступает ровно по одному заказу на изготовление некоторого конкретного изделия. Заказы

приходят в случайном порядке, хотя каждый из четырёх типов изделий обычно заказывается с равной вероятностью.

4. Операторы разных рабочих центров не взаимозаменяемы; производство работает в одну смену 5 дней в неделю (так что в среднем на один месяц приходится 21 рабочий день).
5. Заготовки приобретаются по 50 у.е. за штуку, а за каждое готовое изделие заказчики платят в среднем по 100 у.е. Общие накладные расходы по всему предприятию составляют примерно 550 у.е. в месяц, включая тарифную заработную плату всех работников. Соответственно, точка безубыточности имеет значение ровно 11 изделий в месяц.

Что касается отклонений от операционных нормативов на отдельных этапах процесса, то вариабельности здесь такова, что сегодня мы с очень высокой вероятностью укладываемся в один рабочий день на операцию. Раньше было хуже, но год назад мы ввели новую систему мотивации персонала и теперь при управлении производством исходим из приведенных выше верхних границ. Поэтому основная неопределённость связана с поступлением заказов; никогда заранее не известно, какое конкретное изделие закажут завтра.



Чтобы разобраться с ситуацией, мы попытались смоделировать работу нашей производственной системы в рамках ряда сценариев, по каждому из которых имитировалось несколько вариантов поступления заказов. Ниже приводятся данные для одной такой типичной последовательности из 24 заказов (указаны типы изделий): **2 4 4 1 2 4 3 3 1 2 3 3 2 4 1 2 3 2 1 4 1 4 1 3**. Считается, что перед началом каждого сеанса моделирования система пуста, поэтому анализ эффективности производства выполняется за период с 4-го дня эксперимента (когда теоретически может быть выпущено первое изделие) по 24-й день (когда к нам приходит последний заказ); всего 21 рабочий день или полный условный месяц.

СЦЕНАРИЙ А: как мы работали раньше

Заказы запускались в производство без задержек «день в день» по мере их поступления и обрабатывались рабочими центрами в режиме ERD (Earliest-Release-Date, то есть при наличии очереди первым обслуживался заказ с самой ранней датой запуска).

На врезке 5 приведены результаты моделирования системы при указанных условиях. Верхняя картинка (аналог диаграммы Гантта) показывает график загрузки станков, - так сказать, детальное производственное расписание, построенное «задним числом» по данным фактического прохождения заказов. Цветовая гамма соответствует изделиям разных типов: жёлтый цвет - **И1**, голубой - **И2**, зелёный - **И3**, оранжевый - **И4**. Цифры внутри ячеек обозначают номера заказов от 1 до 24. Как видно из диаграммы, за условный месяц было полностью завершено 14 заказов. При этом коэффициент загрузки станков составил около 74% (в общей сложности рабочие центры не были заняты 22 дня из $21 \times 4 = 84$ дней).

Ещё год назад мы полагали, что чем выше уровень загрузки оборудования, тем более эффективно работает предприятие в целом. Собственно, на это нас всегда и нацеливал совет директоров. Поэтому, как только поступал новый заказ, мы старались отдать его в производство в тот же день. Тем более что для трёх из четырёх типов изделий запускающим является рабочий центр **А**, а он часто оказывался недогружен. Кроме того, мы исходили из казавшегося очевидным предположения о том, что чем раньше сделать запуск, тем больше шансов выпустить готовое изделие в срок.

К сожалению, на практике выходило не так гладко. Странно, но фактическое время производственного цикла в течение месяца колебалось в очень широких пределах, примерно от 5 до 15 рабочих дней (см. средний график на врезке 5), причём от начала месяца к его концу всегда наблюдался устойчивый эффект удлинения циклов. И это при том, что общее операционное время обработки

для любого из изделий составляло всего 4 дня. Такое нестабильное поведение системы сильно осложняло отношения с заказчиками, которые требовали за 2-3 дня информировать их о датах готовности заказов.

Но и это ещё не самое плохое. Гораздо хуже было с экономикой предприятия. Дело в том, что при текущей структуре заказов и существующей технологии производства для изготовления одного изделия нужно обрабатывать заготовку в среднем по три четверти дня на рабочих центрах **A** и **D**, один день на рабочем центре **C** и полтора дня на рабочем центре **B**. Поэтому даже в том случае, когда **B** загружен на все 100 процентов, в среднем за месяц можно выпускать (21 день / 1,5 дня =) 14 изделий. А мы их и так выпускали, то есть по производительности работали на максимуме своих возможностей.

При этом, - исходя из нашей базовой экономической модели, в соответствии с которой точка безубыточности составляет 11 штук, - мы, казалось бы, должны были ежемесячно в среднем получать прибыль в размере 50 у.е. x 3 шт. = 150 у.е. Однако всю картину портило незавершённое производство, размеры которого к концу месяца обычно значительно превышали соответствующие показатели начала месяца (см. нижний график на врезке 5). Так что если принимать во внимание «эффективную» точку безубыточности, то фабрика по существу скорее работала себе в убыток.⁹

Поэтому поначалу мы очень обрадовались предложению воспользоваться новой программой оперативного управления производством. Мы связались с её разработчиками и попросили их просчитать несколько тестовых примеров. Причём для начала поставили перед ними более простую задачу, в которой вообще не было никакой неопределённости с заказами. Надо сказать, что полученные результаты нас просто обескуражили. Судите сами!

СЦЕНАРИЙ Б: применение компьютерной оптимизации

На верхней диаграмме врезки 6 представлено производственное расписание, рассчитанное оптимизационной программой для тех же исходных данных, что и в сценарии А, но при условии заранее точно известной последовательности поступления заказов¹⁰.

Из диаграммы следует, что в результате оптимизации коэффициент загрузки станков удалось повысить, хотя и незначительно (с 74% до 75%). Однако если работать по предложенному «оптимальному» плану, то за месяц можно будет выпустить не 14, а всего лишь 10 изделий (то есть даже меньше базовой точки безубыточности). При этом будут выполнены заказы 14 и 20, но не завершены поступившие раньше них заказы 8, 10, 11 12 и 13. И вообще, - как видно из среднего графика на врезке 6, - показатель времени производственного цикла

от заказа к заказу ведёт себя нестабильно и совершенно непредсказуемо. А уровень незавершённого производства в течение месяца (см. нижний график на врезке б) растёт даже более высокими темпами, чем при работе по исходному сценарию А.

Получается, что в нашем случае решение упрощённой задачи с применением оптимизационных алгоритмов давало результаты хуже тех, которые мы имели раньше без специальных компьютерных расчётов и для более сложной задачи с неопределённостью на входе. Мы не нашли ни одного серьёзного аргумента в пользу внедрения этой программы на практике.

Надо было искать какой-то другой выход, и мы принялись более детально анализировать производственный процесс с целью улучшить старый алгоритм работы, описанный в сценарии А. В частности, мы обратили внимание на то, что самые большие очереди обычно выстраиваются перед рабочим центром **В**. Это было понятно, поскольку при текущей структуре заказов и существующей технологии он является самым востребованным ресурсом, и для обеспечения максимального выхода всей системы должен быть загружен на сто процентов. Поэтому нельзя допустить возникновения ситуации, при которой в начале очередного дня ему окажется нечего делать. Значит, определённая страховка от случайности обязательно должна быть. Но нужна ли такая большая очередь непосредственно перед самим рабочим центром **В**? Ведь пока он занимается обслуживанием некоторого заказа, «на подходе» могут находиться другие задания, которым вскоре может потребоваться этот ресурс. Например, если запустить в производство изделие 1-го или 4-го типа, то уже завтра оно встанет в очередь перед **В**. А для изделия 2-го типа – уже сегодня. Так что в этих случаях страховка не нужна. Сложнее с изделиями 3-го типа; они будут добираться до **В** не меньше трёх дней. С другой стороны, если в обработке находится изделие 4-го типа (которому ресурс **В** необходим два дня подряд), то размер страховки может быть меньше. В общем, на первый взгляд, всё казалось сильно запутано.

СЦЕНАРИЙ В: как мы работаем сейчас

И тут возникла идея! А что, если перед началом каждого рабочего дня считать общее время, которое потребуется ресурсу **В** для обслуживания тех заказов, которые уже находятся в производстве? И если имеющихся в системе заказов достаточно для его загрузки, скажем, на 5 или больше дней, то запуск новых заказов временно приостанавливать? То есть применить специальный способ диспетчирования, основанный на анализе «буфера времени». А всё остальное оставить без изменений: заказы запускать в производство строго в порядке их поступления, не более одного в день, а при наличии очередей всем станкам по-прежнему работать в режиме ERD.

(7) Результаты моделирования для сценария В

Производственное расписание

A		2	3	4			6		7	8	9			11	12			14		15			17			19	20		21	22		23	24					
B	1		1	2	2	3	3	4	5	6	6	5	7	9	8	10	13	10	11	13	12	14	14	15	16	18	16	19	18	17	20	20	21	22	22	23	24	
C		1				2		3	4	5	7	6	8		9	11	10	12	13				14	15	16	17	18	19			20	21	24	22	23			
D			1						4		7	5	8		9	11		10	12	13				15		16	17	18	19			21	24			23		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38

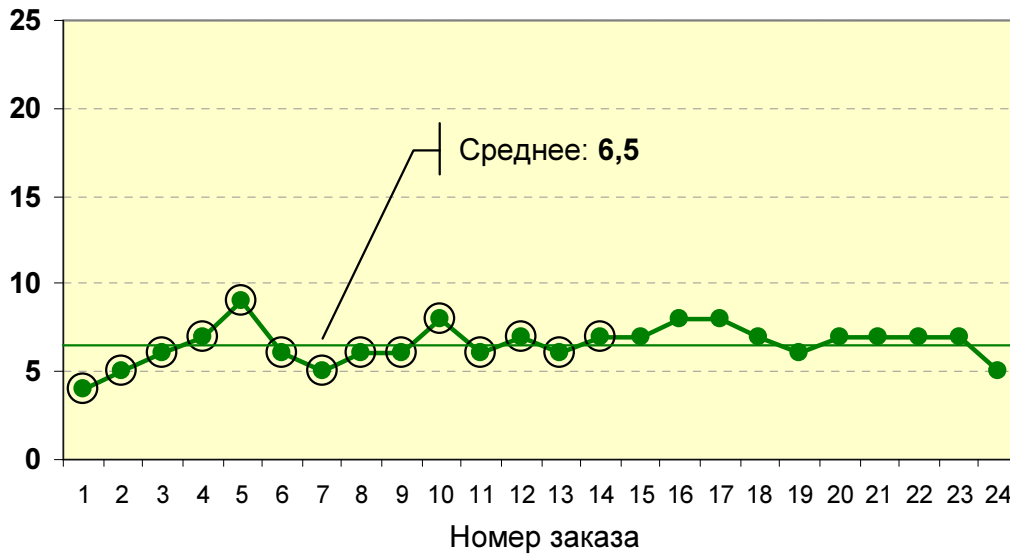
←————— Месяц —————→

День эксперимента

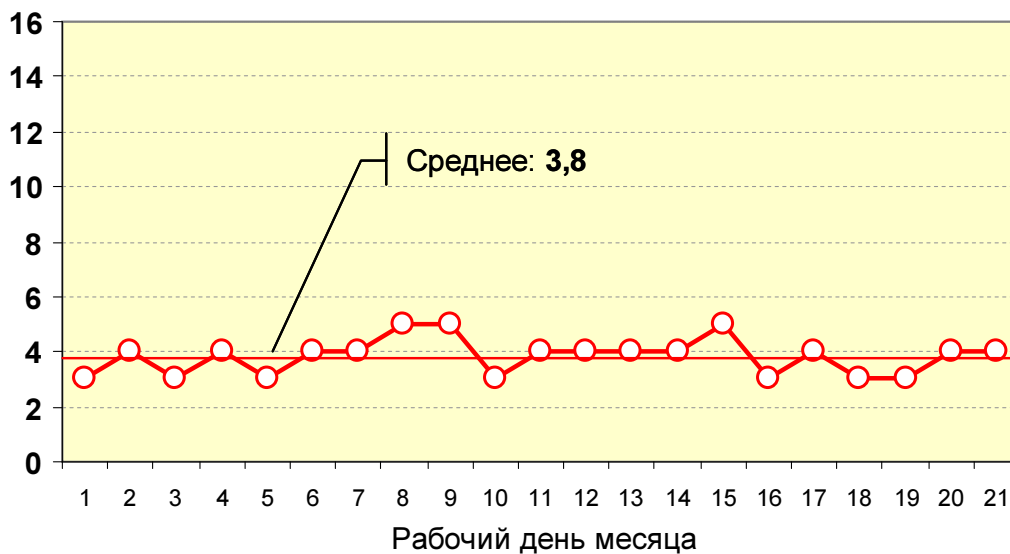
Коэффициент загрузки станков: 64%

Число выполненных заказов: 14 шт.

Время производственного цикла по заказам (дн.)



Объём незавершённого производства по дням (шт.)



Результаты моделирования данного сценария (см. врезку 7) превзошли все наши ожидания, хотя и порядком удивили. Как и раньше, производительность системы соответствовала теоретическому максимуму (14 штук в месяц), но при этом общая загрузка оборудования сократилась с 74% до 64%. Однако, как видно из среднего и нижнего графиков врезки 7, поведение системы стало устойчивым и, соответственно, предсказуемым. Теперь сразу после запуска любого заказа можно с высокой достоверностью утверждать, что он почти наверняка будет выполнен в течение восьми дней. И, кроме того, за счёт стабилизации уровня незавершённого производства наконец-то удалось выйти на плановые показатели доходности. Вот, собственно, и вся история!

ЕСТЬ ЛИ ПОЛЬЗА ОТ ДЕТАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ?

Обсуждение решили провести после небольшого перерыва. Когда все снова собираются, председатель первым начинает дискуссию:

– Ну что, коллеги, предъявленные нам сегодня результаты действительно впечатляют. Но всё же хотелось бы уточнить некоторые не очень понятные моменты. Прежде всего, это спорное, на мой взгляд, заявление докладчика о том, что детальное производственное расписание не нужны. А как же тогда планировать работу станков? Ведь по мнению известных специалистов это очень сложная комбинаторная задача и без составления расписаний тут не обойтись.

– Простите, а зачем нам заранее планировать работу станков? – отвечает вопросом на вопрос директор фабрики.

– Что значит «зачем»? Странно это слышать! А как же работать без плана? Как эффективно управлять загрузкой оборудования? Как прогнозировать сроки выполнения заказов? Как, в конце концов, устанавливать очерёдность обработки заданий отдельными рабочими центрами?

– Иными словами, план нужен для того, чтобы по нему работать. Я вас правильно понял?

– Правильно. А что здесь неясного? – раздражённо бросает председатель.

– Я всего лишь хотел уточнить вашу позицию, – извиняющимся голосом произносит директор фабрики. – Если я правильно понял, вы полагаете, что за день, за неделю или даже за месяц до начала выполнения работ можно точно рассчитать детальный график загрузки всех станков, который потом будет соблюдаться? Иными словами, можно составить такое расписание, реальность выполнения которого в момент его составления представляется достаточно высокой? Так?

– Да, так. Только я пока не улавливаю, к чему вы клоните.

– А какую вероятность выполнения подобного плана вы бы посчитали

вполне приемлемой? – задаёт очередной вопрос директор.

– Так вот вы о чём? – разочарованно вздыхает председатель. – Опять об отклонениях? Естественно, стопроцентную гарантию даёт только страховой полис. Если вас интересует именно это, то, поверьте, я прекрасно понимаю, что в условиях реального производства всякое случается. Поэтому меня бы вполне устроили 80-85 процентов.

– А что, если бы при составлении плана вам сказали, что вероятность его выполнения заведомо меньше 50 процентов?

