

С. Жаринов

О вариабельности и зависимости процессов

Существующий стиль управления – это крупнейший источник потерь и убытков, столь огромных, что их величину невозможно оценить или измерить.

Таким диагнозом Эдвардс Деминг характеризует состояние и перспективы деятельности многих современных организаций¹⁻¹. В качестве консультанта по управлению производством мне часто приходится на практике наблюдать разрушительные последствия подобного развития событий. Как правило, это происходит в тех случаях, когда вместо чёткой формулировки и понимания концепций, принципов и подходов к управлению сложными социальными системами руководители пытаются рулить своими предприятиями на основе так называемого «здравого смысла». В одной из предыдущих заметок мне уже доводилось достаточно подробно высказываться по поводу недостатков данного способа управления². В дополнение позволю себе привести на этот счёт ещё одно утверждение хорошо всем известного системного мыслителя.

Здравый смысл есть не более чем собрание заблуждений, приобретённых к 18-летнему возрасту.

Альберт Эйнштейн³

Дело в том, что руководствуясь здравым смыслом «мира машин», мы обычно попадаем в ловушку из мифов, заблуждений и недоразумений относительно характера поведения и свойств сложных производственных систем. Личные впечатления от общения с первыми лицами и владельцами отечественных предприятий разных отраслей позволяют мне выделить три главные группы ложных предпосылок, составляющих основу моделей восприятия реальности многих наших руководителей:

- мифы о себестоимости и трудоёмкости;
- недооценка эффектов вариабельности и зависимости процессов;
- неверное понимание роли системных ограничений.

Ошибочность представлений об экономике производственного предприятия, базирующихся на понятиях «себестоимости» и «трудоёмкости» выпускаемой продукции, достаточно подробно разъясняется в специальной литературе^{4,5}. И тем не менее сплошь и рядом приходится сталкиваться с ситуациями, когда важные управленческие решения по-прежнему принимаются из соображений

локальной экономии на затратах. Что весьма печально. Однако положение дел становится ещё хуже, если при управлении производством (в частности, при планировании работ и расчёте соответствующих экономических моделей) не учитывается вариабельность и зависимость процессов. Но и это ещё не всё. Если сюда добавить постоянное «тушение пожаров», являющихся следствием неправильной организации материальных и информационных потоков (иными словами, непониманием роли системных ограничений), то вырисовывается поистине ужасающая картина происходящего сегодня на полях сражений за эффективность наших производственных систем. Поэтому приведенные в виде эпиграфа слова Деминга не кажутся сильным преувеличением.

За несколько лет работы консультантом мне удалось подготовить комплект презентаций, учебных примеров и методических материалов, посвящённых описанию и разоблачению перечисленных выше мифов, заблуждений и недоразумений. Обычно на семинарах мы решаем соответствующие задачи и устраиваем «деловые игры», в ходе которых имитируется поведение ряда простейших производственных систем. На самом деле, есть не так уж много хорошо известных «симуляторов», на базе которых можно очень наглядно продемонстрировать, как «правильно» и как «неправильно» управлять своими организациями. Среди них «воронка и мишень» (funnel experiment) Деминга, «игра в кости» (dice game) Голдратта и «универсальное производство» (job-shop game) Хольта. Так что нет необходимости изобретать велосипед. Причём для многих симуляторов имеются и неплохие компьютерные версии.

В настоящей статье сделана попытка обобщить данные о том, как неверное понимание и недооценка эффектов вариабельности и зависимости процессов могут приводить к принципиально ложным выводам о поведении реальных производственных систем. В отличие от некоторых предыдущих заметок, в которых излагались и обосновывались субъективные взгляды и предложения автора относительно подходов и способов управления организациями, здесь, главным образом, представлены примеры компьютерного моделирования (то есть результаты объективного анализа) систем с использованием указанных выше «симуляторов». Материал разделён на три части, в каждой из которых рассматривается один из аспектов проблемы*:

- (I) Общая характеристика типичных управленческих решений в условиях неопределённости.
- (II) Эффективность производственных систем при наличии вариабельности входных и выходных потоков.
- (III) Зависимость процессов как мультипликатор вариабельности.

* Расширенный вариант четвёртой части старой версии настоящей статьи выделен в отдельную заметку «О детальном и укрупнённом планировании».

Часть I

Общая характеристика типичных управленческих решений в условиях неопределённости

Мы сами всё разрушим своими же упорными стараниями.

*Эдвардс Деминг*⁶⁻¹

Заводское производственное совещание приближается к своему логическому завершению. Самый главный начальник уже заслушал отчёты всех своих подчинённых, как всегда остался недоволен достигнутыми результатами и вот, наконец, переходит к заключительному слову, в котором в очередной раз настаивает на реализации срочных мер по улучшению ситуации и раздаёт соответствующие указания:

– Во-первых, если не успеваете вовремя сдавать продукцию, то раньше запускайте детали в обработку. Не хватает заготовок? Хорошо, я договорюсь со смежниками, чтобы в следующем месяце завезли побольше.

– Во-вторых, усильте контроль за выполнением сменно-суточных заданий. Строже наказывайте всех, кто не укладывается в утверждённые нормативы. И чтобы по этому поводу я не слышал никаких отговорок!

– В-третьих, обеспечьте максимальную загрузку NCX-10. Столько денег в него вбухали, а он каждый день простаивает по полсмены. Имейте в виду, что буду лично проверять!

– В-четвёртых, подготовьте подробные графики работы для всех станков на несколько дней вперёд, а лучше всего – на целый месяц. Да, знаю, что в прошлом месяце у нас был прекрасный план, и мы его провалили. Значит, не всё учли, и теперь нужно будет регулярно корректировать производственные расписания. ... Кто сказал, что все наши планы выполняются только за счёт переработок и сверхурочных? Так было раньше, а сейчас у нас имеются в наличии все необходимые ресурсы.

– В-пятых, для повышения эффективности использования оборудования создавайте оперативные заделы, объединяйте партии. Если есть проблемы с качеством, – добавьте контролёров. ... В-шестых, В-седьмых,

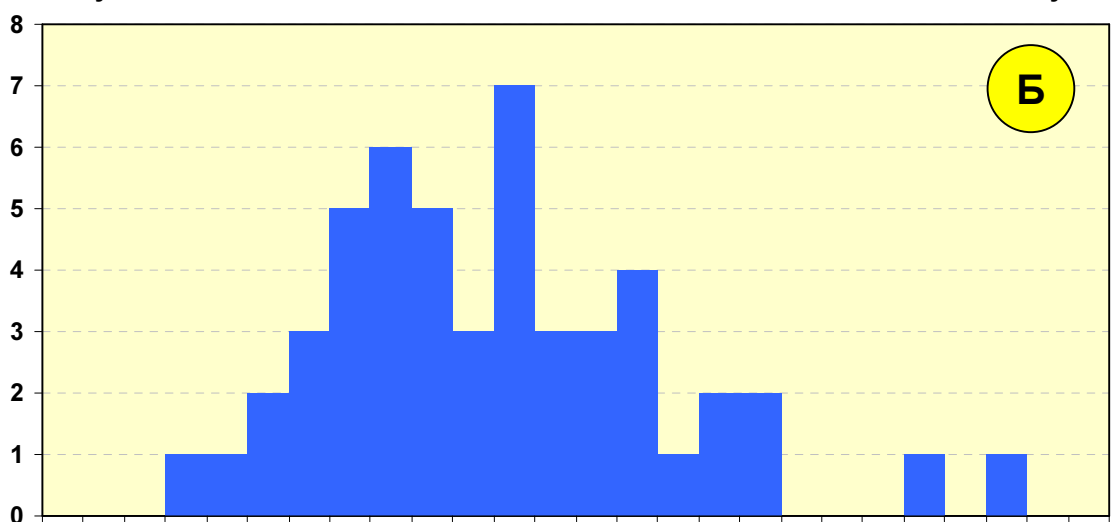
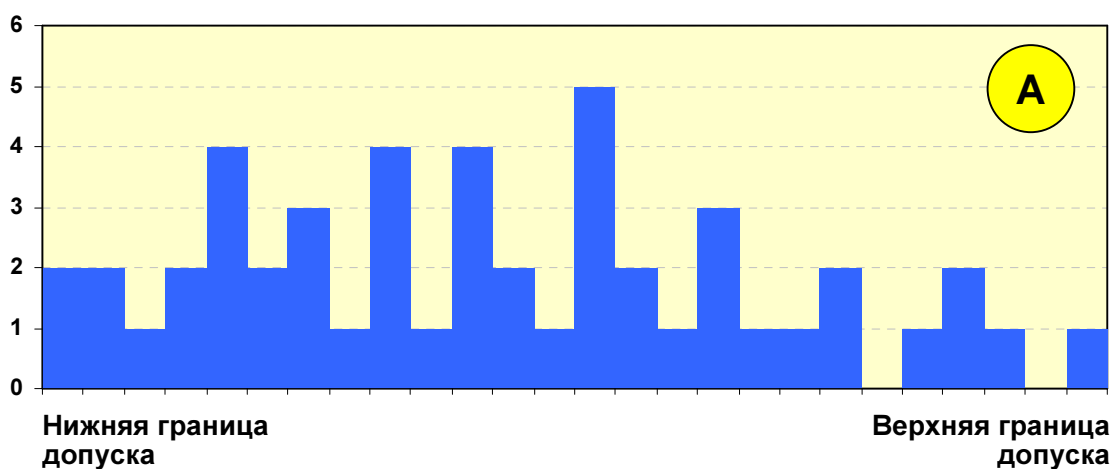
– И вообще, шевелитесь! А то ползаете по цехам как сонные мухи. Вы же руководители, и должны мгновенно реагировать на любые возникающие отклонения. ...

