

Часть III

Зависимость процессов как мультипликатор вариабельности

**Чем ближе подходишь к сбалансированному заводу,
тем ближе подходишь к собственному банкротству.**

*Элияху Голдратт*¹⁻¹

Финансовый директор закончил свой доклад, и в зале заседаний заводского правления повисла тишина. Какое-то время присутствующие ещё находятся под впечатлением от услышанного. Только что озвученные предварительные результаты первого полугодия оказались намного хуже ожидаемых: объёмы производства опустились ниже расчётной точки безубыточности, фактическая себестоимость продукции превысила плановые показатели, да вдобавок ко всему вырос уровень незавершённого производства и постоянно не хватает оборотных средств. Конечно, о подобном положении дел все догадывались и раньше, но теперь это были уже не догадки, а конкретные цифры.

– Ну что же, давайте разбираться, как мы дошли до такой жизни, – пытаюсь сохранять оптимизм, открывает обсуждение генеральный директор. – Итак, в начале года мы приняли хорошо проработанный план, согласно которому с января завод должен был выпускать не менее 100 изделий в месяц. Учитывая потенциал нашего станочного парка, это не так уж и много. Но, как вы помните, тогда мы решили не торопиться с быстрым наращиванием объёмов, а активно заняться оптимизацией производственного процесса, прежде всего, выстраиванием материальных потоков. Хотя заказчики готовы были покупать до 180 изделий ежемесячно.

– Экономическая модель нашего производства представляется достаточно консервативной, – добавляет финансовый директор, – и в соответствии с ней мы рассчитывали на прибыль даже при объёмах производства порядка 85-90 изделий в месяц (см. врезку 1). Но по факту за прошедшие полгода средний выпуск составил чуть больше 80 штук. Хотя, действительно, в марте удалось сдать почти 100; но затем в апреле снова был провал. Деньги на закупку заготовок выделяются в полном объёме, а производство явно не справляется.

– Если говорить про материальные потоки, то новая схема их организации полностью реализована, – берёт слово начальник производства. – Как всем хорошо известно, основной процесс у нас состоит из шести последовательных переделов. Поэтому за основу был принят подход, применяемый на Тойоте и многих других так называемых «бережливых» предприятиях, при котором все мощности по потоку должны быть строго сбалансированы. Раньше случались проблемы на запускающих операциях, но после ввода в эксплуатацию NCX-10 вся производственная цепочка окончательно оптимизирована.

Экономическая модель производства в условных единицах (1)**ДОХОДЫ**Отпускная цена конечного изделия:

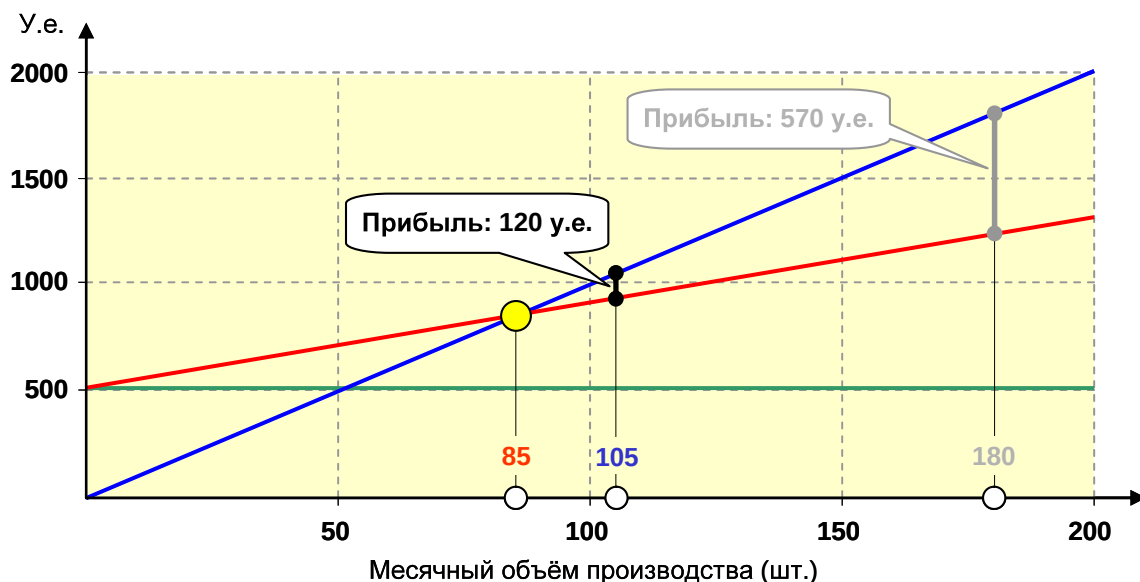
$$C_1 = 10 \text{ у.е./шт.}$$

РАСХОДЫПеременные затраты (покупная цена заготовки):

$$C_2 = 4 \text{ у.е./шт.}$$

Постоянные затраты (за месяц):заработная плата производственных рабочих (60 у.е. на каждом переделе)-
(60 у.е. x 6 переделов) = 360 у.е.

накладные расходы – 150 у.е.

Всего: $C_0 = 510 \text{ у.е.}$ Точка безубыточности: $N_0 = 85 \text{ шт.}$ Максимальный спрос: 180 шт. 

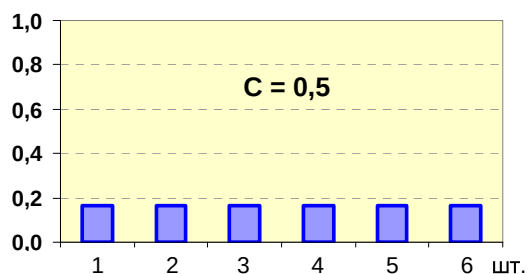
– Мы исходили из условия, – поясняет начальник производства, – что средняя пропускная способность нашей системы должна составлять примерно 105 изделий в месяц (на всякий случай, чуть больше плана) или 3,5 штуки в день. Именно с такой средней скоростью от смежников поступают заготовки, и на такую среднюю производительность настроены все станки.

– Ничего не понимаю! – раздражённо реагирует генеральный директор. – Если производственная цепочка выстроена самым оптимальным образом, всё сбалансировано и на вход подаётся 105 заготовок в месяц, то почему же тогда на выходе всего 80? Значит, что-то не так происходит внутри самой системы. Вероятно, где-то ошиблись в расчётах. Или не выдерживаются начальные настройки. Как вы контролируете производительность станков?

Пример моделирования производственного процесса (2)