– Ну какой же смысл составлять план, который скорее всего не будет выполнен? Вы это хотели услышать? Теперь вы удовлетворены? – ехидно усмехается председатель.

– Абсолютно. Оказывается, наши позиции полностью совпадают. Я тоже уверен в бессмысленности разработки планов, невозможность реализации которых очевидна уже в момент их составления.

– Это вы о чём? И какое это имеет отношение к нашему обсуждению?

– Самое прямое. Дело в том, что детальные производственные расписания представляют собой типичный пример как раз таких планов. И все усилия по их составлению это просто «мартышкин труд».

Присутствующие зашумели, однако председателю быстро удаётся взять ситуацию под контроль:

– Ничего не скажешь, очень смелое заявление. Надеюсь, его автор сможет убедительно обосновать свою позицию. В противном случае ... даже не знаю, как нам дальше поступать.

Директор фабрики не выглядит растерянным. Наоборот, чувствуется, что он давно ждал этого разговора и основательно к нему подготовился:

– Чтобы не быть голословным, я могу привести конкретные примеры с нашего производства. Однако сначала давайте договоримся о понятиях. Итак, как мы обычно строим производственные расписания? Точнее, какие данные необходимы для их составления?

Не дожидаясь ответа со стороны присутствующих, он продолжает:

– В самом общем случае требуются технологические маршруты движения потоков (то есть последовательность операций в привязке к конкретному оборудованию) и нормативы времени выполнения отдельных операций. Это хорошо известно. Предположим, что с первой составляющей проблем нет и все маршруты точно определены. А как насчёт нормативов времени? Знают ли уважаемые коллеги, откуда берутся соответствующие цифры?

– Мне кажется, не стоит тратить время на ликбез! – недовольно заявляет один из членов совета, когда-то работавший главным технологом завода.

– И всё же, – настойчиво гнёт свою линию директор фабрики, – мне бы хотелось, чтобы ни у кого не было на этот счёт никаких иллюзий. Ответы типа того, что нужные цифры предоставляет бюро технического нормирования, не принимаются. Вопрос, - откуда они их берут? ... А берут их обычно из разных источников. Когда производство массовое и одна и та же деталь постоянно обрабатывается на одном и том же рабочем центре, то можно провести серию измерений и по их результатам зафиксировать некоторое значение. Скажем, сделать 100 замеров, и если в каждом получилось ровно 87 минут, то данную цифру разумно будет принять в качестве соответствующего операционного норматива. Однако, как вы понимаете, в реальной жизни так никогда не бывает! Хорошо известно, что даже один и тот же работник на одном и том же станке в разные дни и в зависимости от разных обстоятельств на одну и ту же операцию тратит разное время. То есть на самом деле в результате замеров получается некоторое распределение.

Выступающий подходит к доске и рисует на ней кривую (см. врезку 8). Затем продолжает:

– Предположим, получилось от 75 до 98 минут со средним 87. Что принять за норматив? Среднее значение? Или максимальное? Или что-то между ними? На каждом предприятии поступают по-своему.

– Заметьте, что здесь достаточно большая выборка и все характеристики распределения можно оценить с высокой точностью. А если производство мелкосерийное и через рабочий центр в течение дня проходит несколько



партий разных изделий? Переналадки, изучение документации и т.д. и т.п. ... Очевидно, точность оценок падает. А если производство единичное и раньше вы это изделие вообще никогда не выпускали? В таких случаях, как известно, нормативы часто задаются «по аналогии» или, если называть вещи своими именами, берутся «с потолка». Причём обычно речь идёт только о нормативах «чистой» обработки на станках. А время передачи на следующий этап? Кто считал его? Ведь для планирования многопередельного производства важно знать, когда задание будет доступно для обслуживания на следующем этапе.

– Это к вопросу о том, какой «мусор» обычно подаётся на вход алгоритмов расчёта производственных расписаний, – всё более уверенно продолжает директор фабрики. – А ведь специалистам отлично известно, что решения соответствующих оптимизационных задач структурно неустойчивы, то есть очень чувствительны к исходным данным, и даже при незначительных их изменениях полученные результаты могут существенно отличаться друг от друга. Чего же тогда ждать в ситуации, когда точность входной информации заведомо составляет «три трамвайных остановки».

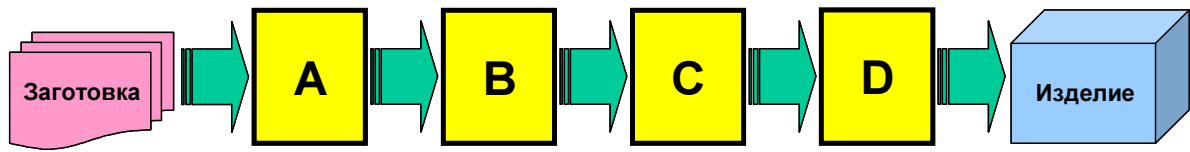
– Очень интересно и, возможно, даже в чём-то справедливо, – замечает бывший технолог. – Однако если принять достаточно консервативные оценки, то всё должно работать.

Выступающий как будто только этого и ждал:

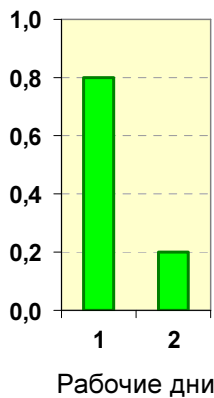
– Отлично, а теперь давайте смотреть, как это может работать на примере нашего производства. Вы знаете, что ещё пару лет назад фабрика выпускала только одно изделие **И1** с простейшим технологическим циклом: **A→B→C→D**. Были приняты нормативы - 1 день на передел, поэтому график прохождения заказов через систему выглядел просто: 1 день на **A**, 1 день на **B**, 1 день на **C** и один день на **D** (всего 4 рабочих дня на изделие). По плану предполагалось за месяц сдавать 21 изделие, однако по факту всегда выходило гораздо меньше, а время производственного цикла вместо четырёх часто составляло 8-10 дней, а иногда даже больше. Когда стали разбираться, то быстро выяснилось, что норматив соответствовал 80-процентной доле вероятности, а в оставшихся 20 процентах случаев операции на переделах занимали не один, а целых два рабочих дня. Ранее уже говорилось о решении сложных комбинаторных задач при составлении детальных расписаний. Я в этом деле не очень-то силён, но кое-какие формулы из институтского курса теории вероятностей ещё не забыл. Быстро прикинул, и вот что у меня получилось (см. врезку 9).

– Если в системе ничего нет и запустить один-единственный заказ, то при заданном распределении времени выполнения операций на каждом переделе (80-20) вероятность завершения всего заказа за 4 дня (то есть по графику) составляет приблизительно 41%. Иными словами, даже в самом идеальном и благоприятном случае она не превышает 50%. А если таких переделов больше четырёх, то вероятность выполнения заказа в запланированные сроки будет

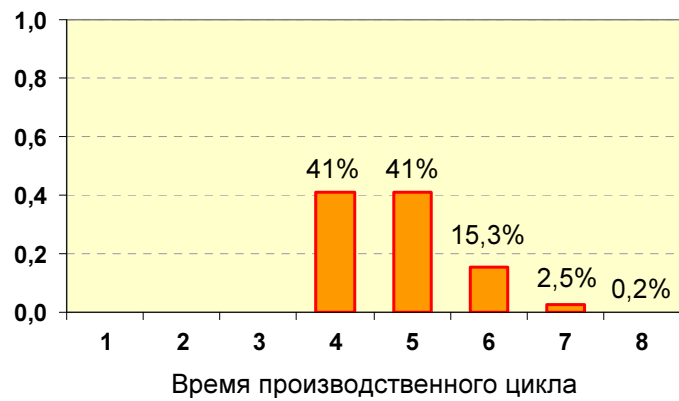
(9) Пример реализации производственного расписания: изделие И1



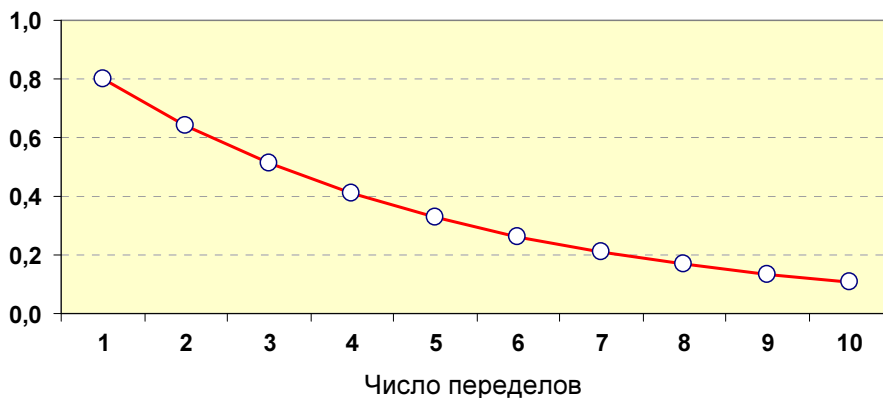
Распределение времени выполнения операции



Распределение времени изготовления одного изделия при «пустой» системе



Вероятность выполнения заказа в плановые сроки при «пустой» системе



ещё меньше; например, для десяти рабочих центров в цепочке она составит всего около 11% (см. нижний график на врезке 9).

– Если же подавать на вход непрерывный поток заготовок (по одной в день в соответствии с графиком запуска), то поведение системы кардинальным образом меняется. Готовых формул тут нет, так что приходится применять компьютерное моделирование. Типичные результаты расчётов представлены на врезке 10¹¹. Здесь на верхней диаграмме показан план в виде детального производственного расписания, а на трёх остальных - данные моделирования движения заказов по переделам. Как видно, почти все запущенные в течение

месяца заказы обрабатываются в системе гораздо дольше запланированных четырёх дней, причём примерно в половине случаев время производственного цикла составляет десять и более дней. Что же касается производительности системы в целом, то за анализируемый период (с 4-го по 24-й день работы) на выходе фиксируется всего 13-15 изделий, а никак не ожидаемая 21 штука. Не говоря уже о том, что *ни в одной из модельных реализаций не оказалось ни одного дня, когда бы фактическая загрузка оборудования совпала с плановой*. Вот и возникает, с моей точки зрения, вполне законный вопрос: а зачем нам заранее планировать работу станков? Ведь такие детальные планы в условиях реальной вариабельности и зависимости процессов никогда не выполняются! Надеюсь, что сумел достаточно убедительно обосновать свою позицию.

ЕЩЁ О НОРМАТИВАХ И ПЛАНИРОВАНИИ ПО СИСТЕМЕ «GARBAGE IN – GARBAGE OUT»¹²

Заседание совета директоров шло уже несколько часов, однако договорились не расходиться, пока не будет полной ясности по главной проблеме. Поэтому после небольшого перерыва обсуждение продолжается. Как всегда, основное направление очередному раунду дискуссии задаёт председатель:

– Ну что же, мы заслушали интригующий доклад директора фабрики. Его главный тезис состоит в том, что составление детальных производственных расписаний это бесперспективное занятие и, более того, от их применения один только вред. Есть ли другие мнения?

– Позвольте для начала задать несколько вопросов, – просит слово бывший технолог. – Во-первых, утверждение о невозможности реализации детальных планов было основано на предположении о том, что в качестве нормативов задаются средние величины или близкие к ним характеристики распределения времени выполнения операций. А если использовать максимальные значения? Помнится, в своё время мы именно так обычно и поступали.

– Хороший вопрос, – замечает автор обсуждаемого тезиса. – Для ответа на него давайте прежде всего определимся, что для нас важно: работа по заранее составленному графику или повышение отдачи от системы в целом?

– А разве одно противоречит другому?

– Как ни странно, вообще говоря, да. Дело в том, что если для нас важно работать по заранее составленному графику, то эту задачу решить не так уж и сложно. Например, в описанном выше случае в качестве норматива можно принять не 1 день, а 2 дня на операцию (максимальное значение). Тогда наши планы, действительно, *какое-то время* будут успешно выполняться. На врезке 11 представлены некоторые результаты компьютерного моделирования такой ситуации. Как и прежде, здесь на верхней диаграмме показан план загрузки станков (детальное производственное расписание), а на трёх остальных -

(11) Результаты моделирования: изделие И1, норматив $T_n = 2$

Производственное расписание

A	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	13	14	14	15	15	16	16	17	17	18	18	19	19
B			1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	13	14	14	15	15	16	16	17	17	18	18
C					1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	13	14	14	15	15	16	16	17	17
D							1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	13	14	14	15	15	16	16
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38

Реализация 1

A	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11	11	12		13		14		15		16		17		18		19		
B			1		2	2	3		4	4	5		6		7		8		9		10		11		12		13		14	14	15		16	16	17		18	18	
C					1		2	2	3		4		5	5	6		7	7	8		9		10	10	11		12	12	13		14		15		16		17		
D							1		2		3		4		5		6	6	7		8		9		10		11		12		13	13	14		14		15		16
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	

Реализация 2

A	1		2	2	3		4		5	5	6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16	16	17		18		19		
B			1		2		3		4	4	5		6		7	7	8		9		10		11		12		13		14		15		16	16	17		18	18	
C					1		2		3		4		5	5	6		7		8		9		10		11		12	12	13		14		15	15	16	16	17		
D							1		2		3	3	4		5	5	6		7		8		9	9	10		11		12		13	13	14		14		15		16
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	

Реализация 3

A	1		2		3		4		5		6	6	7		8		9	9	10		11		12		13		14	14	15		16		17		18		19	19
B			1	1	2		3		4		5		6		7		8	8	9		10		11		12		13		14	14	15		16		17		18	18
C					1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14	14	15		16		17	
D							1		2		3		4		5	5	6		7		8		9	9	10	10	11		12		13		14	14	15		16	16
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38

данные моделирования движения заказов по переделам. Соблюдение заранее составленного графика означает, что обслуживание любого заказа на любом из переделов не начинается раньше указанной в графике плановой даты. При анализе реализаций сразу же бросается в глаза большое число пустых клеток, иными словами, периодов простоя оборудования. В данном случае доля простоев составляет примерно 40% от общего ресурса производства. Однако реальная проблема состоит в том, что работая по этому плану мы сможем выпускать всего 10-11 изделий в месяц. А без плана, - как вы видели раньше (см. врезку 10), - отдача от системы почти в полтора раза выше!

– Простите, – бросает реплику председатель, – вероятно, вы оговорились, утверждая, что такие графики будут соблюдаться только «какое-то время». Неужели можно себе представить ситуацию, при которой может быть не выполнен даже столь консервативный план?