Знакомо? Вопрос: что здесь неправильно? Ответ: всё! А самое главное, на предприятии, скорее всего, не хватает важнейшего ресурса, а именно, ясного понимания того, как устроена их производственная система.

(1) Пример вредного вмешательства в работу стабильной системы

«На заводах Ford Motor Company входные валы трансмиссии обрабатывались на станке, оснащённом автоматическим компенсирующим прибором. Если по результатам измерений диаметр очередного вала оказывался слишком большим, компенсатор изменял настройку станка на величину соответствующего расхождения; и наоборот, если диаметр вала был слишком мал, настройка машины изменялась в сторону его увеличения. Разумно? Конечно.»

А. Гистограмма распределения диаметров 50 валов, полученных в результате описанной выше процедуры (компенсатор включен).



Б. Гистограмма распределения диаметров 50 валов, полученных на том же станке после отключения компенсатора.

Результаты: «технологический процесс без работающего компенсирующего прибора уже был в управляемом состоянии, т.е. проявлял наименьший разброс, на какой он был способен. Компенсатор ... лишь вмешивался в процесс, который и так был стабилен. Единственный возможный эффект такого внешнего влияния – увеличение вариаций, разброса – эффект, совершенно противоположный желаемому».

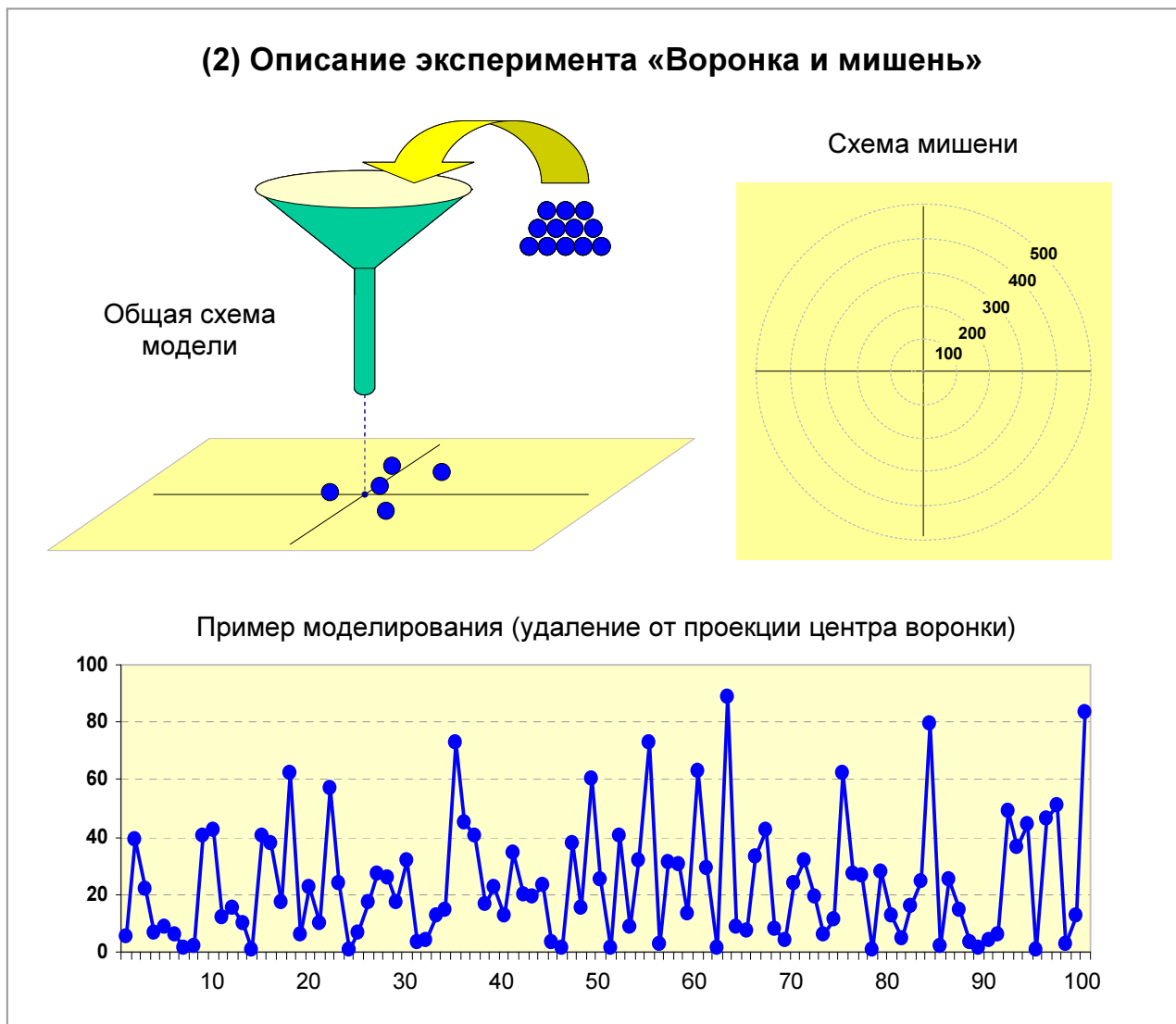
На врезке 1 показан классический случай⁶⁻² того, как производственники, стараясь улучшить положение дел, сами того не подозревая, только ухудшают ситуацию. Когда я привожу этот пример руководителям наших предприятий, то в ответ обычно выслушиваю заверения в том, что для их производства это совершенно не типично.

Конечно, не типично. Было бы из-за чего вообще шум поднимать? Всего-то увеличение разброса на какие-то 40%. Не говоря уже о том, что система при этом продолжает оставаться в стабильном состоянии. То, что на самом деле проделывают руководители со своими организациями, считая необходимым «мгновенно реагировать на любые возникающие отклонения», измеряется не десятками, и даже не сотнями процентов ухудшений. Точнее, количественные измерения здесь вообще не дают адекватного представления о происходящем. Потому что многие управленческие решения, - типа указанных в самом начале раздела, - просто разрушают саму производственную систему. Да, точные результаты подобных действий невозможно изобразить на гистограмме из-за эффекта разнесённости соответствующих причин и следствий в пространстве и времени. Но от этого последствия принимаемых решений не становятся менее губительными.

Как же в таком случае представить себе «размер бедствия»? В своё время Деминг для наглядности использовал эксперимент под названием «воронка и мишень». Несмотря на то, что этот знаменитый эксперимент подробно описан как минимум в трёх популярных книгах^{1-2,6-3,7-1}, удивительно, насколько мало о нём известно современным руководителям. А между тем, в его сценариях и результатах просматриваются прозрачные аналогии с ситуациями, постоянно возникающими в практике управления организациями.