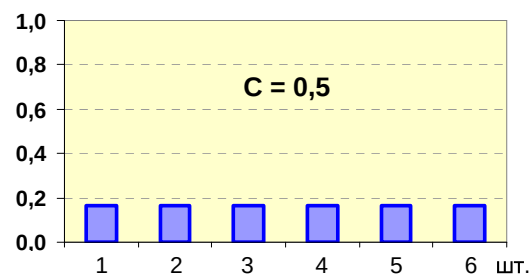
Модель входного потока

Вероятность

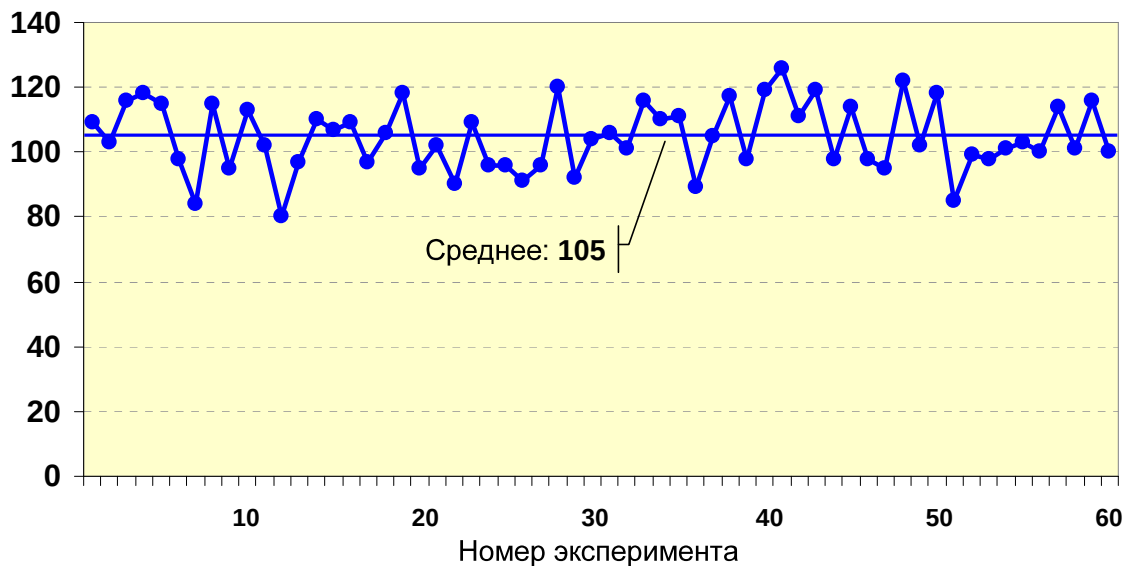


Модель выходного потока

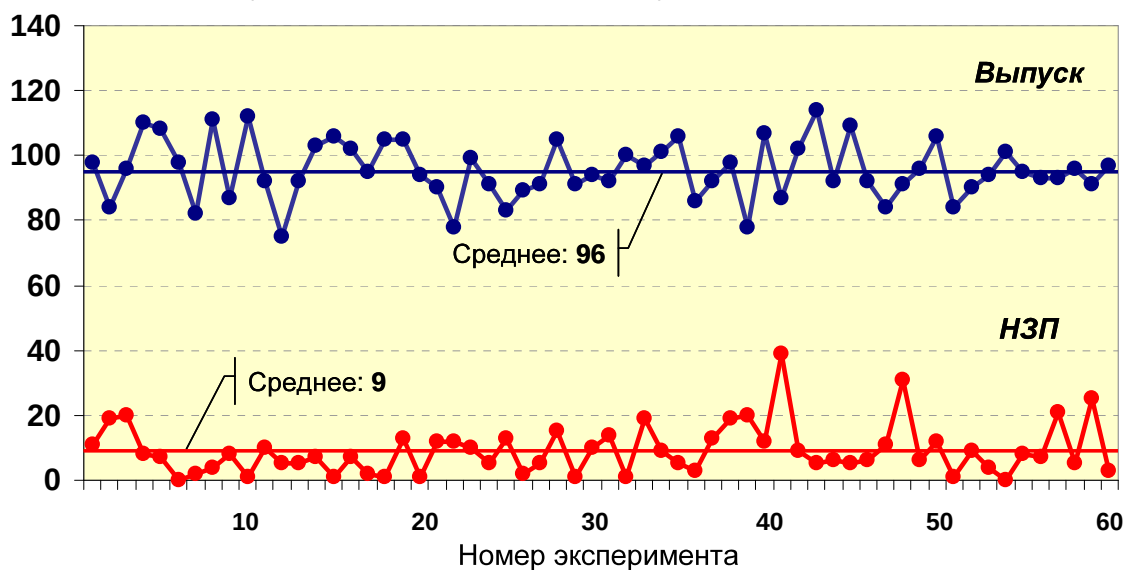
Вероятность



Результаты моделирования (поступление заготовок за месяц, шт.)



Результаты моделирования (выпуск и НЗП за месяц, шт.)



– Контроль производительности ведётся в постоянном режиме. Время выполнения каждой операции на каждом станке фиксируется, и по окончании каждого месяца формируется сводный отчёт. Результаты практически всегда одинаковы: среднее время обработки из месяца в месяц составляет примерно 2 часа 17 минут на операцию, то есть те самые 3,5 штуки за смену.

– Но ведь наверняка имеются и отклонения, и простои, и поломки?

– Всякое случается. Часто бывает так, что на каком-то станке могли бы за день сделать и 6 штук, а заготовок подошло всего 3. Бывает и наоборот, - заготовок много, а станок вышел из строя. Но время обработки всё равно, - как подтверждают отчёты, - выдерживается на заданном уровне.

– ??? (Пауза; присутствующие пытаются осмыслить сказанное.)

– Мы и сами голову ломаем, чтобы разобраться в ситуации, – продолжает начальник производства. – Даже дали задание одному молодому специалисту просчитать это всё на компьютере. Так сказать, смоделировать поведение нашей производственной системы. Вот что у него получилось (см. врезку 2). В начале каждого рабочего дня на вход с равной вероятностью поступает от 1 до 6 заготовок; за смену система может с равной вероятностью изготовить от 1 до 6 изделий. Просчитано 60 вариантов, в каждом из которых проигрывался месяц (30 дней) работы системы. Компьютер говорит, что средний выпуск должен быть около сотни, причём довольно часто – даже больше. А мы до ста вообще никогда не дотягиваем. Да и незавершёнки у нас обычно раз в пять больше, чем показывают эти расчёты. Так что, скорее всего, либо модель неправильная, либо наш специалист где-то накосячил.² ...

ИГРА В КОСТИ

Как же на самом деле разобраться в ситуациях, подобных изложенной выше? Попробуем для этого воспользоваться известной «игрой в кости» (dice game), первоначально описанной Эли Голдраттом в его знаменитом бизнес-романе «Цель»¹⁻². Существует много как «ручных»³, так и компьютерных вариантов её реализации⁴.

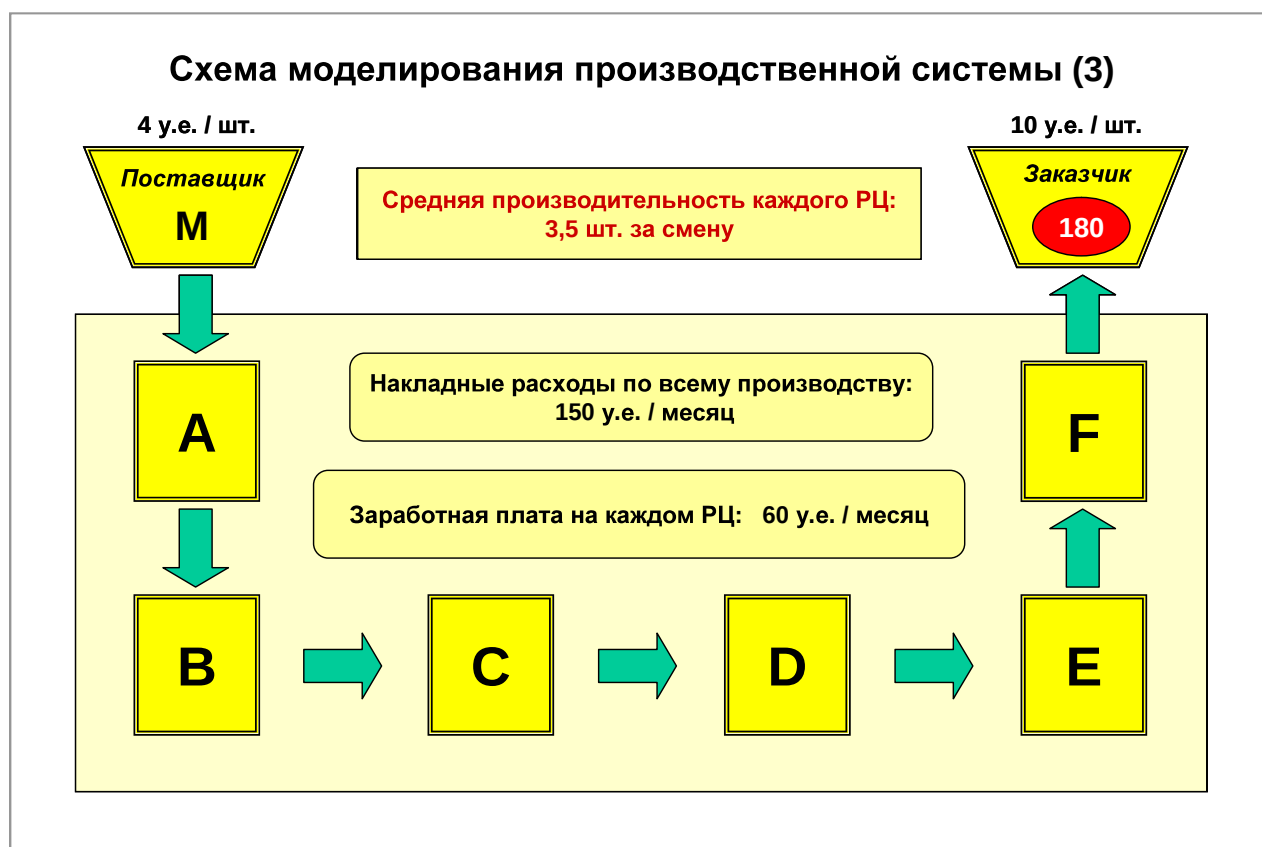
Поскольку наше производство содержит шесть последовательных переделов, то давайте рассмотрим простую модель, схема которой приведена на врезке 3. Будем считать, что моделируемое предприятие выпускает одно-единственное изделие, которое изготавливается в процессе последовательной обработки одной заготовки на шести рабочих центрах: **A** → **B** → **C** → **D** → **E** → **F**. При этом выполняются следующие условия:

1. От поставщика **M** с равной вероятностью приходит от 1 до 6 заготовок в день (в среднем 3,5 штуки). Все поступившие за день заготовки в самом начале следующего дня перемещаются в буфер-накопитель перед рабочим

центром **А**. День поступления заготовки на рабочий центр **А** считается днём запуска соответствующего изделия.

2. Производительность каждого из рабочих центров с равной вероятностью составляет от 1 до 6 заготовок в день (в среднем 3,5 штуки). При этом в течение дня могут обрабатываться только те заготовки, которые находятся в буфере перед соответствующим рабочим центром на начало данного дня. Все обработанные за день заготовки в конце этого же дня перемещаются в буфер перед следующим по маршруту рабочим центром, а после обработки на рабочем центре **Е** в виде готовой продукции сразу же отправляются заказчику. День обработки заготовки на рабочем центре **Е** считается днём выпуска соответствующего изделия.
3. Работники разных рабочих центров не взаимозаменяемы; производство работает ежедневно в одну смену по 30 дней в месяц.

Для полноты картины на схеме врезки 3 указаны экономические показатели, соответствующие модели доходности бизнеса описанного выше предприятия. Если случится невероятное и поставщик, а также каждый из шести рабочих центров будут ежедневно действовать с максимальной производительностью (ровно 6 штук за смену), то за 30 дней можно будет выпускать по 180 готовых изделий и тем самым полностью удовлетворять потребности заказчика. При этом рентабельность предприятия составит почти 50% (см. врезку 1).



Однако руководители завода исходят из реальной ситуации. Они вынуждены считаться с тем, что заготовки приходят от поставщика партиями, размер которых день ото дня меняется, причём в среднем даже немного превышает текущие потребности производства. Здравый смысл подсказывает им, что организация материального потока по схеме «сбалансированных» мощностей может обеспечить среднюю производительность всей системы на уровне $(3,5 \text{ шт.} \times 30 \text{ дней}) = 105$ изделий в месяц. В таком случае прибыль будет хотя и не слишком впечатляющей, но зато гарантированной. Руководство отдаёт себе отчёт в том, что при возникновении непредвиденных обстоятельств в какие-то периоды времени выпуск может оказаться даже ниже отметки в 85 штук (расчётной точки безубыточности). Но полагает, что в другие, - более удачные периоды времени, - эти разовые убытки должны быть компенсированы. Не говоря уже о том, что падение объёмов производства больше чем на 20% от среднего значения представляется маловероятным. Если уж не 105, так 100 штук должны сделать наверняка!

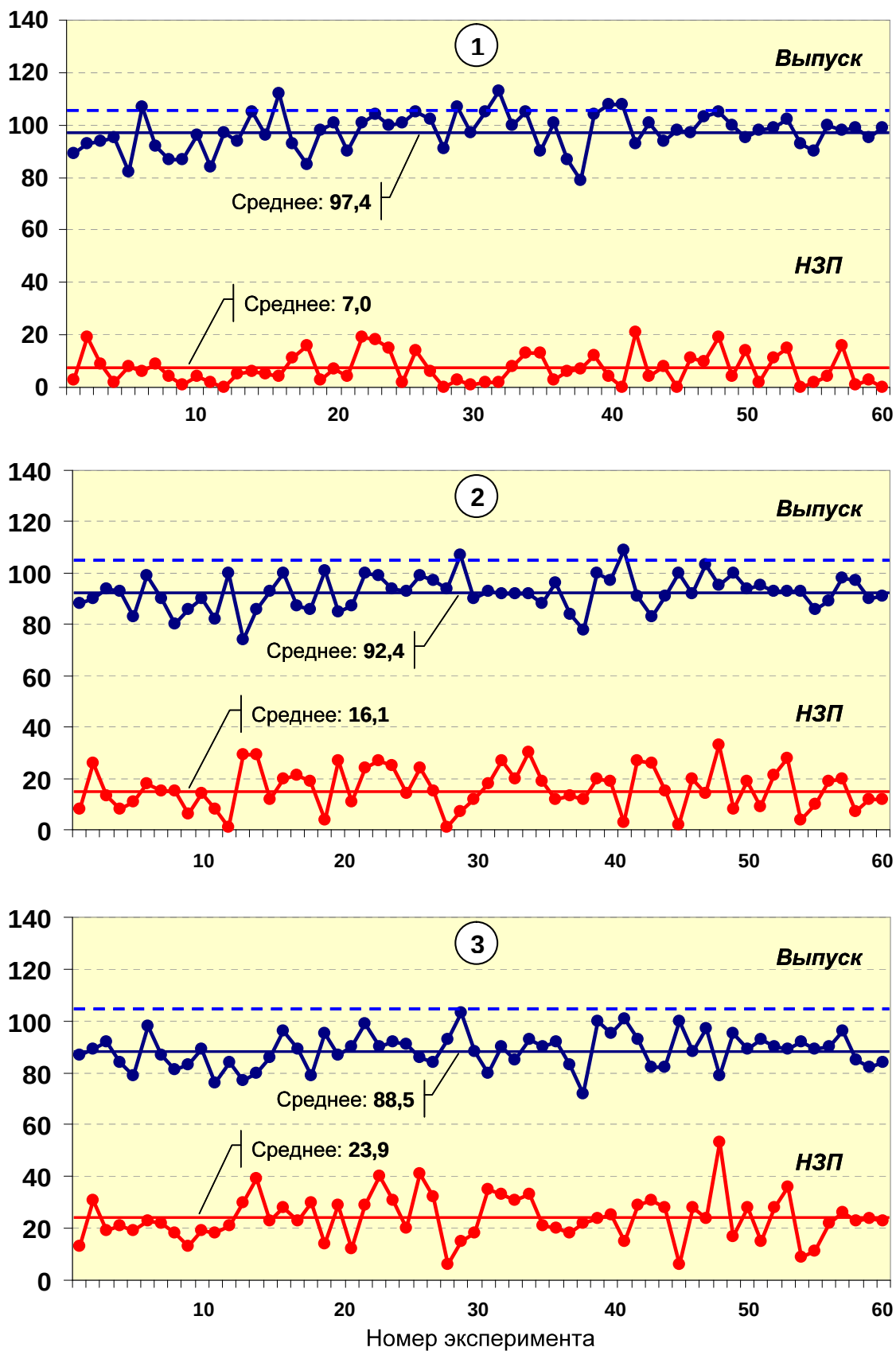
Кажется, производственники правильно учли влияние случайных факторов и построили вполне адекватную модель доходности своего бизнеса. Так что, по всей видимости, причины низких фактических показателей деятельности их предприятия не следует связывать с внутренней структурой системы. Но, тем не менее, проведём несколько компьютерных экспериментов, описывающих функционирование нашей простой модели при указанных выше исходных условиях⁵.