– Вы знаете, на днях я встретался со своим коллегой, директором одного из предприятий - наших поставщиков. Он мне рассказал интересную историю. Некоторое время назад они сравнили текущие показатели производства с тем, что у них было десять лет назад. В результате выяснилась удивительная

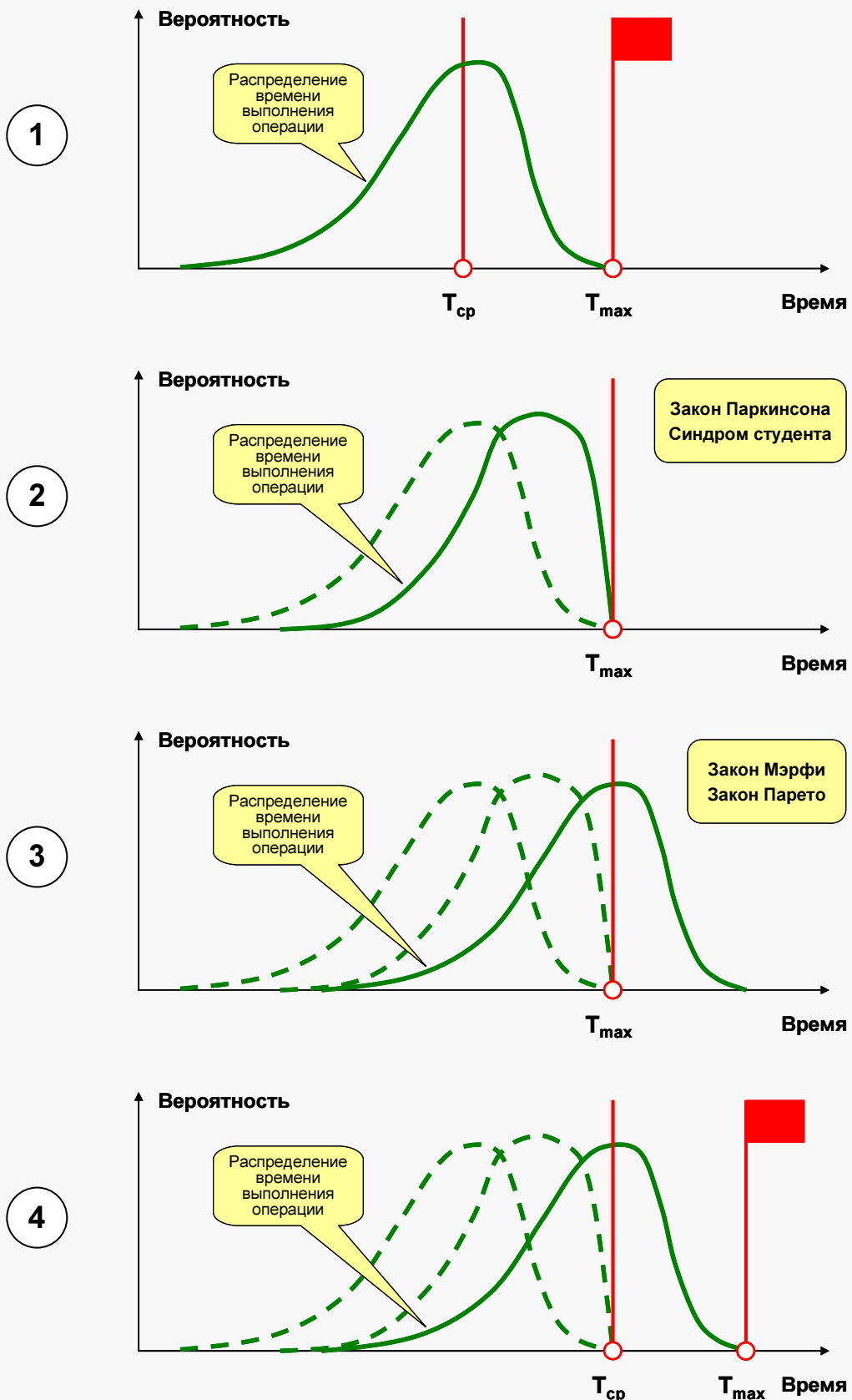
картина. Оказалось, что раньше их предприятие работало лучше. Конечно, сейчас там больше численность, много нового оборудования и выше объёмы. Но вот выпуск готовой продукции в натуральном выражении в расчёте на одного работника сегодня меньше, чем был тогда. Они проанализировали ситуацию и обнаружили парадоксальную вещь: несмотря на многочисленные мероприятия по совершенствованию производства операционные нормативы за этот же период в среднем заметно выросли.

– Как же они могли такое допустить? – неожиданно включается в разговор директор завода. – У нас, например, пересмотр нормативов проводится раз в год в плановом порядке, причём обязательно в сторону их сокращения.

– Вот и они долго не понимали, что происходит. А потом оказалось, что в промежутках между плановыми кампаниями по сокращению трудоёмкости действует обратный процесс, когда то там то здесь возникает необходимость «в виде исключения» нормативы увеличивать, - как правило, по различным временным схемам. Причём всегда находятся очень веские причины: завезли другой материал, изменились условия обработки и прочие «объективные» обстоятельства. В общем, сами знаете, как это бывает. И всем нам хорошо известно, что нет ничего более постоянного, чем временное. Поэтому в целом события развиваются циклически - по сценарию «шаг вперёд, два шага назад». Сейчас я вам покажу картинку, которую они мне подарили (см. врезку 12), где качественно описывается один из таких типичных циклов.

– График номер 1 (исходную ситуацию) я уже приводил при обсуждении вопроса, откуда появляются нормативы. Тогда за T_n для расчётов принималось значение меньше максимального (80-процентная квантиль распределения). А что будет, если в качестве норматива задать T_{max} ? Фактически это означает, что работники всегда могут выполнить операцию быстрее. Но когда они знают о наличии у них «запаса прочности», то тут же начинает действовать «закон Паркинсона» (любая работа занимает всё отведённое на неё время) и включается так называемый «синдром студента» (основная часть всех работ завершается непосредственно перед установленными сроками их сдачи). Это универсальные законы человеческого поведения. В результате вид кривой распределения меняется, и она приобретает форму, показанную на графике номер 2. Дальше совсем просто. Некоторое время, - пока значение T_{max} воспринимается как определённый психологический барьер, - всеми правдами и неправдами его удаётся не превышать. Однако рано или поздно всё равно наступают непредвиденные события (ломаются станки, изменяются режимы обработки или что-нибудь ещё). То есть проявляется «закон Мэрфи» (если какая-нибудь неприятность может случиться, то она непременно произойдёт), причём по «закону Парето» такие маленькие неприятности обычно приводят к серьёзным последствиям в виде срыва сроков сдачи самых важных заказов. Постепенно «пробой» границы T_{max} становится привычным делом и кривая распределения времени выполнения операций уверенно «переползает» через

(12) Динамика трансформации операционных нормативов



этот барьер, что отражено на графике номер 3. Наконец, остаётся сделать последний шаг - привести норматив в соответствие с новым фактическим распределением, что и показано на графике номер 4. Всё, цикл замкнулся. Добро пожаловать на новый круг.

Несколько участников заседания поднимают руки, желая высказаться. Но председатель, пользуясь правом ведущего, первым реагирует на очередную порцию прозвучавших «нестандартных» рассуждений:

– Мне кажется, наш коллега всё-таки слишком сгущает краски. Конечно, теоретически такое может происходить, но практически существует целый штат нормировщиков и контролёров, призванных следить за соблюдением установленных правил и регламентов. Насколько я понимаю, их задача как раз и состоит в том, чтобы не допустить необоснованного завышения нормативов. Выходит, что они не справляются со своей работой?

– Как раз наоборот, – спокойно отвечает директор фабрики, – прекрасно справляются. Например, у нас на производстве любое увеличение норм всегда было обосновано так, что комар носа не подточит.

– В таком случае, возможно, вы их слабо стимулировали?

– Если вы имеете в виду премии за сокращение трудоёмкости, то они их тоже регулярно получали.

– Но ведь первое противоречит второму, – недоумевает председатель. – С одной стороны, премии за уменьшение нормативов, а с другой - фактический рост этих же самых нормативов?

– Да, противоречие здесь есть, но нет конфликта. Стороны уже давно его разрешили к обоюдной выгоде. Видите ли, если вы платите рабочим по нормативам, то как они будут себя вести? Понятно как! Будут заинтересованы в том, чтобы эти нормативы были как можно менее напряжёнными. И если по нормативам работу можно делать два часа, то зачем сдавать её через час? А там, глядишь, что-нибудь сломается, работа вообще встанет и можно будет рассчитывать на сверхурочные с оплатой по повышенным ставкам. Если же делать за час, то скоро узнает начальство и срежет расценки. Вы говорите, контролёры и нормировщики Но ведь они тоже не с Луны свалились, а с теми же рабочими живут в одном доме и на соседних огородах картошку выращивают. И что для них важнее, - какие-то цифры в отчётах или хорошие отношения с соседями? Вот и получается, что сначала нормативы «громко» срезают, а потом «тихо» увеличивают. В результате довольны все.

– Постойте, но вы же сами в докладе заявляли, что сумели сократить сроки выполнения работ на всех переделах до одного дня. А раньше в 20 процентах случаев доходило до двух. То есть кривая распределения времени выполнения операций у вас сместилась в противоположную сторону. Как вам это удалось?

– Элементарно. Помните, я говорил про новую систему мотивации. Если совсем коротко, то мы вообще отменили работу по нормативам. Точнее, перестали таким образом оценивать работников, а перешли на оплату труда по конечному результату. Теперь рабочим нет смысла оттягивать завершение заданий, и чем быстрее они их сделали и передали на следующий этап, тем им лучше. При этом, если по каким-то причинам всё же не укладываются за смену, то сами остаются и не требуют оформления сверхурочных. Готов как-нибудь рассказать более подробно¹³.

– Всё это, конечно, очень интересно, – не сдаётся бывший технолог, – но давайте вернёмся к нашим «баранам». Я имею в виду производственные расписания. Согласен, что за месяц вперёд трудно предугадать, что и когда пойдёт не так. Но ведь при отклонении всегда можно пересчитать график с учётом текущего состояния дел и получить скорректированный план?

– Для чего? Чтобы через два часа узнать, что и он тоже не выполняется? Вместо того чтобы делать бессмысленную работу раз в месяц, вы предлагаете заниматься этим по несколько раз в день? Если у вас фабрика по составлению расписаний, то можете себе это позволить. А мне заказчики платят не за планы, а за готовую продукцию.

– Но я лично знаю предприятия, которые реально работают по детальным графикам и заранее составленным сменно-суточным заданиям!

– Если так, то с моей точки зрения, которая подтверждается результатами проведенных исследований, это означает только одно. Что при планировании там используются завышенные нормативы, а на самом деле в производстве есть много неиспользуемых ресурсов.

– Вы что, вообще против любого планирования? А как же тогда управлять производством?

– Я не против планирования. Я против планирования ради планирования. Более того, считаю, что в каких-то ситуациях даже составление детальных расписаний может быть оправдано. Скажем, в случае полного бардака на предприятии. Но если рациональным способом выстроить материальные и информационные потоки, да добавить к ним нормальную систему мотивации работников, то можно без этого обойтись. А вот как в таком случае управлять производством – это отдельный разговор.

КАК УПРАВЛЯТЬ МНОГОПЕРЕДЕЛЬНЫМ ДИСКРЕТНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ?

– Уже почти стемнело, а мы только добрались до ключевого вопроса, – снова берёт слово председатель. – Не хотелось бы здесь ночевать, поэтому предлагаю обсудить его быстро, хотя бы в предварительном порядке. Если в

этом будет необходимость, соберёмся специально в другой раз. Насколько я понимаю, директору нашей фабрики есть что сказать ...

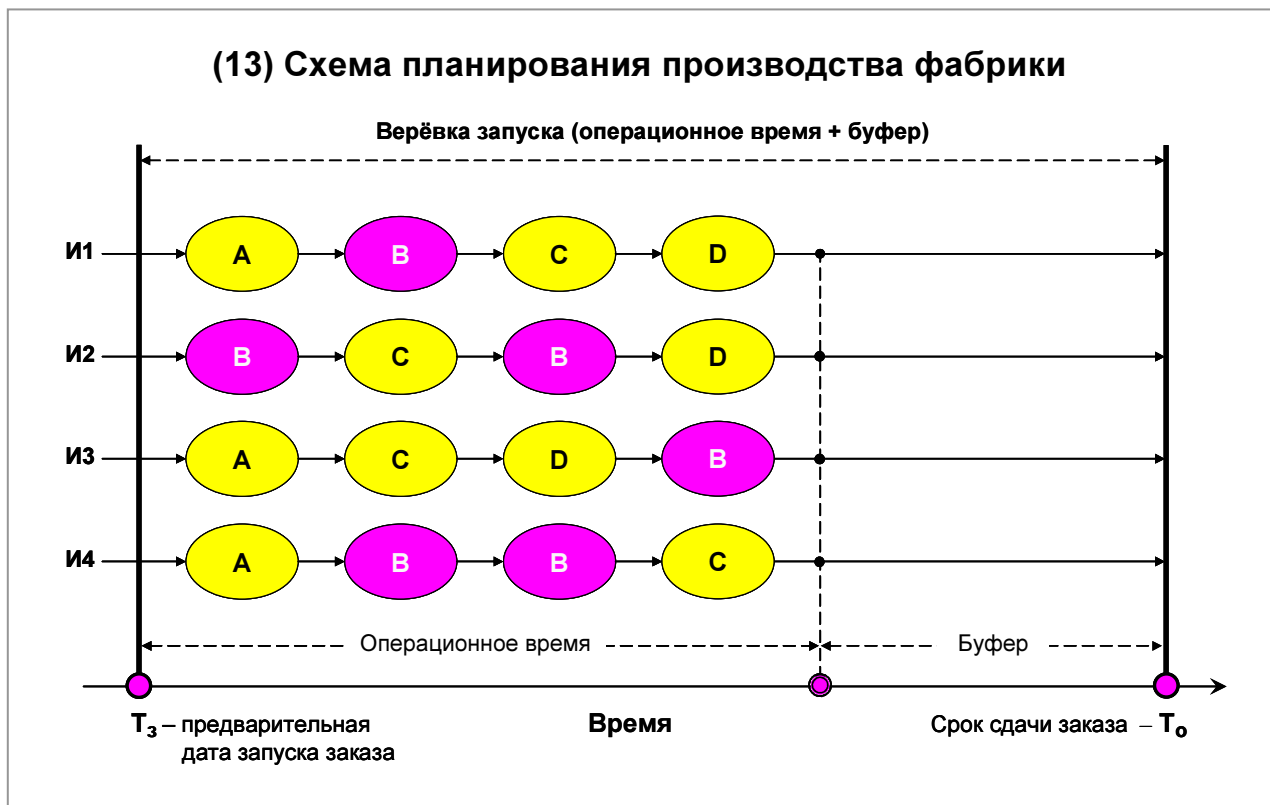
– Если позволите, попробую быть кратким, – начинает своё очередное выступление главный возмутитель спокойствия. – Прежде всего, нам следует понять, что именно *нужно* планировать и *зачем*. Как правило, когда работа идёт по заказам, то известны крайние сроки сдачи (или отгрузки) готовой продукции. Это наш главный план; мы называем его **график выпуска**. Ясно, что он нужен, и ясно - зачем. Все остальные планы должны разрабатываться таким образом, чтобы поддерживать главный. Нет возражений?

– Тогда поехали дальше. Чтобы что-то изготавливать, на входе системы должно быть исходное сырьё. Поэтому необходим ещё один план, который мы называем **график запуска**. Понятно, зачем он нужен, - для того чтобы к определённым срокам обеспечить наличие соответствующих материалов. Эти сроки фиксируются в указанном плане и, очевидно, должны быть увязаны с графиком сдачи готовой продукции. Все согласны?

– Да, но как без анализа загрузки оборудования можно заранее установить точную дату запуска для каждого заказа? – вновь атакует оппонент.

– Вы правы, «точную» дату заранее установить нельзя! Да она никому и не нужна. Надеюсь, из моих предыдущих пояснений всем стало понятно, что в условиях вариабельности и зависимости процессов в реальном производстве ничего не происходит «точно» в запланированные сроки. Неопределённость есть всегда. И её можно либо пытаться прогнозировать (то есть составлять заведомо невыполнимые деталильные расписания), либо буферировать (то есть применять укрупнённое планирование). Я предлагаю идти по второму пути.