Схема эксперимента приведена на врезке 2. При физическом моделировании «мишень наносится на ткань, и воронка располагается над мишенью. Шарик бросают сквозь воронку, а положение, где он останавливается на столе, отмечают ручкой. Держатель и, следовательно, воронка могут передвигаться в соответствии с набором правил, которые мы сформулируем ниже. Шарик бросают в воронку во второй раз, позиция его остановки помечается, и воронка передвигается вновь. Процесс нужно повторить несколько десятков раз.»⁶⁻⁴

Ниже показаны результаты соответствующего имитационного моделирования с использованием одного из известных компьютерных «симуляторов»⁸. При этом считается, что величина удаления шарика от точки - проекции центра воронки на стол находится в диапазоне от 0 до 100 некоторых условных единиц, причём чем ближе к этой точке, тем кучность попаданий выше и наоборот. Распределение по азимуту принимается равномерным в интервале



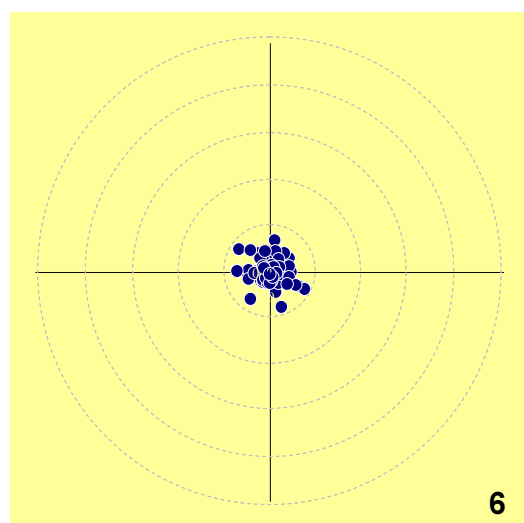
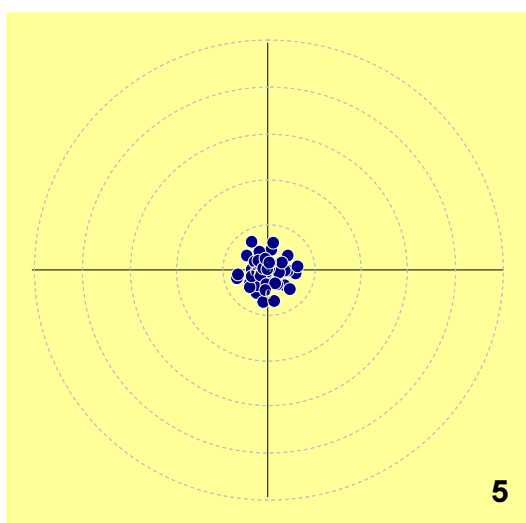
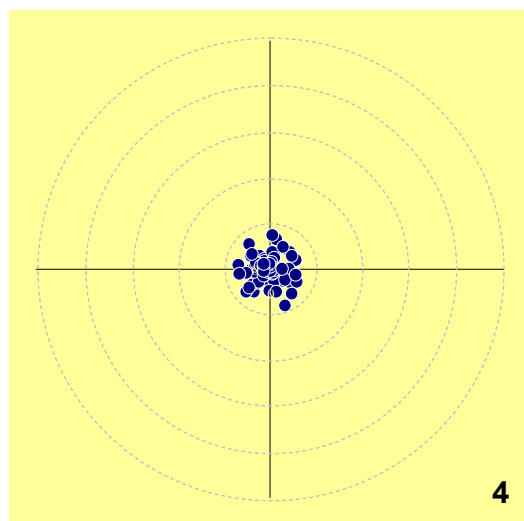
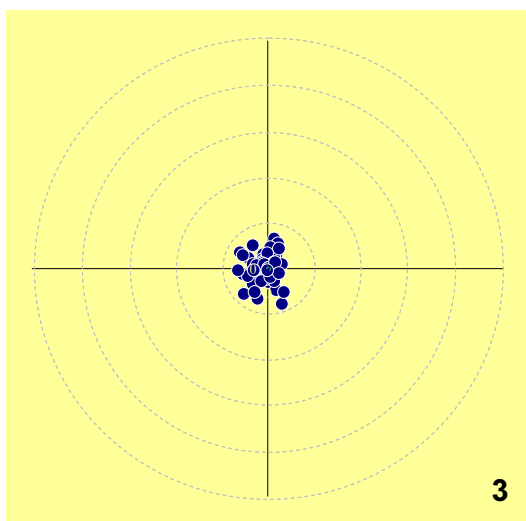
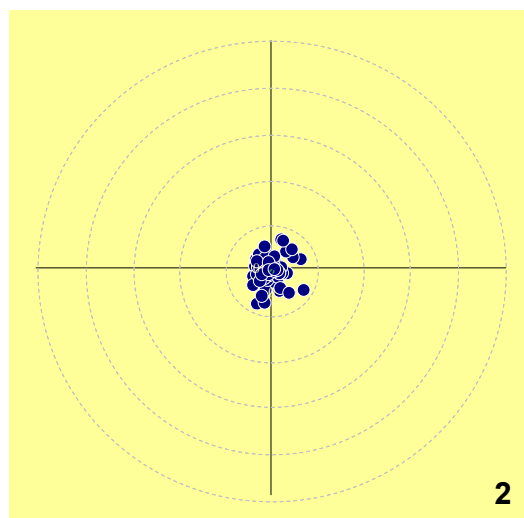
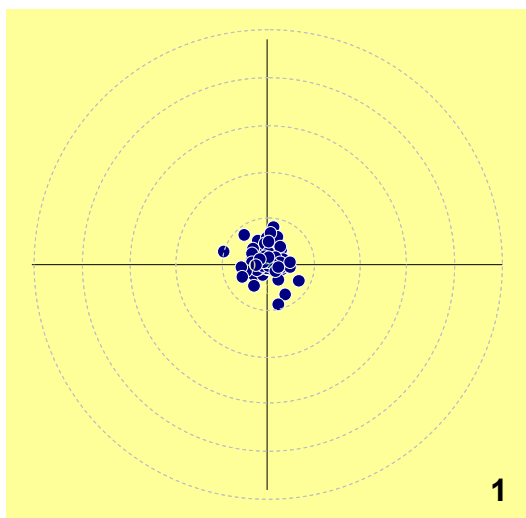
от 0 до 360 градусов. В каждом сеансе моделируется 100 бросков шарика. Как и у Деминга, рассматриваются четыре правила перемещения воронки.

ПРАВИЛО 1: положение воронки неизменно

В первом сценарии воронка изначально устанавливается над центром мишени и по ходу эксперимента никогда не перемещается. Результаты шести сеансов моделирования (по 100 точек в каждом) показаны на врезке 3.

Как видно, система ведёт себя вполне предсказуемо, а точки на диаграммах достаточно кучно ложатся в центре мишени и не выходят за пределы первого круга. Однако отдельные отклонения иногда всё же оказываются достаточно большими (около 100 у.е.). При столкновении с подобными ситуациями на практике у руководителей организаций невольно возникает соблазн каким-то образом подправить настройки системы и тем самым улучшить её поведение настолько, чтобы исключить даже такие редкие события.