Один сеанс моделирования имитирует поведение системы за 30 рабочих дней. Выполняется 60 независимых сеансов, в каждом из которых для каждого рабочего центра подсчитывается общее число обработанных за месяц заготовок и фиксируется размер очереди (количество заданий в буфере-накопителе) в конце 30-го дня работы. Предполагается, что перед началом первого дня в буферах рабочих центров **В**, **С**, **Д**, **Е** и **Ф** всегда находится по 4 заготовки (чуть больше средней производительности), поэтому начальный уровень НЗП в системе в точности равен двадцати.

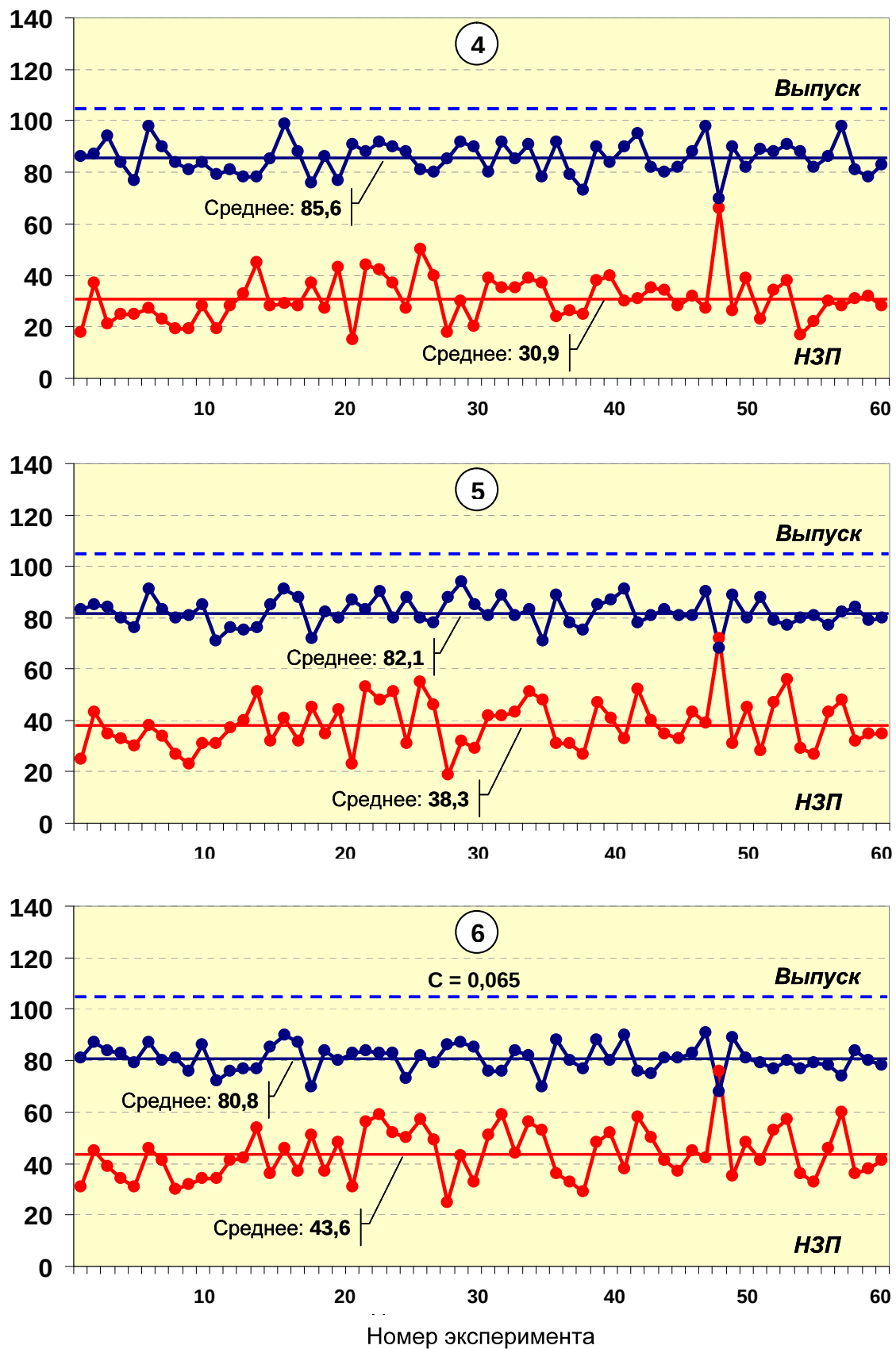
Результаты моделирования представлены на врезках 4 и 5. На графике под номером 6 показаны данные по выпуску и незавершённому производству для всей системы в целом (6 рабочих центров); на графиках 1-5 приведены те же данные, но для случаев, когда система состоит, соответственно, из одного, двух, трёх, четырёх или пяти рабочих центров. Пунктирной линией на всех графиках отмечен средний уровень входного потока 105 штук.

Итак, что же получается? Характеристики графика под номером 1 в целом соответствуют данным моделирования, которое в своё время провёл молодой специалист завода: среднемесячный выпуск составляет чуть меньше 100 (96-

Результаты моделирования для исходного сценария (4)



Результаты моделирования для исходного сценария (5)



98) изделий и в отдельные месяцы довольно часто оказывается больше сотни; размер НЗП, как правило, не превышает 20 единиц (среднее 7-9 штук).

Но это только в том случае, когда вся наша система представляется в виде одного-единственного рабочего центра со средней производительностью 3,5 штуки в день. В действительности их шесть. И результаты моделирования однозначно свидетельствуют о том, что с ростом числа рабочих центров в цепочке средний уровень выпуска устойчиво сокращается, а уровень НЗП в системе столь же устойчиво растёт. Как видно из приведенных графиков, уже при четырёх рабочих центрах в системе ежемесячная производительность никогда не превышает отметку 100, а для шести рабочих центров её среднее значение составляет чуть больше 80 штук с коэффициентом вариабельности $C = 0,065$. При этом размеры незавершённого производства в последнем случае нередко приближаются к 60-ти, а в среднем оказываются больше 40 единиц. Не правда ли, - очень похоже на показатели, которые фиксируются нашими производственниками на описанном выше предприятии.