– Поясню на примере нашей фабрики (см. врезку 13)¹⁴. Как я уже говорил, нам удалось создать такую систему управления производством, что сегодня почти наверняка все заказы выполняются за восемь рабочих дней с момента их запуска. Поэтому для определения *предварительной* даты запуска каждого заказа мы применяем обратное планирование от срока сдачи данного заказа или, как у нас принято говорить, «прокидываем» соответствующую верёвку запуска. При этом длина верёвки рассчитывается как операционное время (в данном случае это 4 рабочих дня) плюс буфер на неопределённость. На самом деле, мы ещё страхуемся и в целом на основе нашего опыта берём не 8, а 10 (4+6) рабочих дней, хотя в теории существуют и более формальные (но тоже эмпирические) правила¹⁵. Иными словами, если срок сдачи заказа известен, то нет смысла держать под него исходное сырьё за месяц. А вот за две недели (10 рабочих дней) в самый раз. Фактический запуск может происходить (и часто происходит) позже, чем это указано в графике, - в соответствии с данными ежедневного анализа другого буфера времени, о котором я тоже рассказывал раньше и который мы называем верёвкой контроля. Однако соблюдение графика запуска служит гарантией того, что главный план не будет сорван по



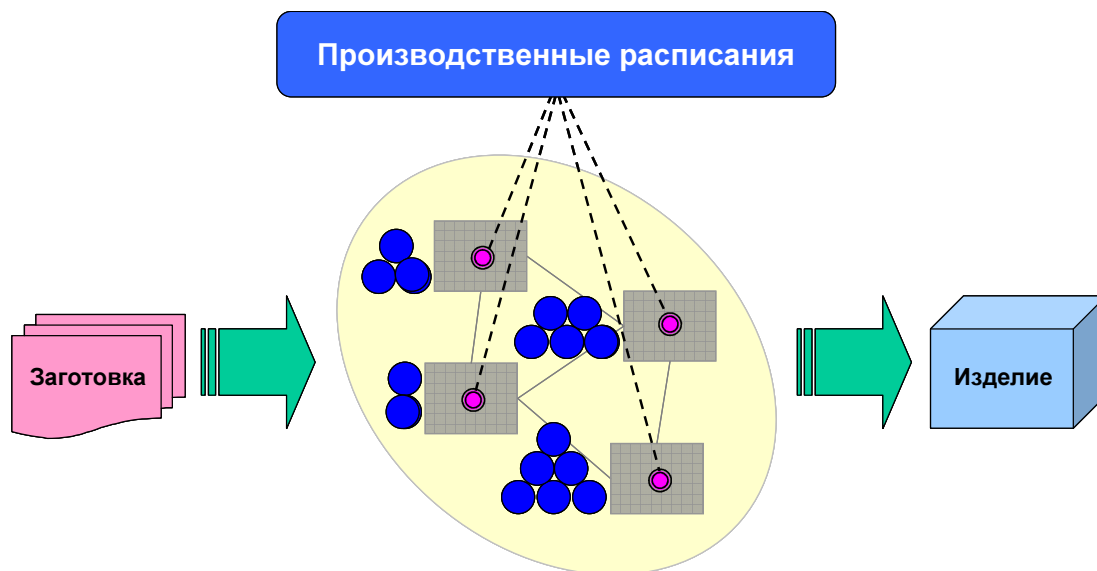
причине отсутствия необходимых материалов. Именно в этом и состоит его основное назначение. Всё, ничего больше мы заранее не планируем.

– А как быть с показателями эффективности использования оборудования? Ведь без предварительного планирования может оказаться, что станки будут недогружены!

– Представленные ранее результаты моделирования свидетельствуют о том, что по факту станки могут быть недогружены и при наличии хорошего предварительно составленного плана. Честно говоря, в такой постановке эти вопросы нас вообще не беспокоят. Потому что рост загрузки большинства станков не повышает пропускную способность всей системы в целом, а лишь приводит к накоплению внутри неё избыточных запасов незавершённого производства, что, в свою очередь, только ухудшает конечные показатели. Производственная система работает с максимальной отдачей тогда, когда эффективно используется всего один-единственный ресурс, в нашем случае – рабочий центр **В**. При этом эффективность означает, что с одной стороны этот ресурс достаточно загружен (то есть, не простаивает по причине задержек с поступлением заказов с предыдущих переделов), а с другой стороны он не перегружен (то есть, в «буфере времени» перед ним не очень много заданий). С целью обеспечения таких (казалось бы, взаимоисключающих) условий мы и применяем специальные описанные выше **механизмы диспетчирования**. На врезке 14 схематично изображены основные отличия предлагаемой модели управления материальными потоками от традиционного подхода.

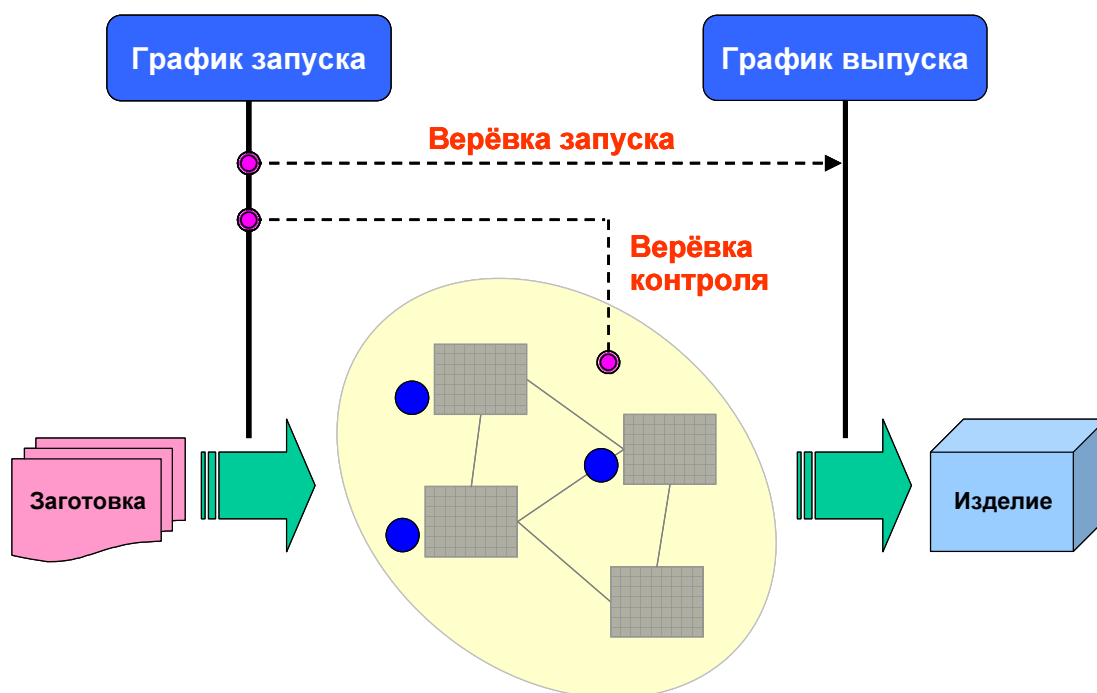
(14) Модели управления материальным потоком

I. Оперативно-календарное (детальное) планирование



- много незавершённого производства
- длительные и нестабильные производственные циклы

II. Планирование и диспетчирование по схеме S-DBR



- мало незавершённого производства
- короткие и стабильные производственные циклы

– Хорошо, вы убедили меня в том, что составление детальных планов не гарантирует соблюдение установленных сроков выпуска отдельных заказов. Кроме того, я понял, что если заказ уже находится в производстве, то время его готовности вы определяете с достаточно высокой вероятностью. Однако дата запуска это ваше внутреннее дело, а клиентам обычно важно знать сроки исполнения своих заказов в момент их размещения. Что вы им отвечаете на подобные вопросы? – интересуется один из членов совета директоров.

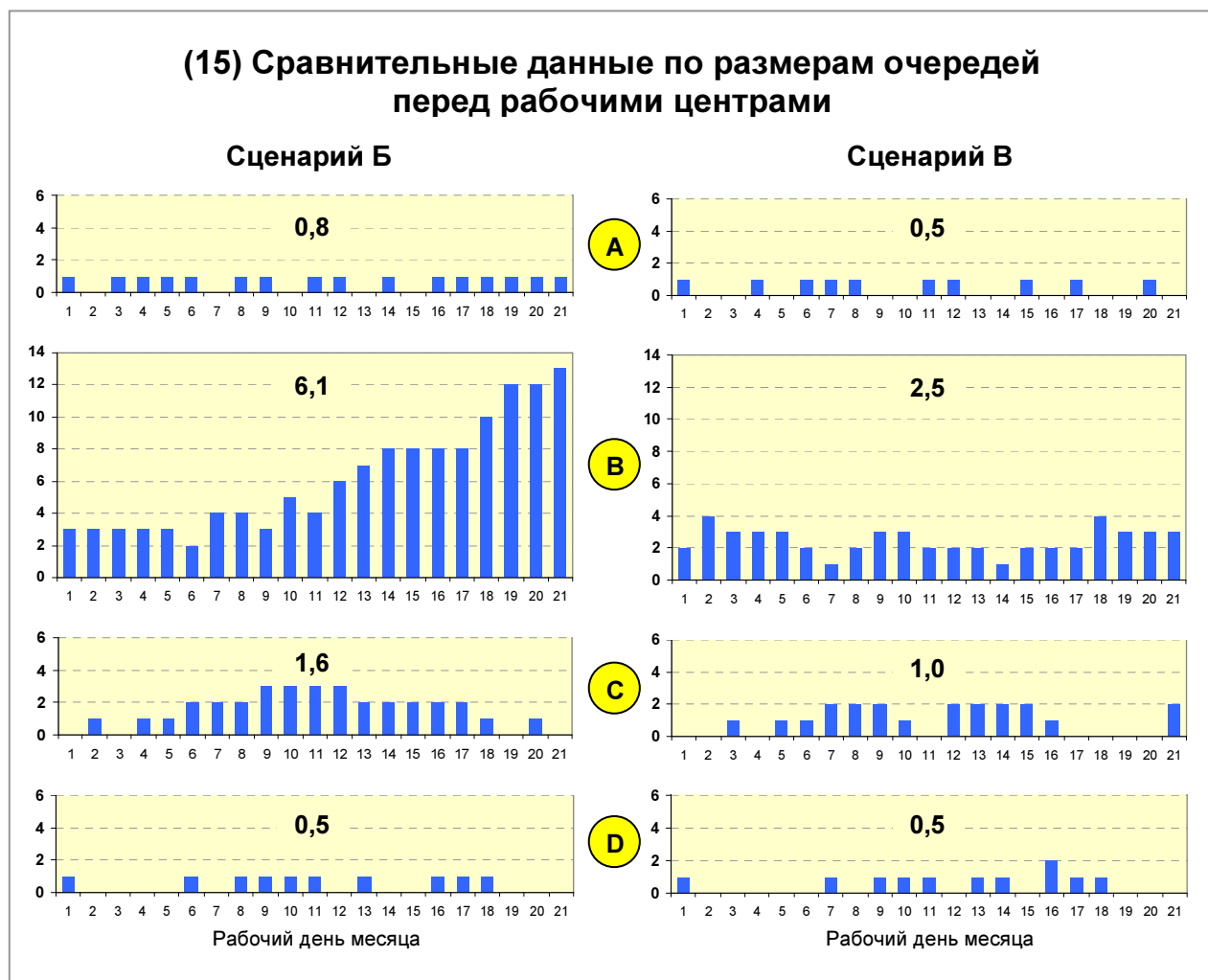
– Наша производственная система устроена так, что если запустить новый заказ сегодня, то он почти наверняка будет завершён через восемь рабочих дней. Дальше мы считаем, сколько дней работы ресурса **В** потребуют уже принятые, но ещё не запущенные в производство заказы. Допустим, что в портфеле лежат два заказа на изделие типа **И1** и по одному на изделия типа **И2**, **И3** и **И4**, то есть на $(2 \times 1 + 2 + 1 + 2 =)$ 7 дней загрузки рабочего центра **В**. Следовательно, если заказ не приоритетный и будет идти в общей очереди, то гарантированный срок его исполнения составит $(7 + 8 =)$ 15 дней. А если в портфеле пусто или запустить вне очереди, то всего 8 дней.

– Ладно, – готовится подвести итоги председатель, – будем считать, что мы как-то прояснили ситуацию с эффективностью использования станков и прогнозом сроков выполнения заказов. Осталось понять, каким образом без детального планирования вы устанавливаете очерёдность обработки заданий отдельными рабочими центрами.

– Здесь вообще всё проще пареной репы, – как в последний бой бросается директор фабрики. – За основу берётся правило ERD (первым обслуживается заказ с самой ранней датой запуска). Обычно этого бывает достаточно. Кроме того, в качестве дополнительного элемента диспетчирования потока у нас применяется специальный механизм раннего предупреждения о возможных срывах сроков сдачи готовой продукции. Мы называем его «светофором», потому что там используется цветовой код¹⁶.

– Не надо подробностей, – прерывает председатель. – Заканчивайте.

– Только одно заключительное замечание. Вопрос очерёдности обработки имеет смысл при наличии больших очередей к рабочим центрам. Раньше так было и у нас. Но после внедрения новой схемы управления производством очереди практически исчезли. А если перед станком находится всего одно задание, то вопрос приоритета просто не возникает. Для иллюстрации могу привести сравнительные данные по рассмотренным выше сценариям Б и В (см. врезку 15). Напомню, что в первом случае применялись специальные методы составления детальных расписаний с использованием компьютерной чудо-программы, а во-втором использовался алгоритм стабилизации системы, основанный на простейших правилах диспетчирования. Смотрите, - средний размер очереди за месяц во втором случае всегда ниже, и за исключением рабочего центра **В** составляет не более одного задания в день. Причём даже



для **В** эта величина почти в два с половиной раза меньше, чем по результатам компьютерной «оптимизации». ...

– Всё, завершаем дискуссию, – объявляет председатель. – Думаю, что мы достаточно подробно обсудили текущее положение дел. Надо признать, что на фабрике действительно удалось разработать и внедрить весьма оригинальную систему управления производством, благодаря которой получены неплохие практические результаты. Лично у меня осталось два вопроса. Из краткого отчёта консультантов в начале сегодняшнего заседания мы уже слышали про буферы и верёвки. Вы использовали те же подходы? И, – как вы полагаете, – можно ли распространить этот опыт на наш завод?

– Отвечая на первый вопрос, хочу признаться, что когда завод отказался от услуг консультантов, мы пригласили их к себе, – смущённо говорит директор фабрики. – Конечно, у нас были кое-какие свои мысли и соображения, но явно не хватало специальных знаний и кругозора. Поэтому, прежде всего, мы попросили консультантов познакомить нас с современными подходами к управлению производственными системами, затем предметно обсудили нашу ситуацию и совместно разработали решение.

– А что касается второго вопроса, то, с моей точки зрения, описанная выше модель управления материальным потоком прекрасно подходит практически для любого многопередельного дискретного производства.

– Но в ней же всё построено вокруг одного элемента, «узкого места», которое определяется спецификой вашего конкретного предприятия.

– А что мешает организовать подобное «узкое место» в любом другом производстве? Помните, в точности это же самое консультанты и предлагали сделать на нашем заводе?

– То есть искусственно ограничить пропускную способность системы?

– Нет, сделать систему простой в управлении, стабильной в работе и выжать из неё максимум того, на что она способна.

– Но я слышал от специалистов, что для мелкосерийного позаказного производства «узкое место» локализовать невозможно. Более того, положение таких «узких мест» со временем меняется непредсказуемым образом. Не говоря уже о том, что они могут проявляться одновременно в разных частях системы.

– Вероятно, всю эту абракадабру вы слышали от «специалистов» по составлению производственных расписаний. Дело в том, что многие путают два разных понятия: узкое место и физическое ограничение системы. Вообще, в части терминологии DBR пока ещё немало недоразумений и неоднозначных трактовок.

– И что же нам тогда прикажете делать? – интересуются сразу несколько членов совета.

– В результате общения с консультантами у меня сложилось определённое представление. Важнейшие моменты готов прокомментировать прямо сейчас, по некоторым другим могу раздать презентационные материалы.

– Хорошо, давайте, только коротко, – отвечает за всех председатель, – и на этом закругляемся.