(3) Результаты моделирования по правилу 1

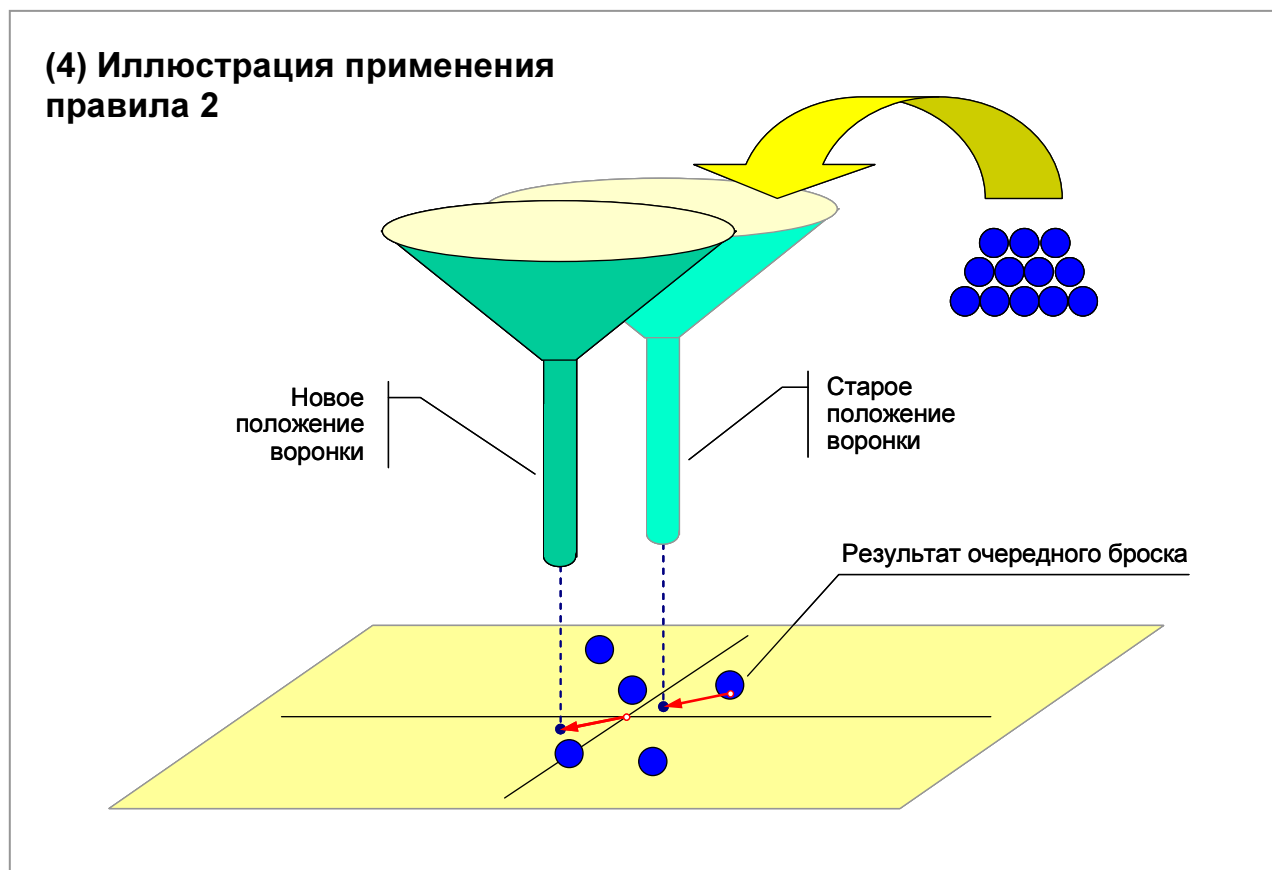


Теоретически возможны разные варианты корректировок, но мы рассмотрим три самых популярных сценария, описанных Демингом. В действительности при управлении «по отклонениям» принимаемые решения часто представляют собой некоторые комбинации указанных сценариев.

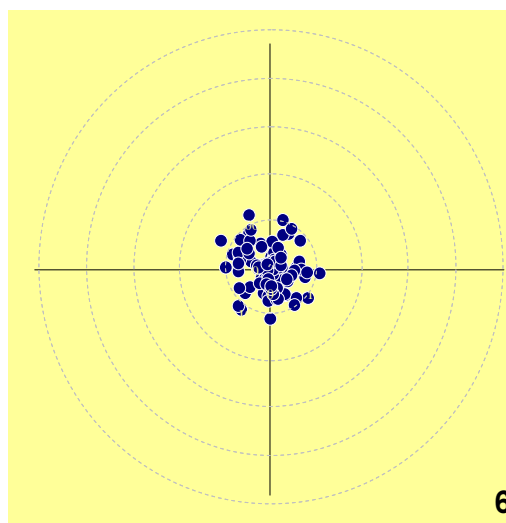
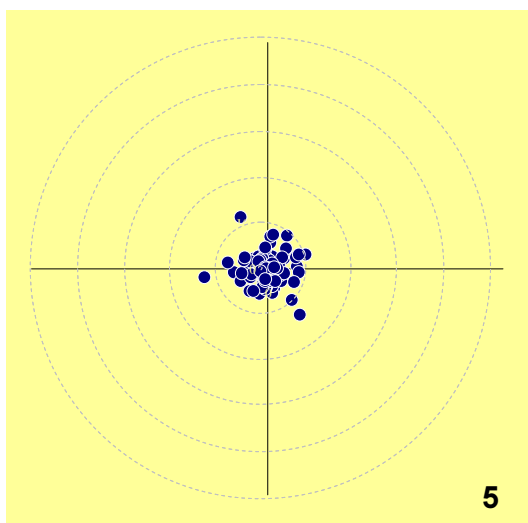
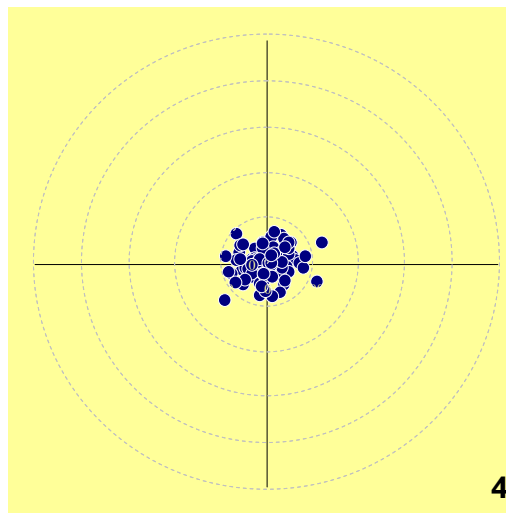
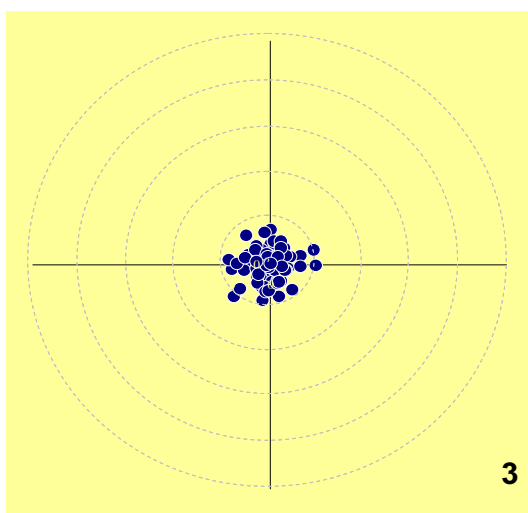
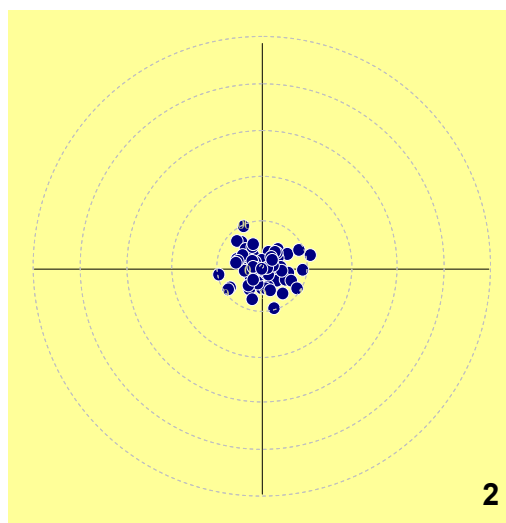
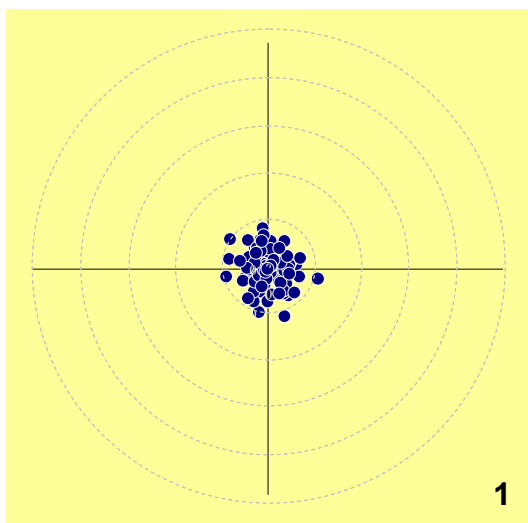
ПРАВИЛО 2: коррекция от места попадания

В соответствии с этим правилом после каждого броска шарика фиксируется отклонение места его попадания от точки – проекции центра воронки на стол, и воронка передвигается от центра мишени на величину и в направлении вектора такого отклонения (см. схему на врезке 4). Результаты шести сеансов моделирования данного сценария представлены на врезке 5.