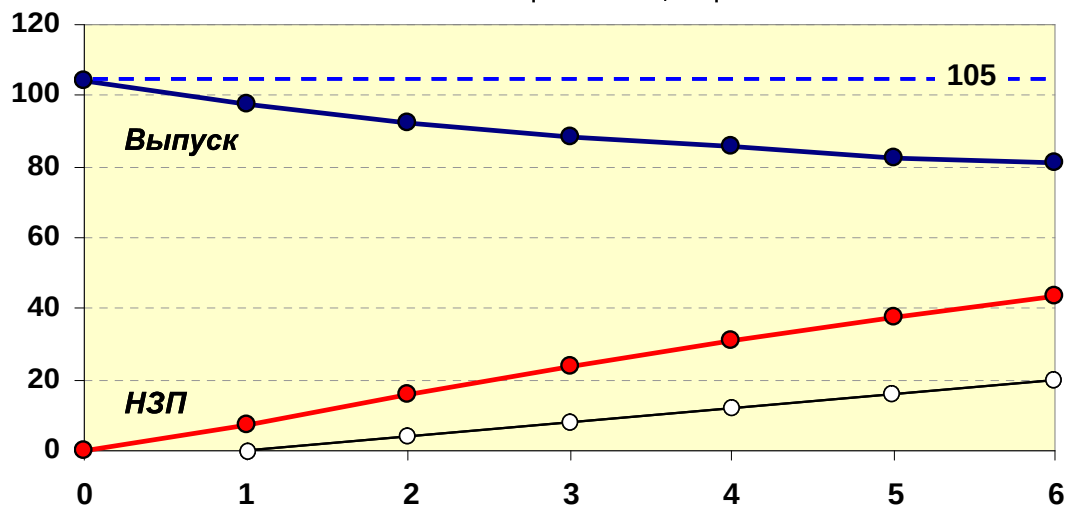
Для иллюстрации эффекта мультипликации вариабельности в системах с последовательной обработкой на врезке 6 приведены дополнительные данные, полученные по материалам выполненного компьютерного моделирования. На верхнем графике отражена зависимость среднего выпуска и среднего размера незавершённого производства от числа рабочих центров в цепочке. Пустые кружки на этом графике указывают начальный уровень НЗП (по 4 единицы на каждый рабочий центр кроме первого).

Если бы вариабельность в системе отсутствовала, то каждый рабочий центр перерабатывал бы в течение дня все имеющиеся в своём буфере заготовки (скажем, ровно по 4 штуки за смену), общее время производственного цикла с момента запуска заданий на рабочем центре **А** составляло бы ровно 6 дней, а объём незавершённого производства оставался бы постоянным на уровне 20 единиц.

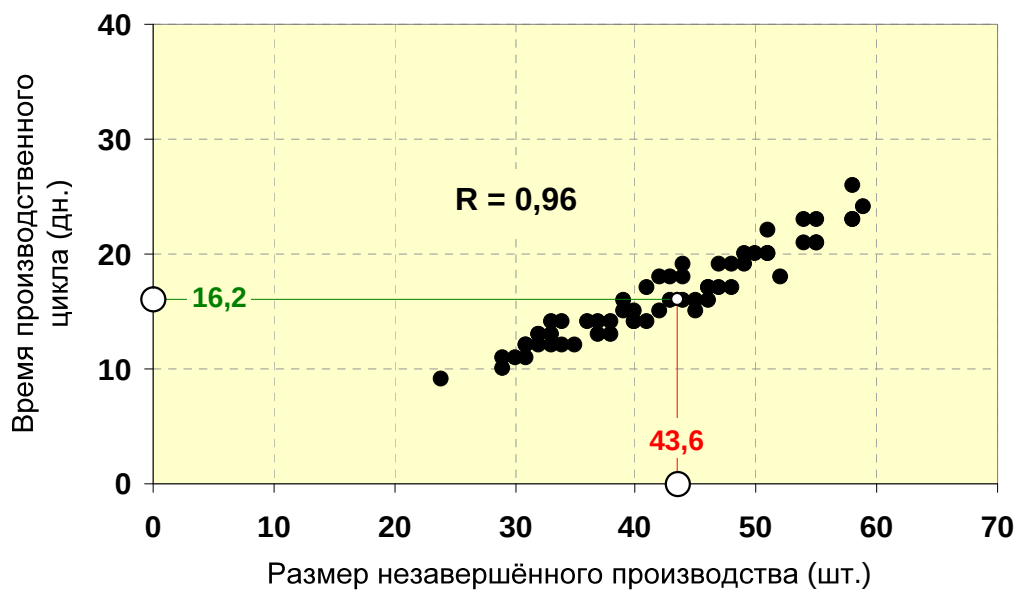
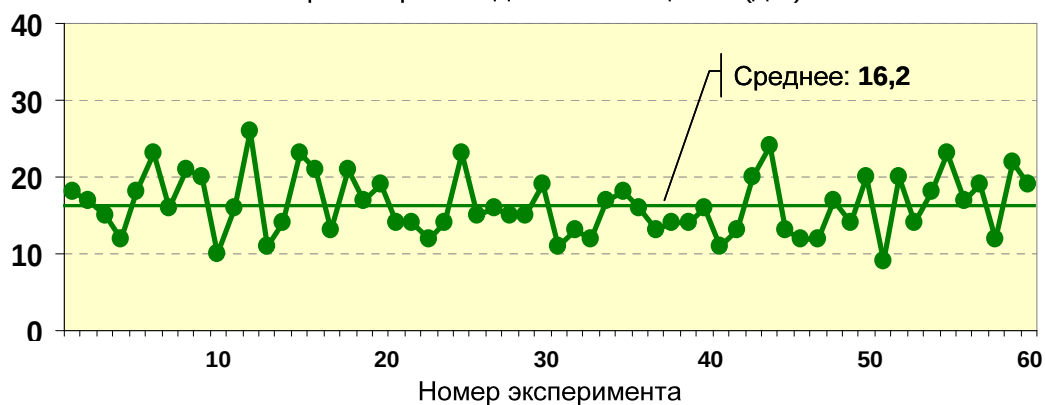
Однако при наличии вариабельности поведение нашей системы изменяется кардинальным образом. Время изготовления изделий становится значительно больше (см. средний график на врезке 6), причём оно возрастает прямо пропорционально размеру незавершённого производства (см. нижний график на врезке 6). Что лишний раз подтверждает справедливость известного в теории массового обслуживания «закона Литтла»⁶. В итоге среднее время производственного цикла для выпущенных в конце месяца изделий по результатам моделирования составляет 16,2 рабочих дня или, иными словами, в 2,7 раза превышает ожидаемое (6 дней). Но и это ещё не самое плохое. Гораздо хуже то, что от месяца к месяцу время изготовления изделий меняется в очень широком диапазоне, - в данном примере от 9 до 26 дней при

Дополнительные результаты моделирования для исходного сценария (6)

Средний выпуск и НЗП (шт.)
в зависимости от числа рабочих центров в системе



Время производственного цикла (дн.)



среднеквадратичном отклонении почти 4 дня. Соответственно, примерно в четверти случаев это время составляет от 16 до 19 дней и ещё в четверти случаев – от 20 до 26 дней. Как в таких условиях заранее планировать сроки выпуска конкретных изделий? И какой смысл в подобных обстоятельствах может иметь практика предварительного формирования производственных расписаний (сменно-суточных заданий) для отдельных рабочих центров⁷. Не удивительно, что наше предприятие лихорадит и оно регулярно задерживает отгрузку готовой продукции заказчикам.

Однако выявленные выше особенности поведения системы имеют и ещё один негативный аспект. Постоянное накопление незавершёнки в цепочке по сути дела означает, что для стабильного среднего выпуска 80 изделий в месяц в производство требуется ежемесячно запускать не 80, а все 105 заготовок. С точки зрения эффективности бизнеса это эквивалентно увеличению прямых переменных затрат примерно на 30%. И если теперь котловым методом подсчитать все расходы и доходы предприятия, то результат можно будет трактовать как общий рост себестоимости выпускаемой продукции. Конечно, на бумаге (в бухгалтерском балансе) указанный эффект найдёт отражение в виде увеличения активов компании, но вряд ли имеет смысл сильно радоваться подобному «улучшению». По крайней мере, целесообразно хотя бы скорректировать первоначальную экономическую модель доходности бизнеса. Если подходить более строго, то для значения «эффективной» точки безубыточности системы с учётом накопленных объёмов незавершёнки легко вывести следующее простое выражение:

$$N_0^* = \frac{C_0}{C_1 - C_2} + (W - W_0) \times \frac{C_2}{C_1 - C_2}$$

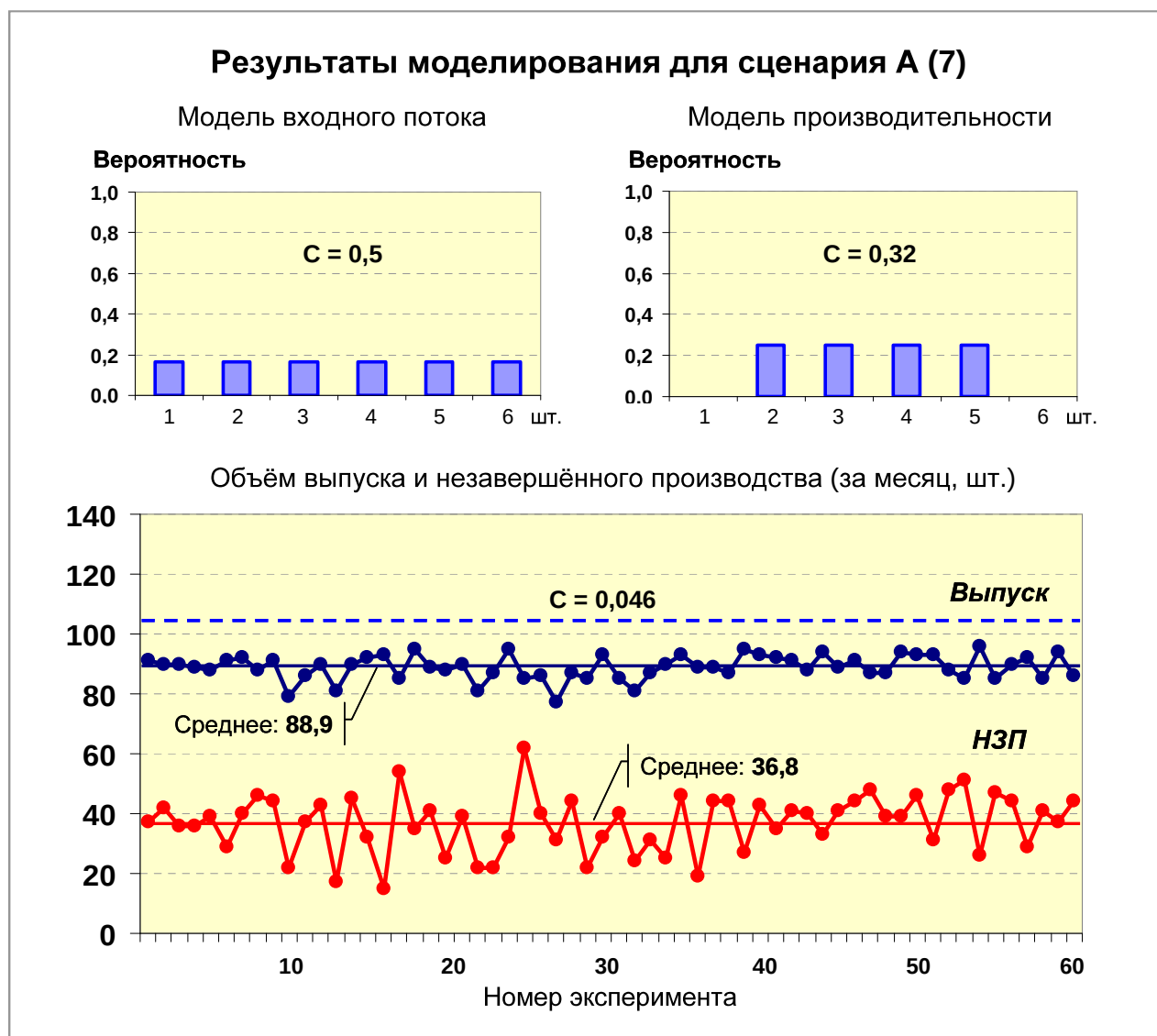
где W и W_0 – соответственно, размер накопленного НЗП и его нормативное значение; остальные обозначения определены на врезке 1. В нашем случае, когда $W = 43,6$ и $W_0 = 20,0$ оказывается, что при заданных параметрах модели и существующих характеристиках вариабельности материальных потоков фактическая точка безубыточности составляет уже не 85 единиц, а превышает даже ожидаемую среднюю производительность 100 изделий в месяц. Поэтому выпуск на уровне 80 штук в данном случае это не просто неудача, а реальная катастрофа для предприятия.

Возникает вопрос: можно ли, - и если да, то насколько, - исправить ситуацию, оставаясь в рамках схемы сбалансированных мощностей? Очевидно, ответ на данный вопрос следует искать на пути сокращения общей вариабельности системы. Ниже приведены результаты моделирования трёх сценариев, отличающихся от исходного видом распределения скорости входного и выходного потоков.

СЦЕНАРИЙ А: сильная вариабельность на входе, умеренная на выходе

Рассмотрим ситуацию, когда отклонения от средней производительности отдельных рабочих центров чуть меньше, чем при исходном сценарии. Для простоты «ручного» моделирования будем считать, что каждый рабочий центр может обрабатывать с равной вероятностью от 2 до 5 заготовок в смену (среднее 3,5 шт.)⁸. Параметры входного потока остаются теми же, - с равной вероятностью от 1 до 6 заданий в день.

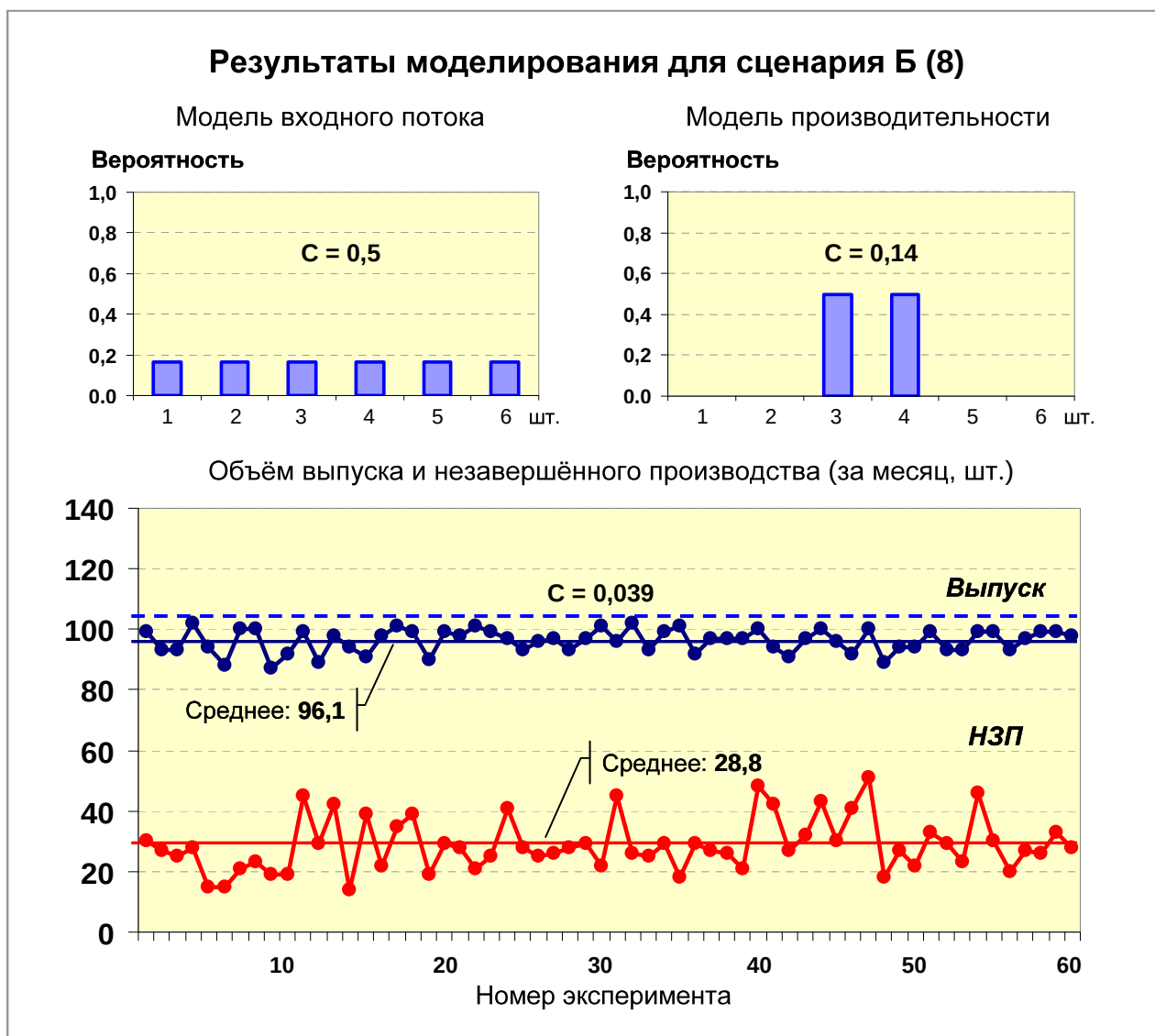
Результаты компьютерного моделирования представлены на врезке 7. Видно, что в данном случае средний выход всей системы возрастает почти до 89 изделий в месяц (против 81 при исходном сценарии), а размер накопленного за 30 дней НЗП сокращается с 44 до 37 единиц. Однако с учётом поправки на увеличение «эффективных» прямых переменных затрат, такой результат по-прежнему будет приносить предприятию убытки ($N_0^* = 96$).