«БАРАБАН»: узкое место или физическое ограничение?

– Как я уже говорил, часто приходится сталкиваться с непониманием разницы между узким местом и физическим ограничением. *Физическое ограничение* это такой ресурс, который объективно не позволяет системе выпускать больше продукции. При известных технологических маршрутах и заданной структуре спроса он, как правило, только один. Например, для нашей фабрики такую функцию, очевидно, выполняет рабочий центр В. *А узкое место* это любой ресурс, потребность в котором превышает его возможности. Однако необходимо иметь в виду, что оба понятия можно рассматривать только на характерных интервалах времени. Посмотрите на

последнюю показанную мной диаграмму (см. врезку 15). Для рабочего центра **D** и сценария **B** размер очереди на 16-й день составляет два задания, хотя производительность станка всего одно задание в день. То есть потребность, казалось бы, превышает возможности. Это узкое место? Конечно же, нет! Сегодня там два задания, а через три дня будет пусто. И в течение месяца этот ресурс в общей сложности загружен всего 10 дней!

– А теперь обратите внимание на рабочий центр **C**. Для сценария **B** его среднемесячная загрузка составляет ровно одно задание в день. То есть не выше его реальных возможностей. Значит, **C** не является узким местом. При правильном управлении системой так должно быть для любого физического ресурса, кроме ограничения. Но что будет происходить, если действовать в соответствии со сценарием **B**, предложенным программой расчёта детальных расписаний? Среднемесячный размер очереди перед ресурсом **C** составит 1,6 заданий в день, то есть значительно превысит его потенциал. Откуда же взялось такое узкое место? Может быть, это объективное свойство системы? Нет, его породил компьютер в результате бездумной «оптимизации». Вот так и появляются «блуждающие», «распределённые» и прочие так называемые «ложные»¹⁷ узкие места. Что же касается

– Подождите, – прерывает председатель, – дело идёт к ночи, сидим целый день и соображается уже не так быстро. Вы не могли бы это пояснить на каком-нибудь более простом примере?

Директор фабрики подходит к доске и быстро рисует схему (см. верхнюю диаграмму на врезке 16). Затем продолжает:

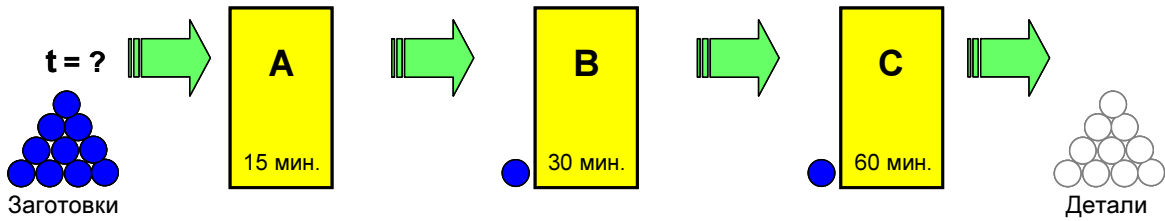
– Вот модельный пример. Предположим, что наша система, производящая из заготовок детали, состоит из трёх рабочих центров **A**, **B** и **C**. Ещё больше упрощая ситуацию, допустим отсутствие вариативности, - так что каждая заготовка сначала ровно 15 минут обрабатывается на **A**, потом ровно 30 минут на **B** и, наконец, ровно 60 минут на **C**. И пусть в начале рабочего дня перед вторым и третьим переделами находится ровно по одной заготовке. Вопрос: какова производительность такой системы, скажем, за день (8 часов)?

– Ну, здесь-то всё совершенно очевидно, – вступает в разговор директор завода. – Рабочий центр **C** это узкое место, поэтому производительность всей системы определяется его пропускной способностью, то есть за день можно сделать 8 деталей. Мы это в своё время уже проходили, только у нас больше переделов и узкое место было не в конце, а в начале процесса.

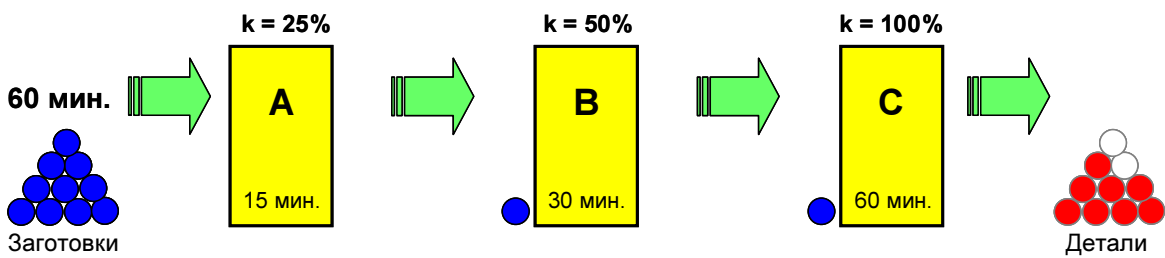
– Формально ответ правильный, однако дьявол, как известно, кроется в подробностях. В соответствии с приведенными выше определениями рабочий центр **C**, прежде всего, является внутренним физическим ограничением системы. Именно он не позволяет выпускать больше восьми деталей в день. А вот будет ли ресурс узким местом - это зависит от приложенной к нему нагрузки. Если на вход подавать по одной заготовке каждые 60 минут, то

(16) Узкое место или физическое ограничение? Модельный пример

Схема производственной системы: начальные условия, НЗП = 2 шт.

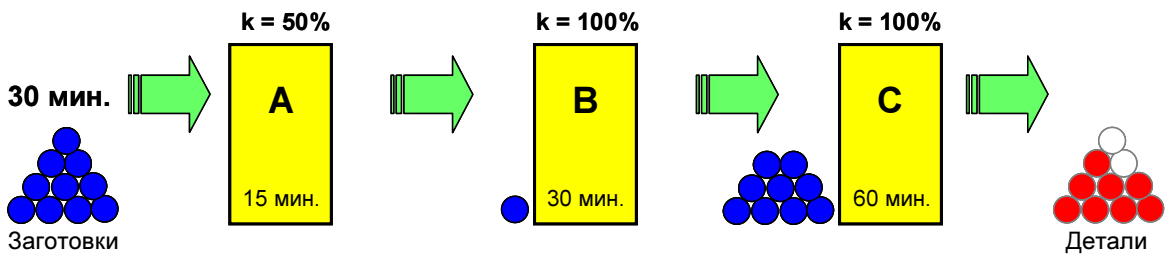


1. Одно ограничение – «узких мест» нет



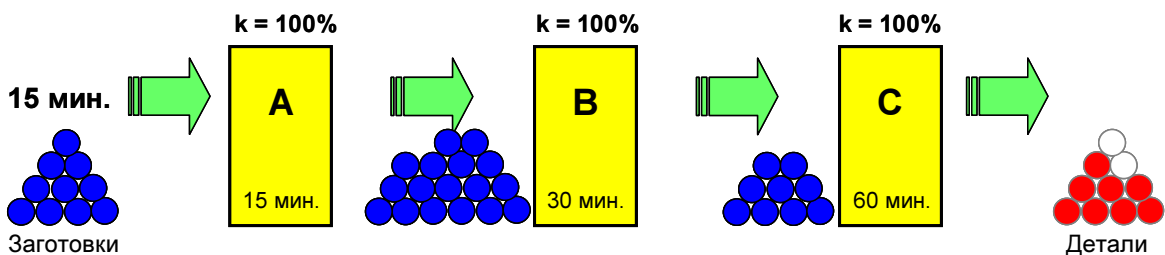
Коэффициент загрузки станков: 58%
Выпуск: 8 шт.
НЗП: 2 шт.

2. Одно ограничение – одно «узкое место»



Коэффициент загрузки станков: 83%
Выпуск: 8 шт.
НЗП: 10 шт.

3. Одно ограничение – два «узких места»



Коэффициент загрузки станков: 100%
Выпуск: 8 шт.
НЗП: 26 шт.

через восемь часов работы системы ситуация станет такой, как показано на диаграмме 1 врезки 16: на выходе будет 8 деталей, а перед каждым рабочим центром, - ровно столько же заготовок, как и в начале дня. Иными словами, уровень незавершённого производства нигде не увеличился, то есть все ресурсы справились с приложенной к ним нагрузкой и потребности не превысили возможности. Следовательно, в данном случае при наличии одного очевидного физического ограничения узких мест в системе нет.

– Ну, хорошо, нет узкого места, а есть ограничение, – возражает директор завода. – В конце концов, назовите, как хотите. Мне только кажется, что игра в слова и всякие терминологические тонкости не добавляет ничего нового к пониманию сути проблемы.

– Да, но только до тех пор, пока владельцы системы не заинтересуются «эффективностью» использования оборудования. Смотрите, общая загрузка станков составляет 58%, причём рабочий центр **В** загружен всего наполовину, а **А** вообще на четверть. Не в этой аудитории мне рассказывать, что бывает, когда озвучиваются подобные цифры.

– Что-то мне это, действительно, напоминает, – усмехается председатель. – Боюсь, я уже знаю продолжение истории.

– Естественно, «сверху» поступает указание повысить загрузку станков. И как оно реализуется? Тоже понятно как: в производство начинают запускать больше сырья. Если в нашем примере на вход системы подавать заготовки каждые 30 минут (а не 60), то через восемь часов ситуация станет такой, как показано на диаграмме 2 врезки 16: на выходе те же 8 деталей, но общий размер незавершённого производства увеличивается с 2-х до 10 штук. При этом лишние необработанные заготовки скапливаются перед ограничением - рабочим центром **С**, потребность в котором теперь, очевидно, превышает его возможности. Иными словами, **С** становится ещё и узким местом системы.

– Не понимаю, что вы хотите всем этим доказать, – начинает нервничать директор завода. – Какая разница, ограничение это, узкое место, или и то и другое в одном флаконе? Лично я не вижу принципиального отличия второй ситуации от первой?

– Принципиальное отличие есть, – неожиданно подаёт голос «скептик», молчавший почти всё заседание. – Во втором случае экономика производства в целом хуже, ведь при тех же объёмах выпуска (то есть доходах) больше затраты. Понятно, почему? Потому что часть денег будет заморожена в сырье, которое потом осядет в виде дополнительного незавершённого производства. Не говоря уже про рост операционных расходов, связанный с увеличением загрузки (то есть времени работы) оборудования. Возможно, в абсолютном выражении в определённых ситуациях затраты могут вырасти и не сильно. Но, с моей точки зрения, принципиальным моментом здесь является то, что для повышения доходности производственной системы вовсе не обязательно

что-то «делать»; иногда достаточно кое-что просто «не делать».

– Спасибо за поддержку, – говорит повеселевший директор фабрики, – но я бы хотел завершить рассматриваемый модельный пример, то есть довести ситуацию до полного абсурда. Осталось совсем чуть-чуть. Итак, нам удалось увеличить общую загрузку оборудования с 58% до 83%. Казалось бы, совсем неплохо, но вот незадача: рабочий центр **A** загружен только на 50%. А ведь это очень дорогой станок. Что же он у нас так неэффективно используется? Надеюсь, дальше всё понятно. Принимается «мудрое» решение подавать заготовки на вход системы каждые 15 минут (а не 30). В результате через восемь часов ситуация станет такой, как показано на диаграмме 3 врезки 16: на выходе по-прежнему имеем 8 деталей, но общий размер незавершённого производства увеличивается до 26 штук. При этом теперь необработанные заготовки скапливаются не только перед рабочим центром **C**, но и (в гораздо большем количестве) перед **B**. Итог: два узких места. Ясно, что экономика производства стала ещё хуже, но зато решена важнейшая задача: при каждом удобном случае можно будет рапортовать о 100-процентной загрузке станков.

– Да, развеселили, – включается председатель. – А если без юмора, то как тут можно сформулировать общий вывод?

– *При наличии единственного внутреннего физического ограничения в зависимости от способа управления производственной системой в ней можно получить одно, ни одного или одновременно несколько «узких мест».* Вот как-то так. И ещё готов предложить такое следствие: «локализация» узких мест и борьба с ними - занятия столь же бессмысленные, что и составление детальных производственных расписаний. Управлять нужно ограничениями, а не узкими местами, причём в условиях реальной вариабельности процессов при правильном управлении в системе может быть только одно узкое место, совпадающее с внутренним ограничением. Впрочем, об этом я, кажется, уже говорил.

– Вопросы есть? – обращается к присутствующим председатель. – Всем всё понятно? Или нужно время на осмысление? У вас вопрос? Задавайте.

– Здесь было заявлено о том, что схема DBR подходит для управления любым многопередельным дискретным производством, – никак не успокоится директор завода. – Как известно, у нас шесть последовательных переделов. Очень похоже на рассмотренный только что модельный пример. Однако все мощности сбалансированы и внутреннее ограничение отсутствует. Что вы можете сказать по этому поводу?

– Решение выстроить сбалансированную по мощностям производственную линию принимали вы, а не Господь Бог. Лично я изначально сделал бы всё по-другому. Примерно так, как советовали консультанты. Вы же сами сегодня утром показывали их предложения. Кстати, у меня есть материалы с более детальными данными компьютерного моделирования вашего производства.

Вот, например, результаты нескольких экспериментов (см. врезку 17). Здесь, как и раньше, один сеанс моделирования имитирует поведение системы за 30 рабочих дней, только размер очереди подсчитывается отдельно по каждому рабочему центру (в конце каждого дня, а потом за весь месяц усредняется). Средняя пропускная способность каждого станка, напомним, составляет 3,5 заготовки в день. Если средний размер очереди перед станком больше этой величины, значит потребность превышает возможности, то есть станок, по определению, является узким местом. Смотрите, что получается. У вас же тут полный набор: то одно узкое место (реализации 1, 2, 3), то два (реализация 4), то четыре (реализация 5), то пять (реализация 6). В общем, всё блуждает, плавает и размножается. Не представляю, как вы только справляетесь с таким зоопарком? На вашем месте я бы назначил внутренним ограничением системы



рабочий центр **F** и вокруг него построил всё управление.

– Зачем, когда мы и так уверены в скором успехе?

– Ну, если акционерам достаточно вашей уверенности Знаете, два года назад (когда фабрика выпускала всего одно изделие в процессе из четырёх последовательных операций) я тоже ни в чём не сомневался. А потом рынок неожиданно рухнул, и мы были вынуждены срочно осваивать производство другой продукции. На том же оборудовании стали делать три новых изделия. И про сбалансированность мощностей тут же пришлось забыть. Вы у нас в компании всего год работаете и об этом, конечно, можете не знать. А вот некоторые члены совета должны хорошо помнить те непростые времена.

– Что вы имеете в виду?

– Только одно: я бы подстраховался и выбрал такую систему управления производством, которую не пришлось бы перекраивать при существенных изменениях структуры спроса.

– В таком случае вы сами себе противоречите, ведь ваша модель основана на предположении о том, что каждый из четырёх типов выпускаемых изделий заказывается с равной вероятностью. Не так ли?

– Нет, это не так. Если внимательно проанализировать структуру наших материальных потоков (см. врезку 4), то легко понять, что рабочий центр **B** останется внутренним ограничением системы при любом распределении вероятностей поступления заказов. Вы можете спросить: а вдруг придётся выпускать новую продукцию? А если произойдёт что-то ещё, что приведёт к изменению структуры системы? Отвечу: мы уже сегодня начали готовиться к такому развитию событий и вместе с консультантами разрабатываем более универсальную модель управления материальным потоком. Как-нибудь я о ней обязательно расскажу. А пока - по порядку

«БУФЕР»: локальная или глобальная защита?