Кажется, полученные результаты – это не совсем то, чего обычно ожидают от применения подобных корректирующих действий. И хотя точки по-прежнему весьма кучно ложатся в центре мишени, но наблюдаются отдельные случаи выхода за пределы первого круга (то есть такие отклонения, которые по величине превышают 100 у.е.), а общее рассеяние становится заметно выше. Строгие расчёты показывают, что система по-прежнему остаётся устойчивой, но дисперсия распределения попаданий по сравнению с исходной ситуацией (когда воронка остаётся неподвижной) увеличивается ровно в два раза.



(5) Результаты моделирования по правилу 2



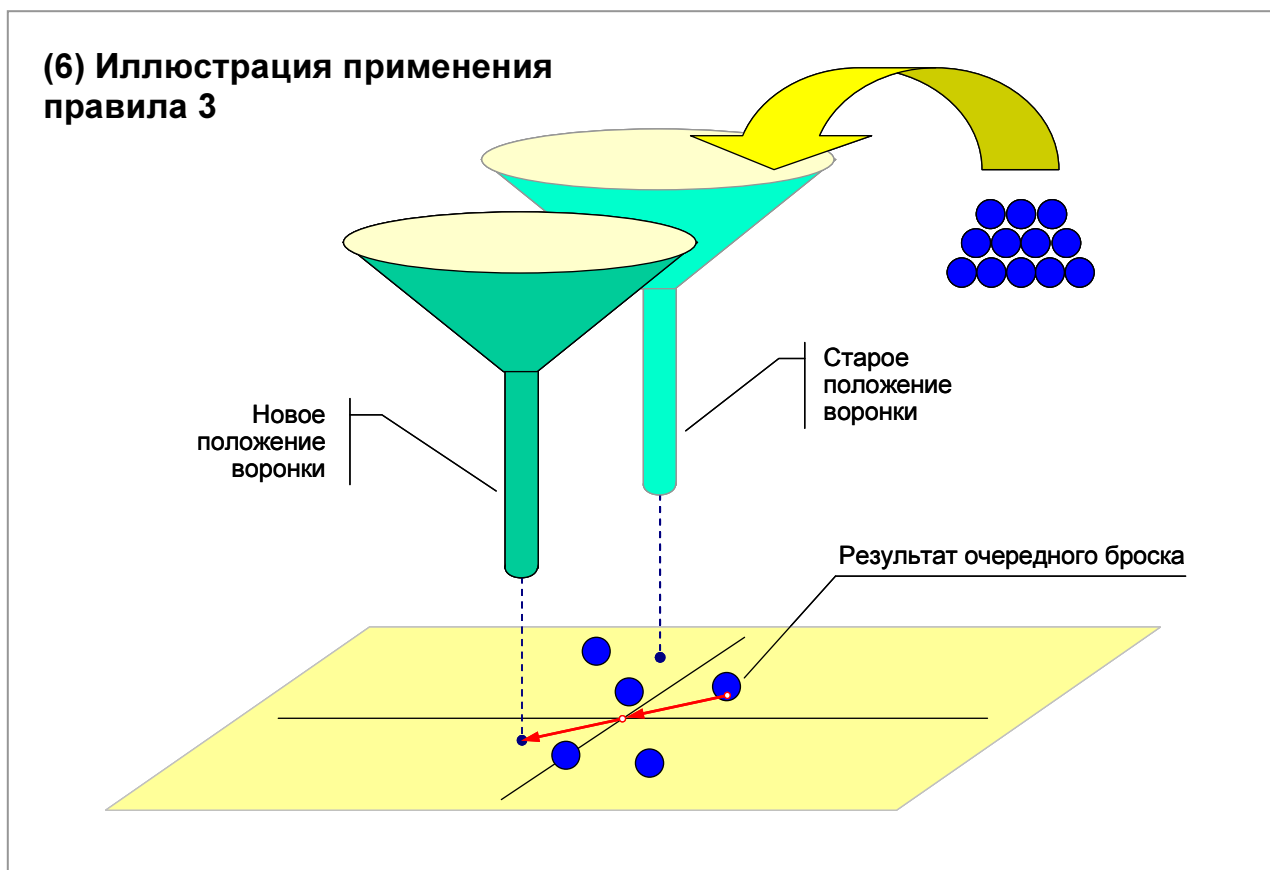
Деминг приводит много разных примеров типичных управленческих решений из практики современных организаций, суть которых сводится к действиям в соответствии с правилом 2^{1-3} . Вот некоторые из них, с которыми приходится часто сталкиваться на отечественных производственных предприятиях:

- систематическая корректировка оператором настроек станка от изделия к изделию (см. описанный выше аналогичный случай в компании Ford);
- принятие корректирующих мер в связи с появлением дефектного изделия или жалобы клиента;
- премирование или наказание рабочих в зависимости от того, оказались ли результаты их ежедневной работы выше или ниже средних или плановых показателей.

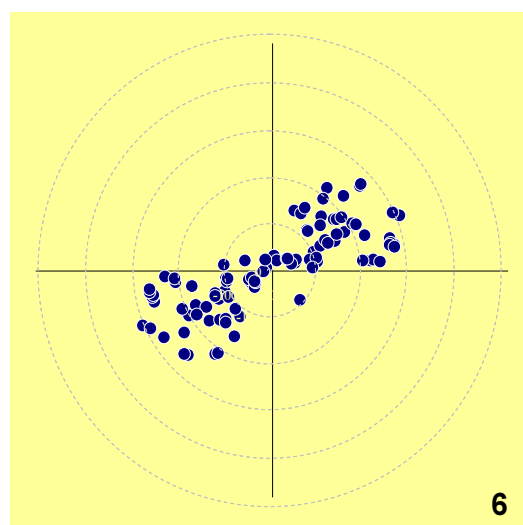
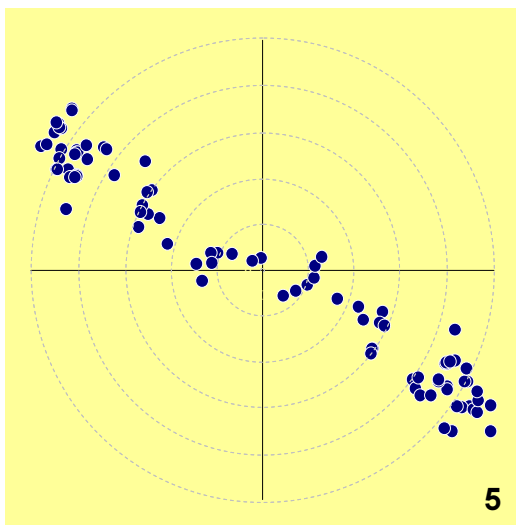
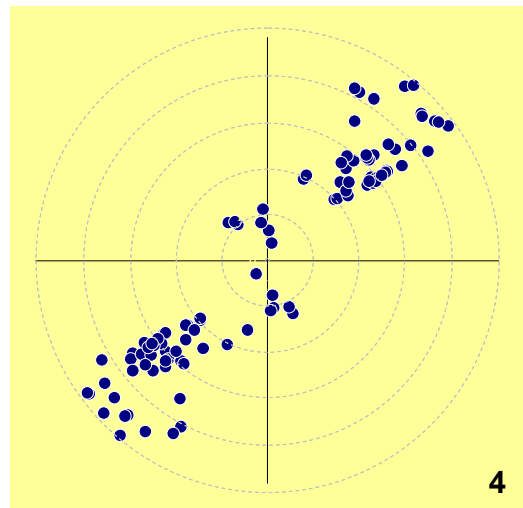
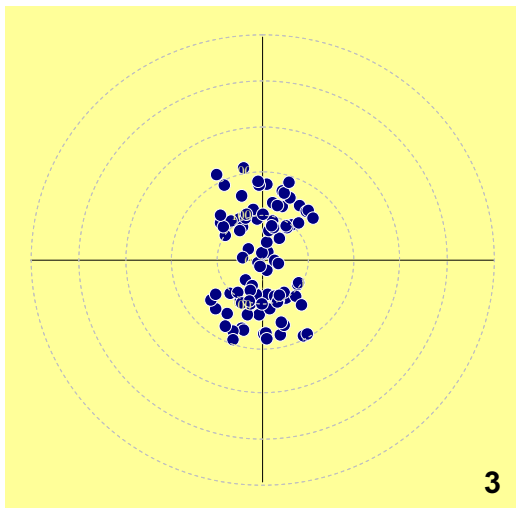
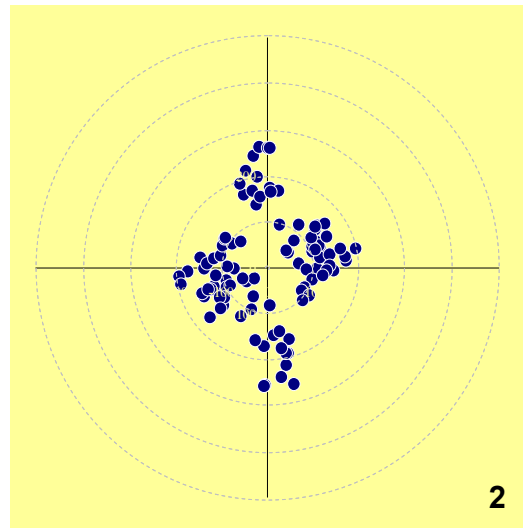
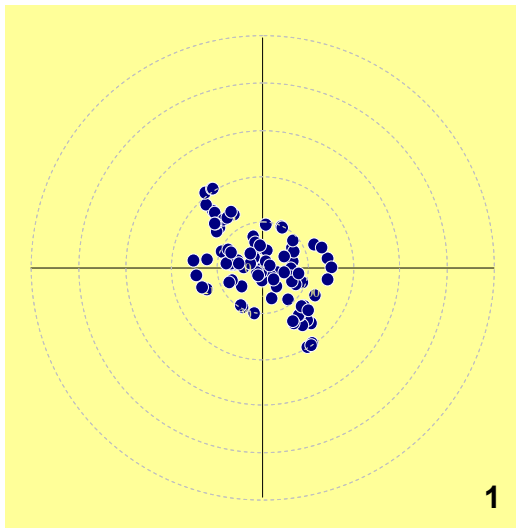
Приходится признать, что первый блин оказался комом. Ничего, попробуем применить другие способы корректирующих воздействий.