СЦЕНАРИЙ Б: сильная вариабельность на входе, слабая на выходе

Предположим, что отклонения от средней производительности отдельных рабочих центров удалось снизить настолько, что теперь каждый рабочий центр в состоянии обрабатывать с равной вероятностью 3 или 4 заготовки в смену (среднее остаётся на уровне 3,5 шт.)⁹. Характеристики входного потока не меняются, - по-прежнему с равной вероятностью от 1 до 6 заданий в день.

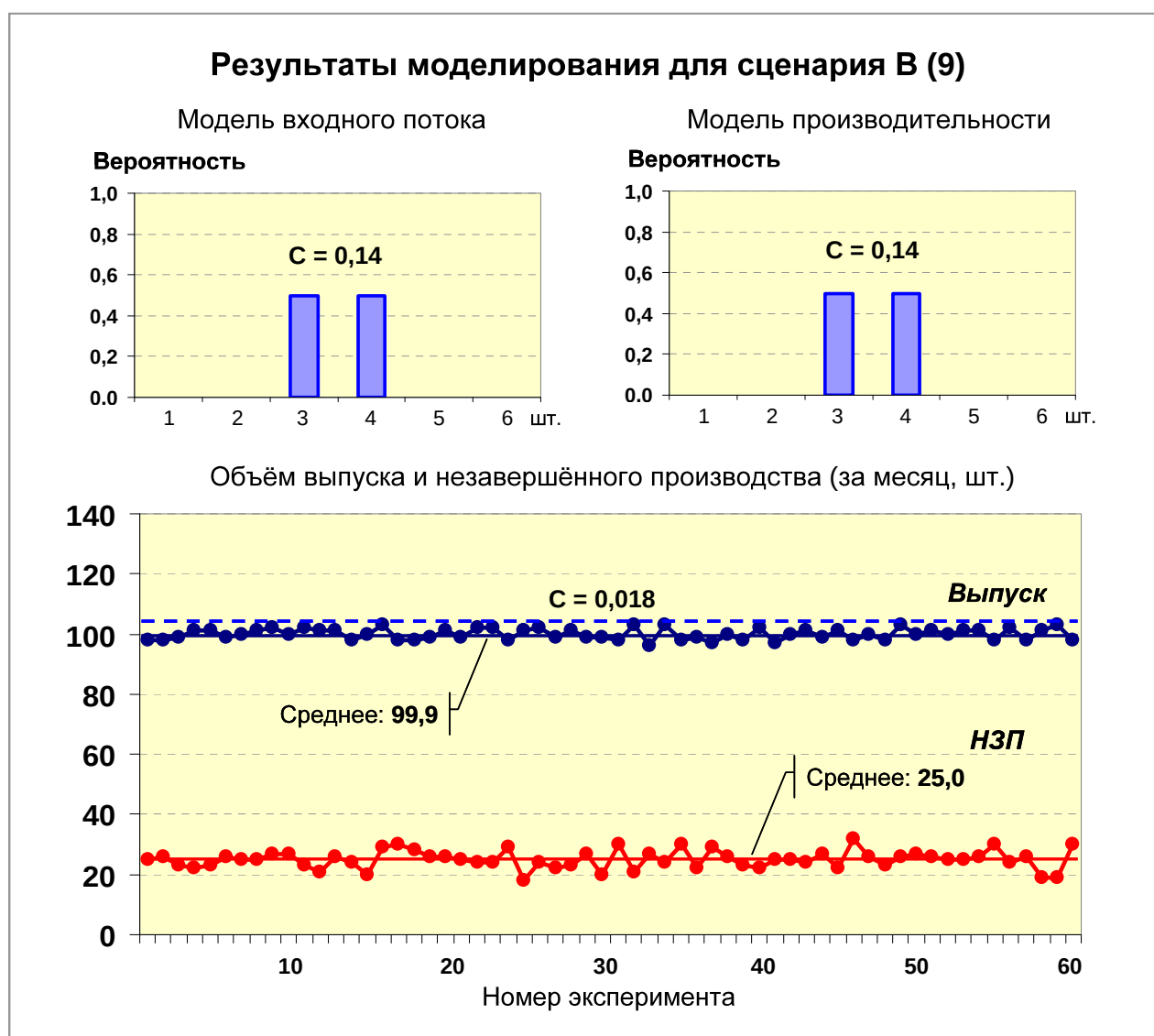
Соответствующие результаты компьютерного моделирования показаны на врезке 8. Средний выход всей системы вырос до 96 изделий в месяц (против 81 при исходном сценарии и 89 при сценарии А), а размер накопленного за 30 дней НЗП сократился до 29 штук. Расчётное значение «эффективной» точки безубыточности составляет 91 единицу и производство начинает приносить прибыль, хотя и весьма незначительную (≈ 30 у.е.). Заметим, что даже в этом случае месячный выпуск никогда не достигает отметки 105 изделий.