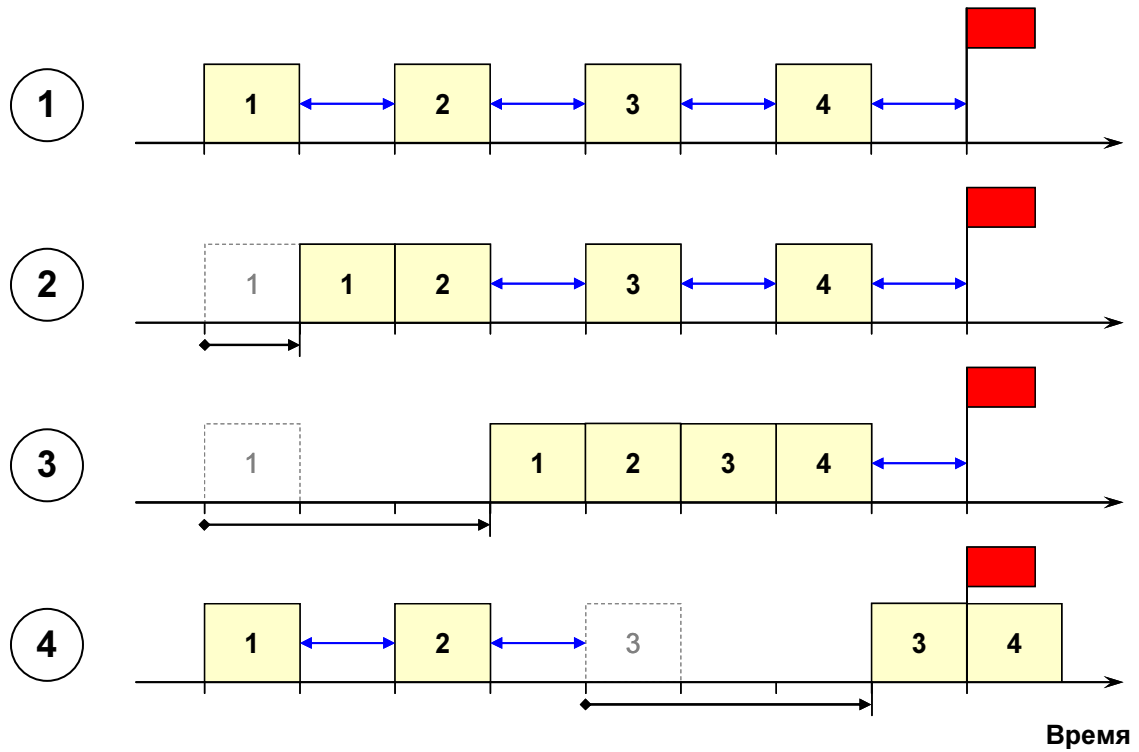
– В отличие от классического DBR (с буферами нескольких разных типов: ограничения, сборки, отгрузки)⁵ в упрощённом варианте S-DBR используется только один буфер, который мы называем **верёвкой запуска** и о котором я уже говорил при описании нашей схемы планирования. Это то *время, в течение которого задание с достаточно высокой вероятностью проходит весь путь от запускающего этапа до выхода из системы*. Должен сказать, что путаницы в понятиях здесь не меньше, чем в случае с узкими местами.

– По крайней мере, нас вы уже окончательно запутали, – бросает один из членов совета. – Вы называете буфер верёвкой, а верёвку, вероятно, потом назовёте буфером?

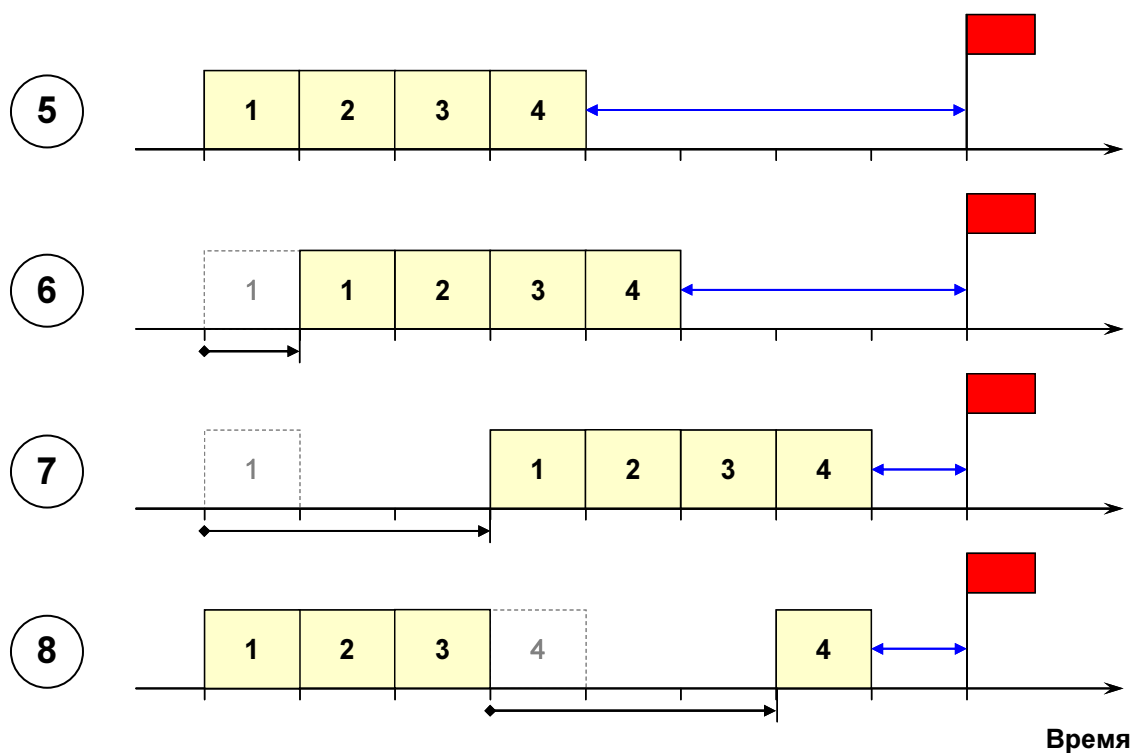
– Именно так я и собираюсь сделать. Поэтому, прежде всего, предлагаю

(18) Локальная или глобальная защита? Схема реализации

I. Повсеместная локальная защита



II. Общая глобальная защита



разобраться в содержании используемых понятий. Итак, что такое буфер? Это средство защиты от неопределённости. Если от дома до работы я обычно добираюсь примерно за час, но в очень редких случаях - в силу различных непредвиденных обстоятельств - приходится потратить почти три часа, то, чтобы наверняка не опоздать на важную встречу, я заложу на дорогу чуть больше времени.

– Ясно, но как это связано с управлением производством? – спрашивает старый оппонент, бывший технолог.

– Самым непосредственным образом. Помните, при обсуждении вопроса о выборе нормативов времени для детального планирования вы предлагали брать максимальные значения? Хорошо, если они существуют. Однако на практике это не так, и соответствующие распределения, как правило, имеют «тяжёлые» хвосты. Но если однажды вместо часа вы добирались до работы три часа, вы же не станете теперь каждый день закладывать на дорогу такую тройную защиту. Правильно? Вы же прекрасно понимаете, что подобные события случаются достаточно редко. Вот так же и на производстве. Вам известно, что операция в среднем выполняется за час, но бывали случаи, что и за три (например, из-за поломки станка). Что делать? Как подстраховаться? Не закладывать же везде по три часа? В результате вы принимаете в качестве норматива 1,5-2 часа, что соответствует 80 (90, 95, ...) - процентной квантили распределения. ...

– Конечно, на все случаи жизни подстраховаться невозможно, но 80 (а то и больше) процентов это вполне приемлемый уровень гарантий.

– Да, но такую защиту при планировании вы закладываете для каждого задания на каждом переделе. А теперь смотрите, что происходит на самом деле. На врезке 18 показан абстрактный пример: всего одно изделие, четыре последовательных операции, на каждую отводится по два часа (один час - выполнение и ещё один - страховка на случай неготовности станка к работе)¹⁸. Диаграмма 1 - план работы, в соответствии с которым изделие должно быть изготовлено через 8 часов после запуска; при этом 50 процентов планового времени это страховка. Что будет, если начало первой операции задержится на час (см. диаграмму 2)? Сработает локальная защита и дальше всё пойдёт по графику. Что будет, если начало первой операции задержится на три часа (см. диаграмму 3)? Тоже ничего страшного: если потом всё сложится нормально, то изделие выйдет вовремя. А что, если задержка на три часа случится, скажем, на третьей операции (см. диаграмму 4)? Вот это плохо: третья и четвёртая операции будут выполнены с большим опозданием, и срок выпуска изделия наверняка окажется сорван.

– Это нам, производственникам, и без абстрактных примеров понятно, – вздыхает директор завода. – Поначалу дела всегда идут хорошо, а в самом конце случается какая-нибудь неприятность ... и все усилия коту под хвост!

– Почему же вы тогда каждый этап страхуете, если такая защита всё равно не помогает?

– Неужели не знаете?

– Конечно, знаю! Но, может быть, для других озвучите, так сказать, для непроизводственников.

– Начальники участков требуют точные даты, когда к ним придёт задание с предыдущего передела. Вот и приходится на что-то ориентироваться. Тут каждый и закладывает себе небольшой «буферок».

– А зачем им эти даты?

– Говорят, чтобы заранее подготовиться. А по сути, сами знаете, чтобы потом было, чем прикрыться. Кто-то что-то всё равно сорвёт, а у других оправдание: мол, я не виноват, мне подали не по графику.

– Знакомая картина. Ещё год назад у нас было так же.

– Почему же теперь не так?

– Я же сегодня уже несколько раз объяснял, что мы больше не составляем детальных планов, не оцениваем работников по локальным показателям и перешли на оплату труда по конечному результату. Грубо говоря, сдали готовое изделие в срок - все получили, не сдали - никто не получил.

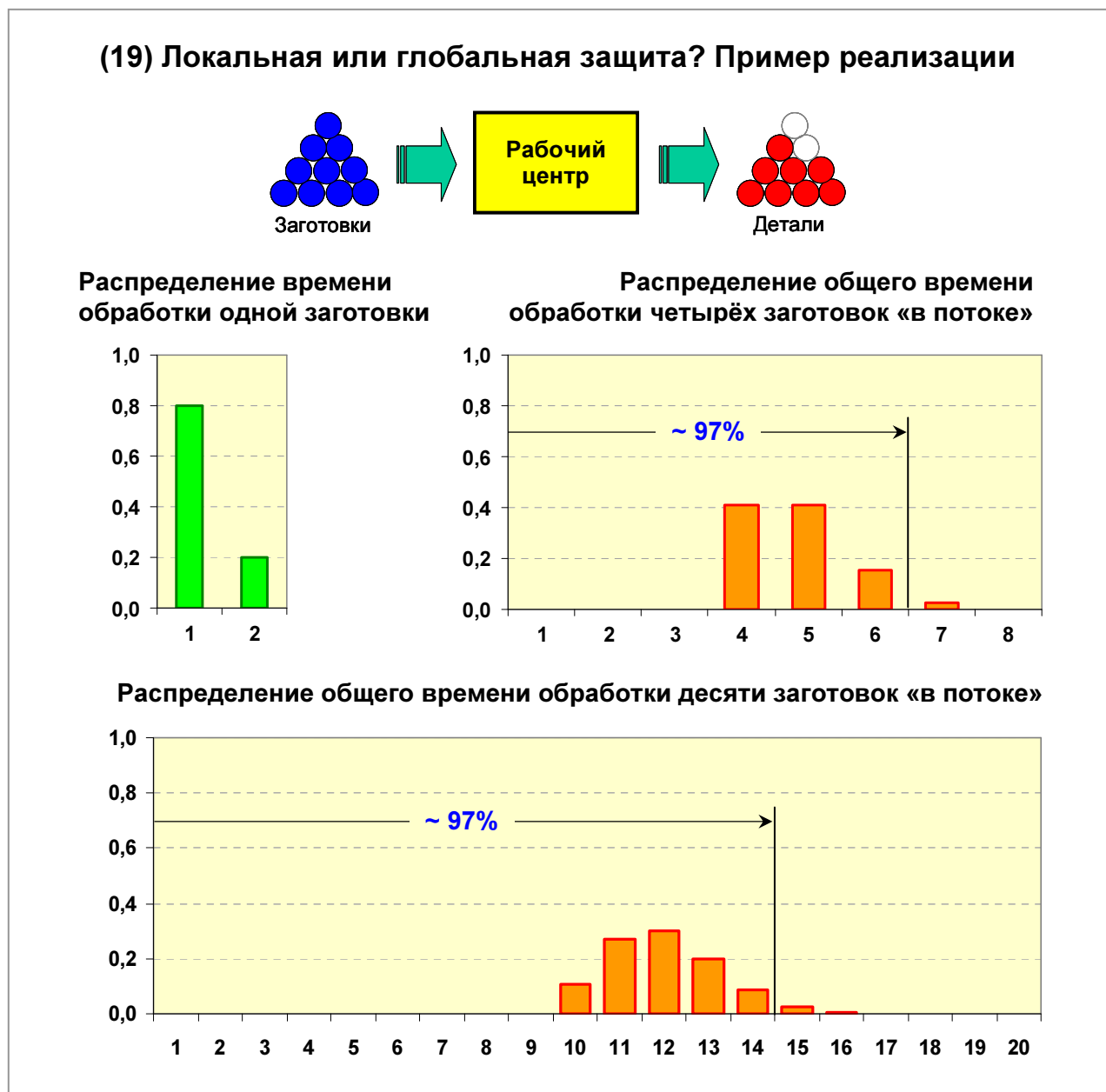
– А если срок сорвали из-за кого-то одного? А остальные при этом хорошо работали.

– Значит, нам всем не повезло. Могли бы тому одному помочь, но не справились. Но это уже другая тема. А сегодня мы обсуждаем планирование. Так вот, в S-DBR используется так называемая глобальная защита. Если в нашем абстрактном примере на врезке 18 всю локальную страховку собрать в общий буфер и разместить перед сроком сдачи изделия, то получится что-то вроде укрупнённого плана, изображённого на диаграмме 5. Что будет теперь, если начало первой операции задержится на час (см. диаграмму 6)? Из общего буфера будет «съеден» один час и ещё останется три часа страховки. Что, если начало первой операции задержится на три часа (см. диаграмму 7)? Тоже ничего страшного: останется ещё час страховки. А что, если задержка на три часа случится, скажем, на последней четвёртой операции (см. диаграмму 8)? Как видно, в отличие от локальной защиты, общий буфер хорошо срабатывает и в такой ситуации. Более того, для страховки от тех же рисков теперь нам достаточно буфера меньшего размера. Следовательно, общее плановое время изготовления изделия можно сократить, в данном случае, с 8 до 7 часов.

– Очень любопытно, – заявляет председатель, – однако, честно говоря, ваши рассуждения выглядят как-то уж слишком искусственно.

– Давайте попробую объяснить идею глобальной защиты на каком-нибудь другом примере. Помните, мы рассматривали ситуацию, когда с вероятностью

80% операция выполняется за один день и с вероятностью 20% - за два (см. врезку 9). Тогда у нас было несколько последовательных переделов, а теперь предположим, что есть всего один рабочий центр, который последовательно перерабатывает заготовки в детали (см. врезку 19). Если нам нужен график изготовления каждой детали, то придётся пользоваться локальной защитой, то есть при планировании заложить на каждую деталь по два дня. Поэтому, скажем, четыре детали по плану будут сделаны за 8 дней, а десять деталей, соответственно, за 20 дней. Однако если работать не по графику, а начинать изготовление следующей детали сразу же после завершения предыдущей, то производительность системы станет выше. Это простейшая задача из теории вероятностей. На врезке 19 приведены соответствующие распределения для суммы четырёх и десяти независимых случайных величин, каждая из которых



(20) Локальная или глобальная защита? Модель D(80-20)

Среднее значение суммы случайных величин равно сумме средних значений слагаемых.