ПРАВИЛО 3: коррекция от центра мишени

Давайте теперь после каждого броска шарика фиксировать отклонение места его попадания не от положения воронки, а от центра мишени, и перемещать воронку в соответствии с вектором такого отклонения (см. схему на врезке б).



(7) Результаты моделирования по правилу 3



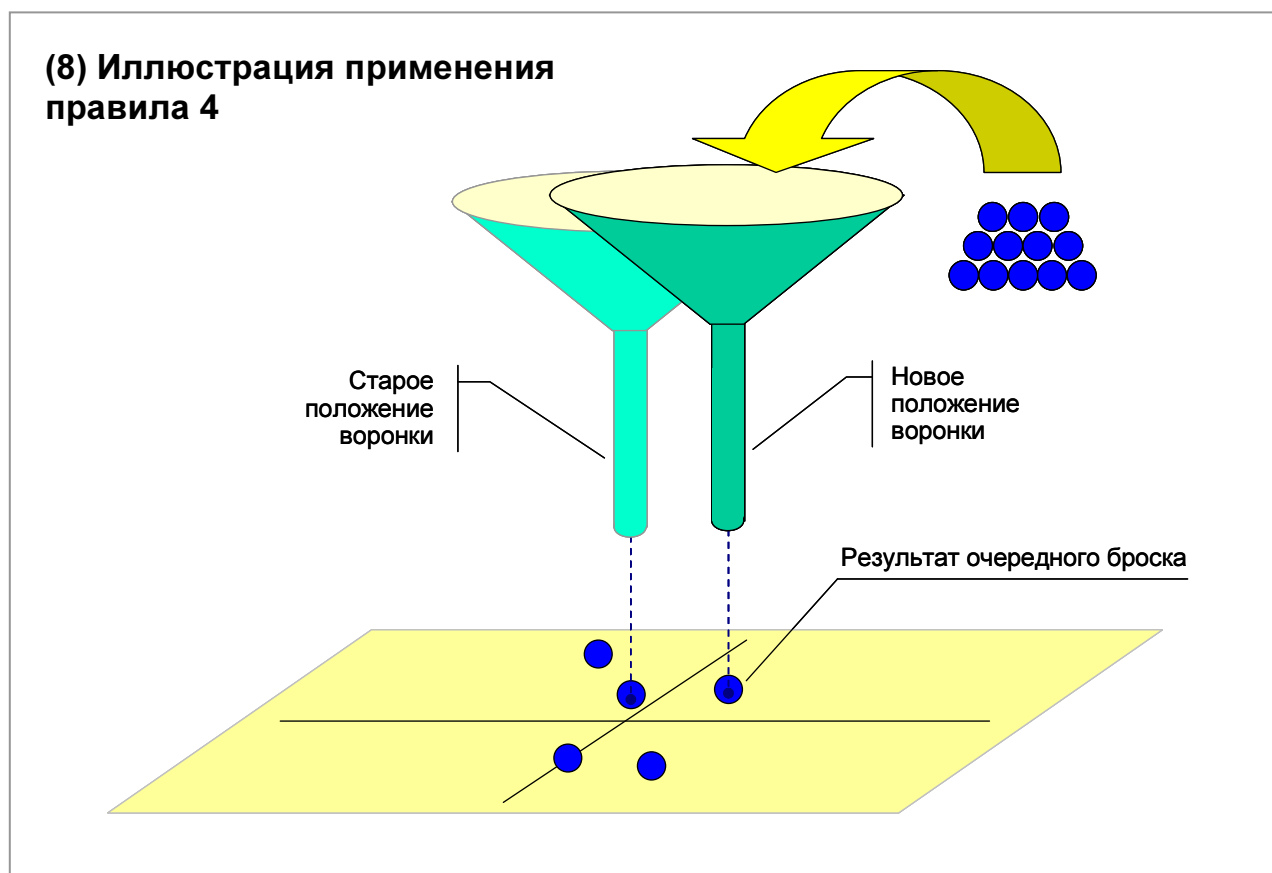
Результаты шести сеансов моделирования данного сценария представлены на врезке 7.

Это какой-то кошмар! Ситуация становится непредсказуемой, точки «скачут» взад-вперёд от центра мишени, амплитуда отклонений постоянно возрастает, - пока система окончательно не «взрывается». Неужели мы и в самом деле так поступаем со своими организациями? Деминг приводит реальные примеры подобного вмешательства в работу устойчивых систем¹⁻⁴. Ещё одним весьма характерным случаем применения такого сценария является реагирование на длительные производственные циклы путём более ранних запусков. В результате чего размеры незавершённого производства увеличиваются, и циклы только удлиняются.