СЦЕНАРИЙ В: слабая вариабельность и на входе, и на выходе

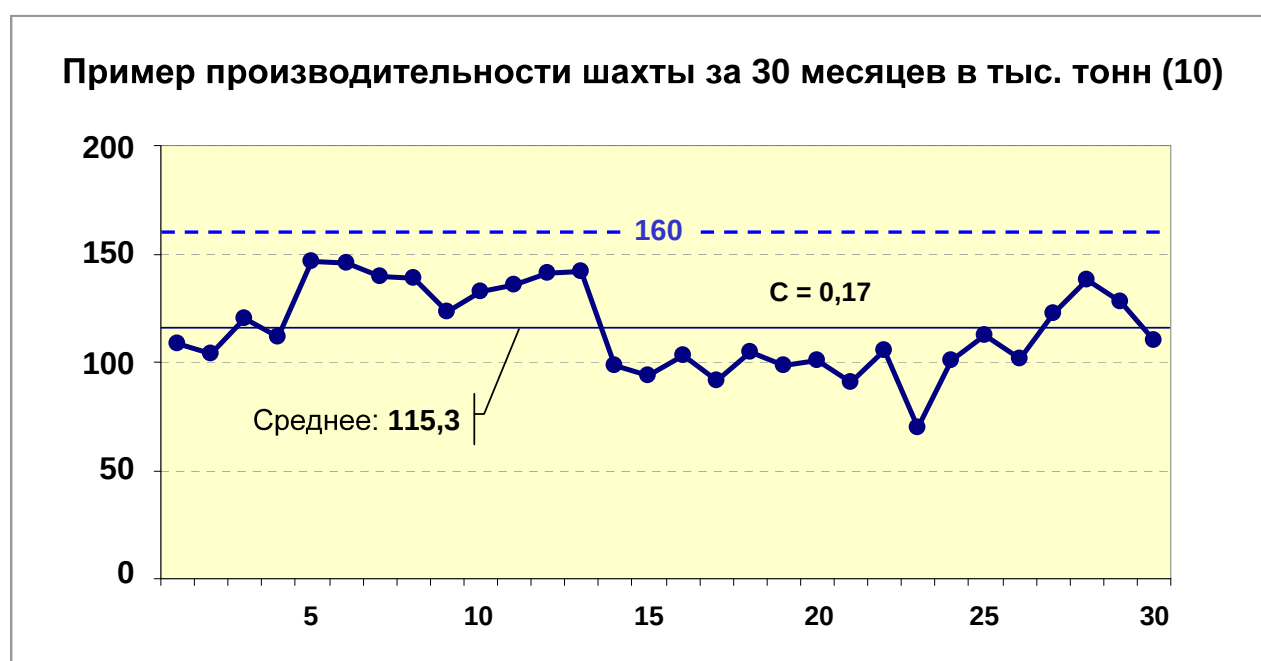
Допустим, что поставщику заготовок также удалось существенно улучшить свою производственную систему, и теперь он может с равной вероятностью подвозить нам ежедневно 3 или 4 заготовки (среднее 3,5 шт.). При этом все рабочие центры в состоянии обеспечивать производительность обработки как в предыдущем сценарии Б.

Результаты моделирования данной ситуации показаны на врезке 9. Средний выход всей системы наконец-то поднялся до желанного уровня 100 изделий в месяц, хотя по-прежнему никогда не дотягивает до 105 штук. Объём НЗП сократился до очень низкой величины в 25 единиц, а значение «эффективной» точки безубыточности составляет чуть больше 88 штук. И тем не менее даже теперь предприятие в среднем может реально рассчитывать только на 70 у.е. прибыли в месяц, а никак не на планируемую изначально величину 120 у.е.



Как правило, когда демонстрируешь руководителям предприятий результаты моделирования их собственных производственных систем, то самой первой реакцией являются бурные возражения по поводу принятых расчётных характеристик для вариабельности процессов. Конечно же, по твёрдому убеждению наших начальников, дела у них обстоят гораздо лучше и общая картина скорее похожа на сценарий В. К сожалению, никаких доказательств, основанных на сведениях объективного контроля, обычно не приводится. Хотя по косвенным признакам (например, показателям реального выпуска готовой продукции) ситуация представляется не столь оптимистичной и часто бывает ещё хуже рассмотренного выше исходного сценария. Для примера на врезке 10 приведены данные за 30 месяцев по подъёму «на гора» руды с одной из шахт достаточно крупного горнодобывающего предприятия, на котором мне пришлось однажды побывать. Основной производственный процесс там представляет собой последовательность из нескольких больших этапов (подготовка забоев и взрыв горных пород → откатка к рудоспускам → доставка к главному рудосборнику → подъём на поверхность), перед каждым из которых имеются буферы-накопители. Как видно, отклонения от среднего значения весьма велики (коэффициент вариабельности $C = 0,17$), а само среднее составляет всего 73% от планируемой величины. Руководители этого предприятия долгое время не могли понять, почему при таком умеренном плане и сбалансированных мощностях отдельных этапов уровень фактической выработки почти всегда оказывался на четверть меньше. А главная причина явления заключалась в жуткой вариабельности внутренних процессов.

Полагаю необходимым ещё раз подчеркнуть, что смоделированную в рамках сценария В ситуацию следует рассматривать как совершенно уникальную и



исключительную. Нужно считать большим достижением, когда для сложной системы удаётся понизить вариабельность выхода до величин, сравнимых с теми, которые получились у нас при моделировании по исходному сценарию. Чтобы на практике добиться хотя бы такого уровня отклонений ($C = 0,065$), требуется огромная работа по совершенствованию многих производственных процессов, в первую очередь, по максимальному устранению так называемых особых причин вариабельности и улучшению процессов с целью сокращения эффекта от общих причин¹⁰.

ВЫВОДЫ

- При наличии вариабельности входных и выходных потоков в цепочках последовательной обработки (то есть в условиях почти любого реального производства) поведение даже простейшей системы изготовления одного-единственного изделия кардинальным образом отличается от идеальной ситуации, в которой вариабельность отсутствует.
- Производительность системы в условиях вариабельности всегда меньше теоретических величин, полученных на основе средних значений, причём с ростом числа элементов в цепочке со «сбалансированными» мощностями такое расхождение увеличивается и может достигать 25-30% и более. При этом внутри системы происходит постоянное накопление необработанных заданий (незавершённого производства), а время производственного цикла изготовления изделий увеличивается в разы. Что, в свою очередь, может оказывать существенное негативное влияние на экономические показатели доходности бизнеса предприятия в целом.
- Сравнение выходных характеристик многих реальных производственных систем с данными изученных модельных прототипов свидетельствует об очень высоком уровне фактической вариабельности отдельных внутренних процессов на наших предприятиях.

ССЫЛКИ И КОММЕНТАРИИ

- ¹ Голдратт Э.М., Кокс Дж. *Цель: процесс непрерывного совершенствования*. – Мн.: ООО «Попурри», 2004; с. 148¹, с. 174-188².
- ² Более подробный анализ результатов компьютерного моделирования для ситуации с одним рабочим центром приведен в предыдущей части настоящей статьи.
- ³ См., например: Детмер У., Шрагенхайм Э. *Производство с невероятной скоростью: Улучшение финансовых результатов предприятия*. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009 (в приложении А на с. 258-269 подробно расписаны правила, а также необходимые инструкции и сценарии для «ручного» варианта игры).

- ⁴ См., например: **Levinson W.A.** *Beyond the theory of constraints: how to eliminate variation and maximize capacity*. – Productivity Press, 2007; p. 62-67. Аналогичный компьютерный симулятор можно скачать по ссылке (автор Келвин Янгмен): <http://www.dbrmfg.co.nz/Overview%20PowerPoints%20Excel%20Balanced%20Line%20Dice%20Simulator.htm>
- ⁵ Соответствующий прототип можно легко запрограммировать самостоятельно, например, в EXCEL'е, используя встроенный или дополнительный генератор равномерно распределённых случайных чисел на интервале (0,1).
- ⁶ «Закон Литтла» формулируется следующим образом: при достаточно общих вероятностных свойствах входных и выходных потоков среднее число заданий в системе (НЗП) равно произведению интенсивности поступления заданий (скорости входного потока) на среднее время их обработки (время производственного цикла); см., например, **Клейнрок Л.** *Теория массового обслуживания*. – М.: Машиностроение, 1979. Из данного соотношения следует очевидный вывод о том, что для уменьшения времени производственного цикла необходимо сокращать размер НЗП в системе.
- ⁷ Вопрос целесообразности составления детальных производственных расписаний в условиях вариабельности более подробно обсуждается в заключительной части настоящей статьи.
- ⁸ При «ручном» моделировании с помощью обычной 6-гранной игральной кости в случае выпадения чисел 1 или 6 результат игнорируется и бросок выполняется заново.
- ⁹ При «ручном» моделировании с помощью обычной 6-гранной игральной кости в случае выпадения чисел 1 или 2 в качестве результата принимается значение 3, в случае выпадения чисел 5 или 6 принимается значение 4.
- ¹⁰ См., например: **Уилер Д., Чамберс Д.** *Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта*. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.