Дисперсия суммы независимых случайных величин равна сумме дисперсий слагаемых. (Стандартное отклонение - квадратный корень из дисперсии.)

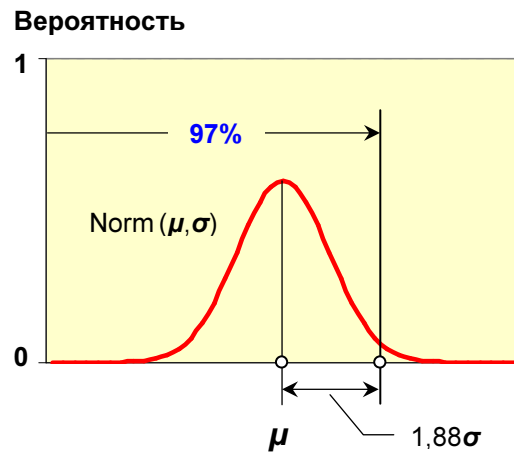
Центральная предельная теорема¹⁹: если **n** независимых случайных величин имеют одинаковое распределение со средним **μ** и стандартным отклонением **σ**, то их сумма асимптотически нормальна со средним **nμ** и стандартным отклонением **σ√n**.

Характеристики дискретного распределения D(80-20): { P(ξ=1) = 0,8; P(ξ=2) = 0,2 }; **μ₁ = 1,2; σ₁ = 0,4.**

97-процентная квантиль нормального распределения со средним **μ** и стандартным отклонением **σ** имеет значение (**μ + 1,88σ**).

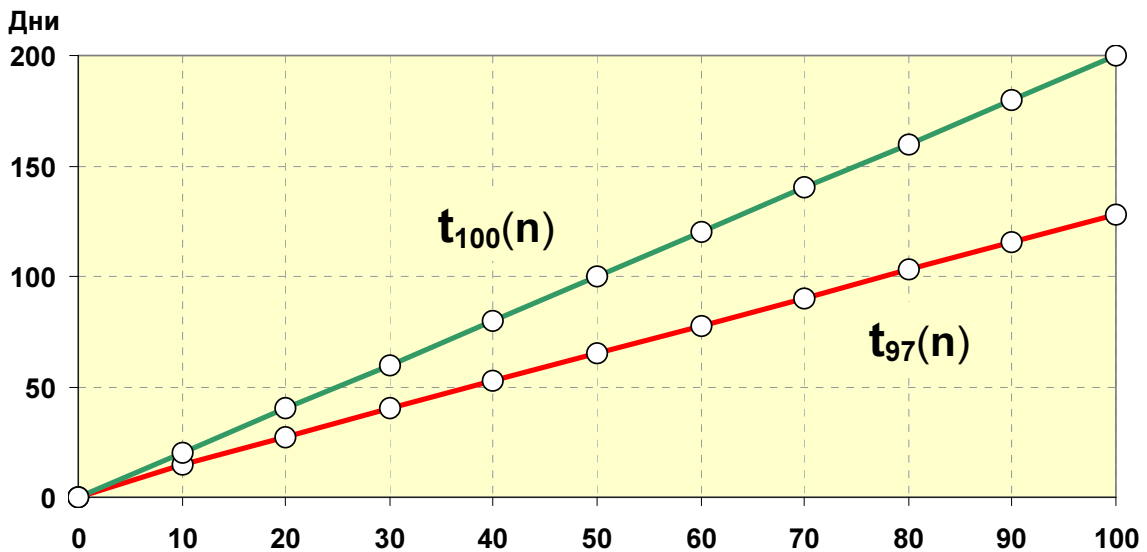
97-процентная квантиль распределения суммы **n** случайных величин со средним **μ₁** и стандартным отклонением **σ₁** асимптотически оценивается величиной:

$$t_{97}(n) = n\mu_1 + 1,88 \sigma_1 \sqrt{n} = 1,2 n + 0,752 \sqrt{n}$$



Локальная защита: пооперационное планирование, время обработки каждой заготовки 2 дня, общее время обработки **n** заготовок **t₁₀₀(n) = 2n**

Глобальная защита: при больших значениях **n** общее время обработки **n** заготовок с вероятностью 97% не превышает величину **t₉₇(n)**

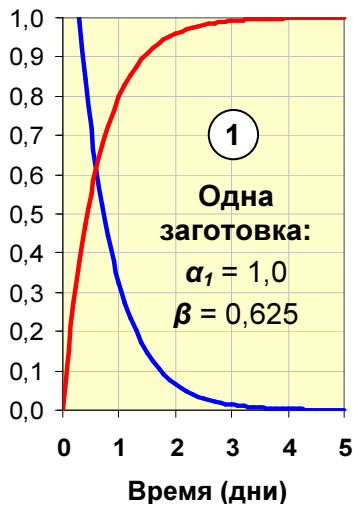


n = 10: t₁₀₀(10) = 20; t₉₇(10) ≈ 14; t₉₇(10) / t₁₀₀(10) = 0,70

n = 100: t₁₀₀(100) = 200; t₉₇(100) ≈ 128; t₉₇(100) / t₁₀₀(100) = 0,64

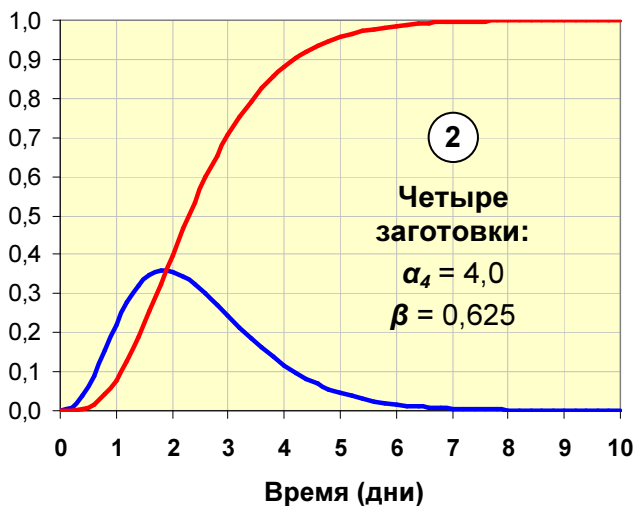
(21) Локальная или глобальная защита? Модель $\Gamma(\alpha, \beta)$

С вероятностью 80% деталь изготавливается на рабочем центре не более чем за 1 день, однако время обработки одной заготовки имеет «тяжёлые хвосты» и описывается экспоненциальным распределением с параметром $\lambda = 1,6$ (частный случай гамма-распределения $\Gamma(\alpha_1, \beta)$ с параметром масштаба $\alpha_1 = 1,0$ и параметром формы $\beta = 1/\lambda = 0,625$; см. график 1). На всех графиках синим цветом показаны плотности вероятностей, красным – соответствующие функции распределения.

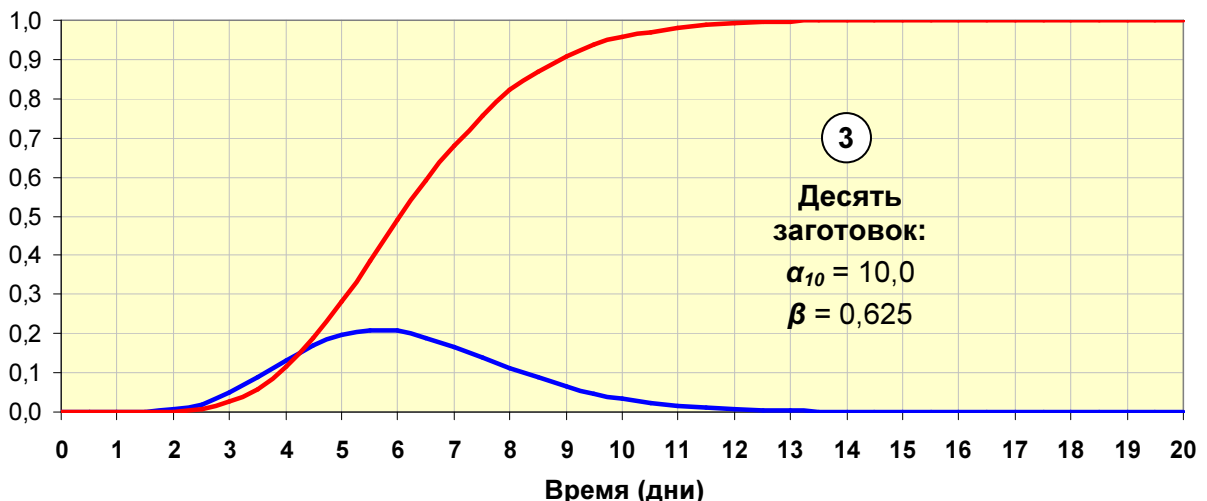


Сумма n независимых случайных величин с распределением $\Gamma(\alpha_1, \beta)$ имеет гамма-распределение $\Gamma(\alpha_n, \beta)$ с тем же параметром формы β и параметром масштаба $\alpha_n = n\alpha_1$; в нашем случае $\alpha_n = n$

Локальная защита. При 2-х дневном нормативе обработки одной заготовки (соблюдающемся с вероятностью 96%, см. график 1) четыре детали по плану должны быть изготовлены за 8 дней, а десять деталей – за 20 дней.



Глобальная защита. При обработке заготовок «в потоке» с той же вероятностью 96% четыре детали будут изготовлены не более чем за 5,1 дней (то есть за 64% планового времени, см. график 2), а десять деталей – не более чем за 10,1 дней (то есть почти в два раза быстрее плана, см. график 3).



распределена по указанному закону (80-20). Оказывается, что с вероятностью 97% (то есть почти наверняка) при втором способе работы четыре детали будут изготовлены не за 8, а за 6 дней (сокращение сроков на 25%), а десять деталей, соответственно, не за 20, а за 14 дней (сокращение сроков на 30%). Для интересующихся на врезке 20 представлены некоторые дополнительные расчёты по рассматриваемой вероятностной модели. Иными словами, общий вывод такой: *чем выше степень укрупнённости плана, тем меньше размер глобальной страховки, необходимой для его защиты от неопределённости.*

– Возможно, по теории вероятностей всё правильно, но в жизни так не бывает, – отзывается директор завода. – Трудно себе представить, что если не уложились за день, то потом всегда целый день доделывают. Это какая-то экзотика.

– Конкретные числа здесь не имеют значения. Для сравнения на врезке 21 приведен пример непрерывного распределения, описывающего похожую ситуацию. Числа другие, однако качественный эффект достигается за счёт доказанного в теории вероятностей свойства любых независимых случайных величин: дисперсия их суммы равна сумме дисперсий слагаемых. А поскольку отклонение (разброс, вариабельность) определяется квадратным корнем из дисперсии, то отклонение для суммы будет всегда меньше, чем сумма отклонений отдельных составляющих. Более того, существует так называемая центральная предельная теорема, в соответствии с которой для любых распределений слагаемых при большом числе составляющих распределение их суммы очень близко к нормальному. Обратите внимание на нижнюю диаграмму на врезке 19; даже при такой «экзотике» уже для десяти слагаемых распределение их суммы приобретает очевидную колоколовидную форму. А у нас в производствах сотни деталей обрабатываются на десятках переделов. Вот где зарыты неисчерпаемые резервы повышения эффективности.

– Очень хотелось бы, – быстро вставляет председатель, – чтобы на этой оптимистической ноте мы завершили наше сегодняшнее обсуждение. Однако, насколько я понимаю, нам предстоит продержаться по крайней мере ещё один, - надеюсь, последний, - раунд.

«ВЕРЁВКА»: синхронизация или стабилизация?

– Вообще говоря, третий элемент схемы DBR - верёвка - не имеет прямого отношения к планированию, поэтому для определённости мы называем его **верёвкой контроля**. Но это настолько важный инструмент в нашей модели управления материальным потоком, что для полноты изложения я считаю необходимым хотя бы коротко о нём рассказать.

– Ну да, мы уже поняли, что это тоже буфер, только какой-то особый, не такой как все остальные, – говорит председатель. – А кроме того, мы ещё не

забыли ваши рассуждения об эффективности использования оборудования и о том, что перед запуском очередного заказа вы предварительно подсчитываете, - я себе даже выписку сделал, - «общее время, которое потребуется ресурсу **В** для обслуживания тех заказов, которые уже находятся в производстве». Я правильно понимаю, что это и есть та самая верёвка контроля?

– Совершенно верно. Считается, что *данный механизм необходим для подстройки (синхронизации) входного потока под ритм работы внутреннего ограничения*. Идея в том, чтобы ограничение никогда не простаивало, поэтому во временном буфере перед ним всегда должно быть достаточно работы. Однако, с другой стороны, в слишком большой страховке тоже смысла нет. На практике обычно выбирается некоторая фиксированная длина этой верёвки, а дальше действует простой алгоритм: ограничение отработало, например, один день - в систему запускаются задания ещё на день его работы. Сейчас мы производим новые запуски только в том случае, если уже имеющиеся в системе заказы обеспечивают загрузку рабочего центра **В** менее чем на 5 дней. Конечно, в каком-то смысле это условность, потому что для одних заказов потребность в **В** составляет один день, а для других – два дня; так что на самом деле верёвка получается слегка «эластичной».

– А почему не 7 и не 3, а именно 5 дней?

– Мы это для себя опытным путём установили как наиболее оптимальный вариант. Не исключаю, что существуют более формальные методы расчёта, но мне они не известны.

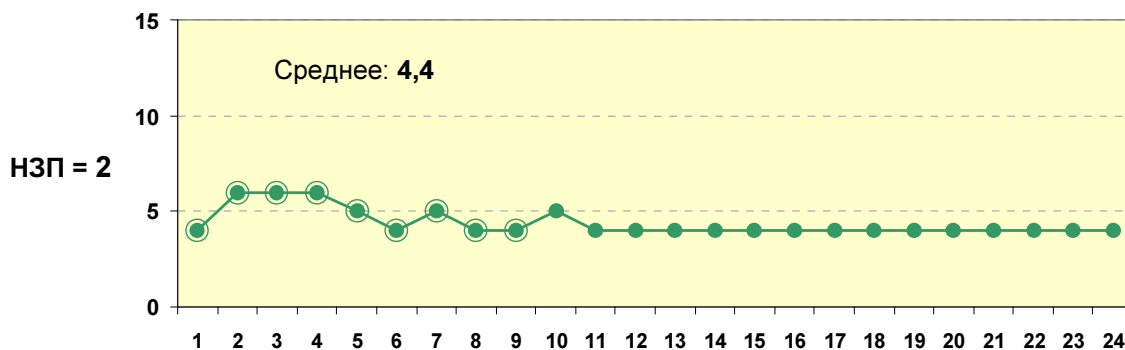
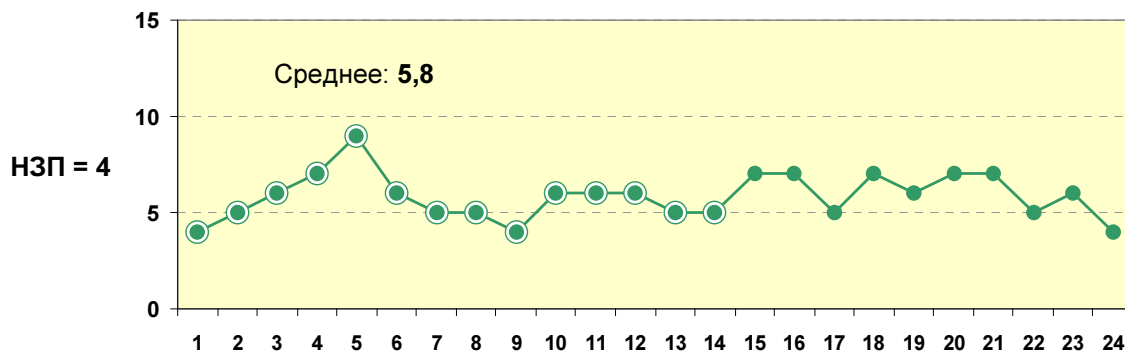
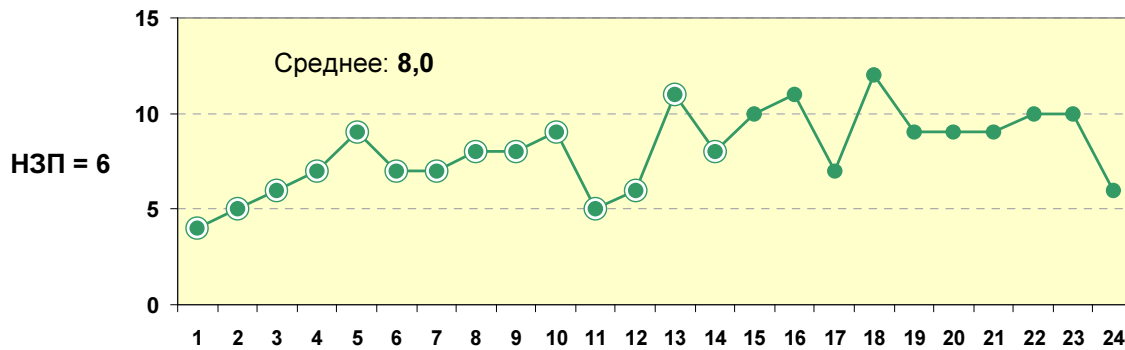
Кажется, заседание идёт уже целую вечность, все устали и некоторые члены совета откровенно поглядывают на часы. Председатель собирается подвести черту, однако в дискуссию с директором фабрики снова вступает «скептик»:

– Знаете, что меня смущает? Вы сегодня очень убедительно доказывали, что операционные нормативы это зло, и строить на них систему управления производством было бы ошибкой. Все ваши аргументы понятны и я готов с ними согласиться. Мне нравится предложенная вами модель планирования и диспетчирования материальных потоков. И, тем не менее, остаётся вопрос: как определить внутреннее ограничение в системе? Почему, например, вы решили, что для фабрики это будет рабочий центр **В**? На основании тех же самых нормативов обработки заданий по переделам? Хорошо, для верёвки запуска это не столь существенно; при предварительном планировании по схеме S-DBR положение ограничения не имеет принципиального значения. А как быть с верёвкой контроля? Ведь для анализа размера соответствующего буфера вам просто необходимы какие-то данные по временам обслуживания заданий на ограничении? И что на этот счёт говорят ваши консультанты?

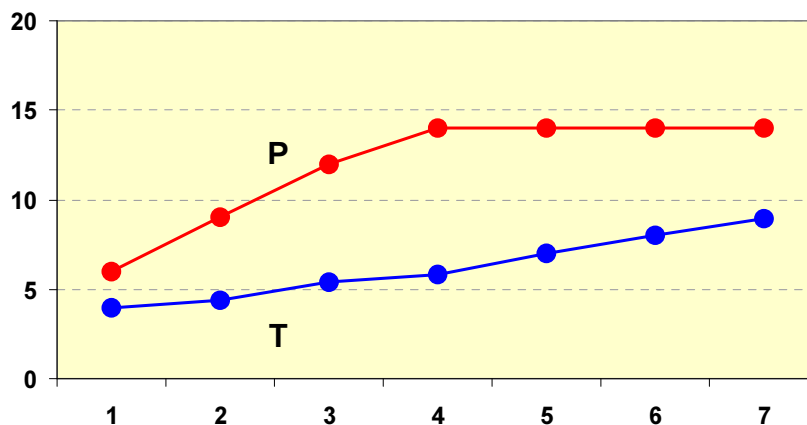
– Прежде всего, спасибо за хорошие вопросы. По поводу ограничения Должен сказать, что когда мы указали на рабочий центр **В**, то консультанты

(22) Стабилизация материального потока: пример фабрики

Время производственного цикла (Т, дн.) по заказам при разной длине верёвки контроля размера НЗП



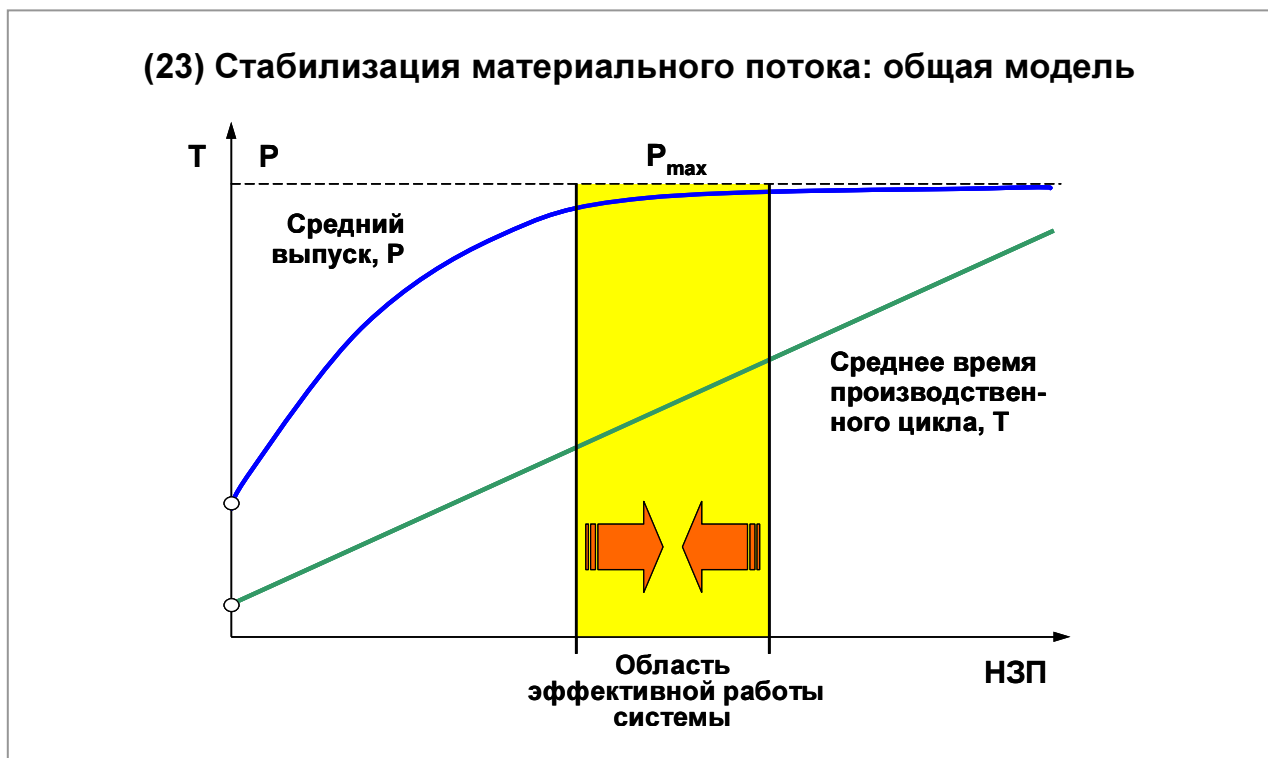
Выпуск (Р, шт.) и среднее время производственного цикла (Т, дн.) за месяц в зависимости от размера НЗП (шт.)



попросили нас не торопиться и представить себе ситуацию, когда положение ограничения заранее не известно. Их логика была примерно такой. Если на производстве, что называется, «конь не валялся», то там полно узких мест, которые «смазывают» общую картину. Поэтому для начала было предложено стабилизировать процессы. Кто-нибудь слышал про **закон Литтла**?

– Напомните, если не трудно.

– Для любой системы в условиях variability и зависимости процессов среднее время производственного цикла прямо пропорционально среднему размеру незавершённого производства. Это утверждение строго доказывается в теории вероятностей, точнее в одном из её разделов под названием теория массового обслуживания²⁰. Фундаментальная вещь, что-то типа закона Ома для полной электрической цепи. Жаль, что обычно наши производственники ничего о нём не знают. А между тем, из закона Литтла следует простой вывод: чтобы стабилизировать систему по времени производственного цикла, нужно поддерживать в ней определённый уровень НЗП. Иными словами, в качестве верёвки контроля можно взять буфер запасов, а не времени. Преимущество здесь в том, что при таком подходе нет необходимости изначально знать положение внутреннего ограничения. Если помните (см. врезку 5), при старой схеме работы время выполнения заказов у нас колебалось от 5 до 15 дней при среднем НЗП 6,8 заказов за месяц. Так что мы начали с 7 штук, и на тех же самых исходных данных сделали несколько экспериментов, последовательно уменьшая размер буфера. Задача состояла в том, чтобы «поймать» такой режим, при котором в системе останется всего одно узкое место; это и будет



внутреннее ограничение. На трёх верхних диаграммах врезки 22 показаны результаты моделирования, - данные о времени производственного цикла по заказам для разных вариантов размера буфера запасов (6, 4 и 2 штуки, соответственно). Как видно, в любом случае система ведёт себя достаточно стабильно, причём при сокращении длины верёвки контроля вариабельность уменьшается. С другой стороны, меньше и число выполненных за условный месяц заказов (на диаграммах они обозначены кружками), ведь при наличии в производстве небольшого числа заданий ограничение начинает периодически простаивать. В целом оказалось, что при высоких уровнях НЗП (6-7 штук) узкими местами становятся ресурсы **В** и **С**, а при низких уровнях (2-3 штуки) узких мест нет вообще. А в оптимальном режиме работы, - когда в системе постоянно находится 4-5 заказов, - единственным узким местом является **В**. Сводные результаты экспериментов представлены на нижней диаграмме врезки 22. Здесь кривая **Т** это ничто иное, как проявление закона Литтла, а **Р** отражает то, что иногда называют постулатом Голдратта: *средняя отдача от производственной системы не превышает среднюю пропускную способность её внутреннего ограничения*.

– Иначе говоря, – подытоживает «скептик», – в конце концов ограничение, как и ожидалось, проявилось на рабочем центре **В**.

– Да, но в данном случае при управлении системой мы не пользовались никакими операционными нормативами. Так что можем и дальше в качестве верёвки контроля продолжать применять буфер запасов. Результаты те же, но подход более общий (см. модель на врезке 23). Хотя имеются и определённые особенности. Полагаю, на сегодня уже достаточно и самое время перейти к выводам. Всем спасибо за внимание.

ВЫВОДЫ

- При наличии вариабельности и зависимости процессов (то есть в условиях почти любого реального производства) «несбалансированные» линии с одним внутренним ограничением и механизмами синхронизации потоков типа DBR эффективнее «сбалансированных» линий; они обеспечивают более высокую пропускную способность, стабильность и низкие уровни незавершённого производства.
- В условиях вариабельности и зависимости процессов предварительное планирование путём составления детальных производственных расписаний представляет собой бессмысленное занятие. Если заданные операционные нормативы меньше фактических максимальных значений, то рассчитанные по ним планы с высокой вероятностью не будут выполнены. Наоборот, если детальные планы на предприятии выполняются, то это означает лишь наличие в производстве значительных скрытых неиспользуемых ресурсов.

- При наличии одного-единственного внутреннего физического ограничения в зависимости от способа управления производственной системой в ней можно получить одно, ни одного или одновременно несколько «узких мест». Управлять нужно ограничениями, а не «узкими местами».
- Чем выше степень укрупнённости плана, тем меньше размер глобальной страховки, необходимой для его защиты от неопределённости.
- Управление любым многопередельным дискретным производством в условиях неопределённости может быть организовано по схеме S-DBR на основе укрупнённого планирования в двух критических точках (запуск и выпуск готовой продукции) с применением простых механизмов контроля общей загрузки системы и диспетчирования потоков.

ССЫЛКИ И КОММЕНТАРИИ

- 1 Статья представляет собой расширенный вариант четвёртой части старой версии заметки автора: **Жаринов С.** *О вариабельности и зависимости процессов.* – www.leanzone.ru
- 2 Цитируется по материалам интернет-дискуссии 1996 года о принципах «минимального планирования»: casparija.home.comcast.net/dweb/l63.htm
- 3 См. часть III статьи по ссылке (1), начиная с раздела **«Игра в кости»**, где приводится описание и анализ результатов компьютерного моделирования для цепочки последовательной обработки со «сбалансированными» мощностями.
- 4 См. сценарий В из части III статьи по ссылке (1).
- 5 **Детмер У., Шрагенхайм Э.** *Производство с невероятной скоростью: Улучшение финансовых результатов предприятия.* – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009.
- 6 **Youngman К. J.** *A guide to implementing the Theory of Constraints (TOC).* - <http://www.dbrmfg.co.nz/Production%20DBR.htm>
- 7 Автор признателен Михаилу Шубину за разработку соответствующего прототипа для моделирования и расчёта времени производственного цикла.
- 8 Воспроизводится один из вариантов игры в универсальное производство (Job-Shop Game), больше известной как **«симулятор Хольта»**: <http://public.wsu.edu/~engrmgmt/holt/em530/Docs/JSGLnstinfo.htm>. Экономические параметры добавлены мной в модель для полноты картины.
- 9 Эффект роста фактической точки безубыточности в системах с постоянным накоплением незавершённого производства описан в части III статьи по ссылке (1).
- 10 Несколько лет назад на одном из профессиональных Интернет-форумов рассматриваемая постановка задачи была предложена в качестве теста для сравнения различных подходов к оперативному планированию и диспетчированию

производства; здесь приводится одно из решений, полученных Е. Б. Фроловым при помощи MES-системы ФОБОС: <http://www.forum.mbq.ru/viewtopic.php?t=78&postdays=0&postorder=asc&start=0>

11 Соответствующую компьютерную модель легко запрограммировать, например, в EXCEL'e, используя встроенный датчик случайных величин.

12 **Garbage In - Garbage Out** (буквально, «мусор на входе - мусор на выходе») – ставшее классическим выражение из области информационных технологий, характеризующее эффект от применения сложных компьютерных расчётов при обработке неточных, искажённых или даже неверных исходных данных. В последнее время трансформировалось в вариант “Garbage In - Gospel Out” (буквально, «мусор на входе - священное писание на выходе»), в котором дополнительно подчёркивается слепая вера неискушённых пользователей в выдаваемые компьютером результаты.

13 **Жаринов С.** *О мотивации и демотивации работников.* – www.leanzone.ru

14 Описанная модель основана на методике **S-DBR** (упрощённая версия стандартного решения ТОС «барабан-буфер-верёвка»); см., например (5).

15 Первое эмпирическое правило определения *начальной* длины верёвки запуска: половина существующего времени производственного цикла; второе правило: утроенное время перемещения детали от запуска до выпуска в режиме экспедирования (back-to-back time); см., например, (6).

16 Имеется в виду механизм контроля, применяемый при организации управления производством по схеме **DBR**, в котором каждая верёвка запуска делится на «зелёную», «жёлтую» и «красную» зоны, а приоритеты отдельных заданий определяются степенью поглощения соответствующего буфера времени; см., например (5, 6).

17 «**Ложное**» узкое место (Apparent Bottleneck) – ресурс, который оказывается перегружен в течение длительного периода времени в результате применения неправильной политики управления материальными потоками; см. например (5). По поводу «блуждающих» узких мест в Интернете можно также найти интересную работу: **Woepfel M.** *Solving the Wandering Bottleneck Problem.* - <http://www.pinnacle-strategies.com/articles/Moving%20bottleneck.pdf>

18 Идея иллюстрации позаимствована из работы (6), однако для целей настоящей статьи постановка задачи немного изменена.

19 Приводится один из вариантов центральной предельной теоремы теории вероятностей; см., например: **Крамер Г.** *Математические методы статистики.* – М.: «Мир», 1975; с. 240.

20 См. часть III статьи по ссылке (1).