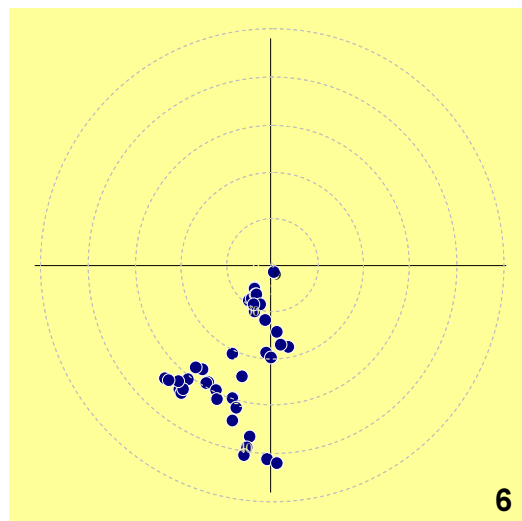
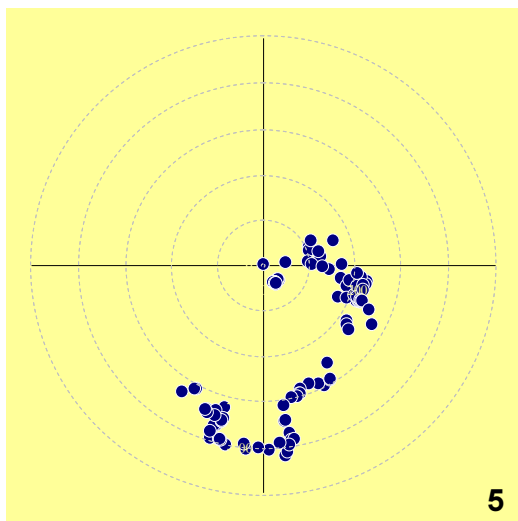
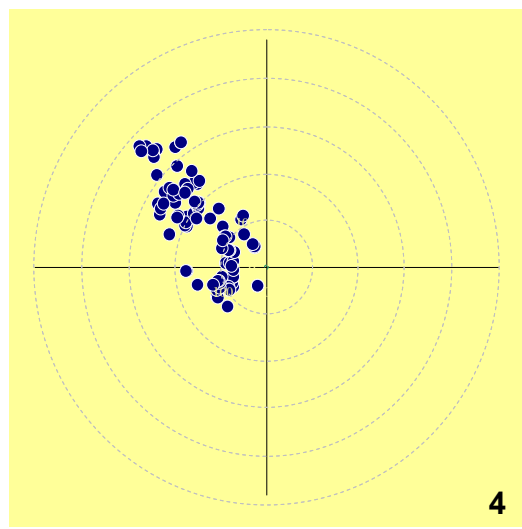
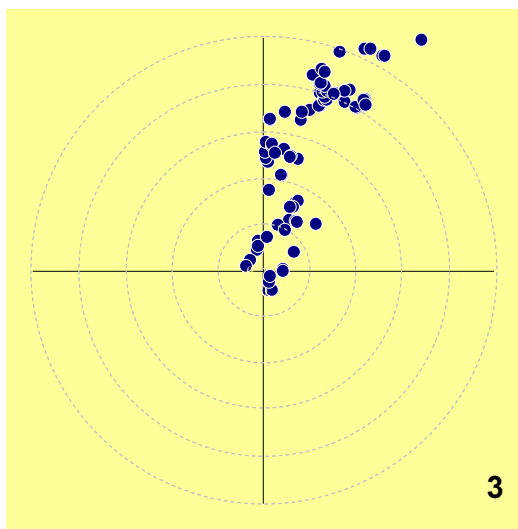
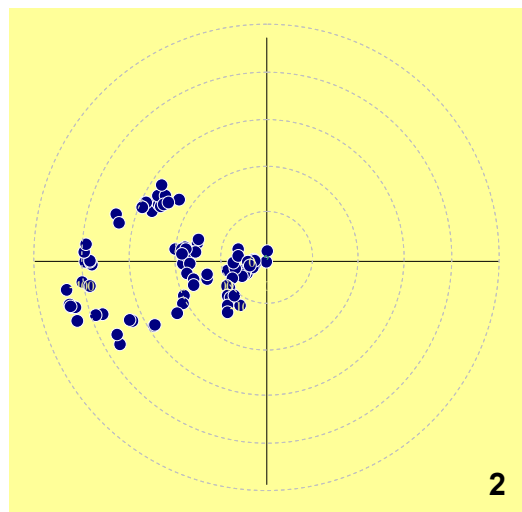
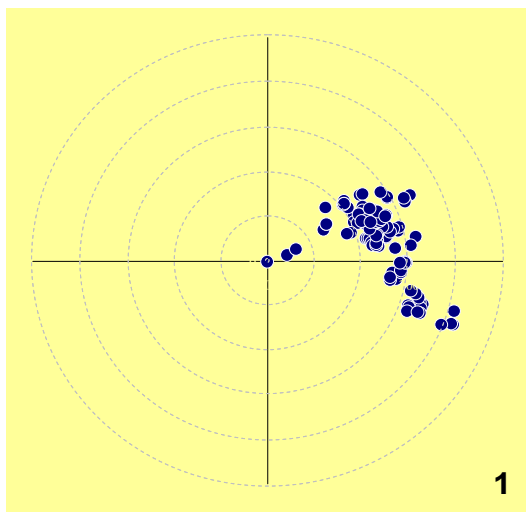
Ну что же, мы опять не угадали. Однако не станем отчаиваться, ведь у нас в запасе остаётся последний шанс, который может увенчаться успехом.

ПРАВИЛО 4: воронка в место попадания

После каждого броска шарика будем выставлять воронку точно над местом его попадания (см. схему на врезке 8). Соответствующие результаты шести сеансов моделирования показаны на врезке 9.



(9) Результаты моделирования по правилу 4



Да, по сравнению с предыдущим случаем ситуация изменилась, но не стала качественно лучше. Система остаётся неустойчивой, отклонения по-прежнему непрерывно возрастают, - хотя и в некотором общем направлении, но которое от сеанса к сеансу заранее предугадать невозможно. В конце концов система всё равно «разваливается». Характерными примерами управления по такому сценарию могут служить⁷⁻²:

- действия оператора станка по обеспечению однородности производимой продукции путём попытки изготавливать очередное изделие так же, как и предыдущее;
- корректировка сроков выполнения заданий по текущему положению дел;
- обучение работниками друг друга по очереди, – по сути дела игра в «испорченный телефон».

Итак, какие бы усилия по корректировке отклонений мы ни предпринимали, желаемые улучшения так и не наступают. Что же тогда остаётся в сухом остатке?

ВЫВОДЫ

- Вариабельность - фундаментальное свойство производственных систем и процессов. Его открытие иногда сравнивают по значимости с открытием теории относительности и квантовой механики⁹.
- «Если начать настраивать стабильный процесс, пытаясь скомпенсировать нежелательные результаты или гонясь за сверхвысокими результатами, ситуация на выходе станет хуже, чем если бы процесс протекал без вмешательств».⁷⁻³
- Типичные управленческие решения, принимаемые руководителями наших организаций (в том числе и те, на которых в предисловии к этой части статьи настаивал самый главный начальник производства) очень часто представляют собой ничто иное как вредоносное вмешательство в работу статистически устойчивых процессов.

ССЫЛКИ И КОММЕНТАРИИ

¹ Деминг Э. *Новая экономика*. – М.: Эксмо, 2006; с. 31¹, с. 160-171², с. 167-168³, с. 167⁴.

² Жаринов С. *О здравом смысле и системном мышлении*. – www.leanzone.ru.

³ Указанный афоризм Эйнштейна разные источники приводят в нескольких незначительно отличающихся формулировках; в данном случае он цитируется по

- книге: **Талеб Н.Н.** *Одураченные случайностью: скрытая роль шанса на рынках и в жизни.* – М.: СмартБук, 2009, с. 54. Замечу, что в рамках обсуждаемой темы эта книга Талеба имеет и большое самостоятельное значение.
- ⁴ **Goldratt Е.М.** *The haystack syndrome: Sifting information out of the data ocean.* – North River Press, 1990; p. 3-99.
- ⁵ **Caspari J.A., Caspari P.** *Management dynamics: Merging constraints accounting to drive improvement.* – John Wiley & Sons, Inc., 2004; p. 1-20. Имеется русский перевод указанной части книги, - см. www.leanzone.ru.
- ⁶ **Нив Г.Р.** *Пространство доктора Деминга: Принципы построения устойчивого бизнеса.* – М.: Альпина Бизнес Букс, 2005; с. 101¹, с. 85-87², с. 101-109³, с. 102⁴.
- ⁷ **Деминг Э.** *Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами.* – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007; с. 288-292¹, с. 290², с. 288³.
- ⁸ http://www.deming.ru/TeorUpr/Voron_I_mish.htm (автор Владимир Холодный, г. Днепропетровск); я немного подкорректировал настройки программы, в частности, увеличил размер рамок с 200 до 500 и изменил внешнее оформление.
- ⁹ **Уилер Д., Чамберс Д.** *Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта.* – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009; с. 10 (предисловие к русскому изданию книги).

Часть II

Эффективность производственных систем при наличии вариабельности входных и выходных потоков

**Отклонения – это жизнь,
а жизнь – это отклонения.**

*Эдвардс Деминг*¹

Самый главный начальник производства с утра пребывает явно не в лучшем расположении духа. Вот уже несколько минут он держит в руках и с мрачным видом рассматривает листок с показателями выработки за прошедший месяц. Наконец, оторвавшись от изучения цифр, сурово оглядывает подчинённых и приступает к «разбору полётов»:

– Кто мне объяснит, что у нас происходит? Ещё месяц назад казалось, что ситуация стала улучшаться, сдали почти 100 изделий. И снова провал - всего 82 штуки, да и те отгрузили с задержками. Предприятие лихорадит. Заказчики нервничают. Если так пойдёт и дальше, то очень скоро встанет вопрос о корректировке утверждённых акционерами годовых показателей, и тогда все мы с вами окажемся ... - сами знаете где!

– Думаю, что для пессимистических прогнозов нет оснований, – вступает в дискуссию молодой начальник диспетчерской службы, – ведь пока ещё общее отставание не такое уж большое. И нет сомнений в том, что мы очень быстро его сократим. Ввод в эксплуатацию NCX-10 позволил нам сбалансировать мощности, и производство уже заработало более ритмично.

– Кстати, насчёт NCX-10, – прерывает «главный». – Полгода назад вы все здесь меня уверяли, что после его установки снимутся проблемы по крайней мере на запускаящем этапе. Тогда удалось убедить руководство взять кредит, но теперь каждый месяц нужно платить банку кучу денег. И где прикажете брать эти средства при таких-то объёмах производства? Так что с NCX-10 и начнём. Прямо сейчас. Кто будет докладывать?

– NCX-10 у нас под особым контролем, – бодро рапортует руководитель производственного отдела. – В последние дни выходим на запланированный уровень его эффективности. Конечно, всякое случается, и время от времени бывают перебои: то требуется мелкий ремонт, то вдруг вмешается какой-нибудь «человеческий фактор» В общем, сами понимаете, заранее всего не предусмотреть. Но мы мгновенно реагируем на любые отклонения. Вот, например, вчера станок пришлось останавливать из-за поломки. Срочно перебросили лучших ремонтников с других участков и управились меньше чем за час. Так что заданный средний темп работы строго выдерживается.

– А если поконкретнее? Прежде всего, как дела с заготовками? Смежники

не подводят? Мне они обещали гарантированные ежедневные поставки. Так сказать, в режиме «точно вовремя». Справляются?

– К смежникам претензий нет, – отвечает начальник группы снабжения. – По плану они должны давать нам 100 заготовок в месяц, а по факту выходит даже чуть больше - примерно 105. Поставки идут каждый день, в среднем партиями по три-четыре штуки. Правда, иногда к началу смены успевают подвести всего одну-две болванки, но бывает и так, что сразу приходит пять-шесть.

– Понятно! А как с производительностью самого станка? Хронометраж сделали? Что получилось?

– Результаты проведенного анализа подтверждают наши предварительные расчёты, – подхватывает тему начальник бюро технического нормирования. – Опытная эксплуатация показала, что при выбранных режимах NCX-10 вполне способен обрабатывать по 4 заготовки в день или 120 штук в месяц. Это выше текущих плановых показателей и мы считаем такой вариант оптимальным. А в идеальных условиях можно выдавать даже до 6 деталей за смену. Конечно, учитывая всевозможные случайные факторы, в месячную программу имеет смысл закладывать более умеренную цифру - 105 штук, что соответствует и уровню фактической обеспеченности заготовками.

– Ясно! А что с эффективностью использования остального оборудования? Насколько я понимаю, кроме NCX-10 основной технологический процесс у нас включает ещё пять крупных переделов. Вероятно, именно там что-то идёт не так, как хотелось бы?

– Никаких серьёзных проблем, всё работает в штатном режиме, – словно не почувствовав в вопросе скрытой угрозы, уверенно заявляет руководитель производственного отдела. – Собственно говоря, на остальных участках за последнее время ничего существенно и не менялось. Там ведь и раньше все мощности были хорошо сбалансированы.

– Просто замечательно! – уже не сдерживая своих эмоций, взрывается «главный». – Может быть, всё-таки кто-то мне объяснит, что у нас здесь происходит?! У всех всё в порядке и нигде нет никаких проблем. Заготовки поступают вовремя, производственные мощности сбалансированы. И только один вопрос никого не беспокоит: почему вместо 100 изделий по плану мы из месяца в месяц сдаём чуть больше 80?

– И не надо мне рассказывать сказки про стабильную работу NCX-10! – продолжает он наращивать обороты. – Я же предупреждал, что буду лично контролировать. Вот данные за последние две недели, из которых следует, что заготовки иногда по 2-3 дня ждут своей очереди на запуск. Как это понимать?

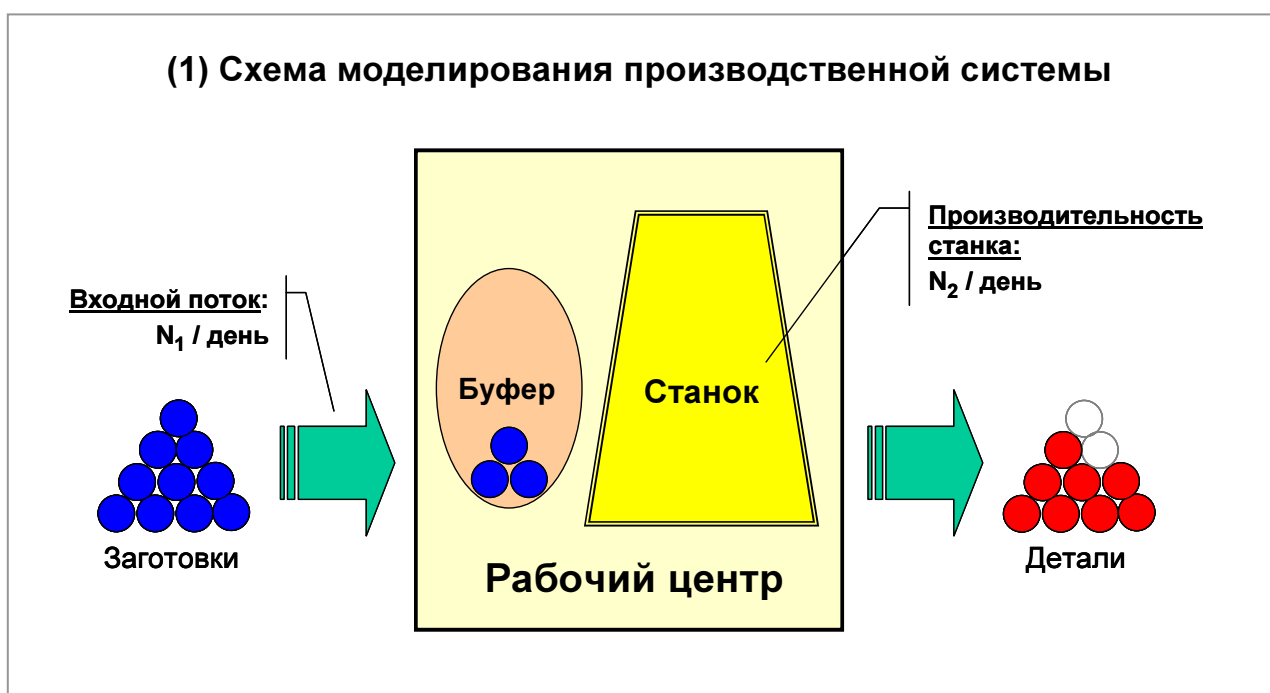
– ??? (Дальше совещание продолжается на повышенных тонах с широким использованием ненормативной лексики.) ...

Попробуем разобраться, что же происходит с нашими производственными системами в ситуациях, похожих на описанную выше. Что это? Странное стечение каких-то совершенно непредсказуемых обстоятельств? Или всё же проявление неких определённых закономерностей, знание которых поможет нам понять свойства таких систем и ответить на многие ключевые вопросы?

С этой целью для начала рассмотрим простейшую модель, схема которой приведена на врезке 1. Моделируемая производственная система состоит из одного рабочего центра, включающего в себя один-единственный станок и буфер-накопитель перед ним². Предположим, что в начале каждого рабочего дня на вход системы (в буфер) поступает некоторое количество одинаковых заданий (заготовок). В течение дня станок обрабатывает задания из буфера в порядке их поступления и формирует выходной поток выполненных работ (изготовленных деталей). Это будет наша модель работы NCX-10.

Если в такой системе отсутствует вариабельность, иными словами, каждый день на вход поступает ровно N_1 заданий, а дневная производительность станка составляет ровно N_2 заданий, то совершенно очевидно, что возможны только два состояния буфера:

- (1) если $N_1 \leq N_2$ (то есть скорость поступления заданий **не выше** скорости их обработки), то в конце каждого рабочего дня буфер будет пуст;
- (2) если $N_1 > N_2$ (то есть скорость поступления заданий **выше** скорости их обработки), то со временем размер очереди в буфере-накопителе будет неограниченно возрастать.



В реальной жизни так не бывает; отклонения (вариабельность) есть всегда. Что, если вариабельность имеет место при формировании входного потока? Иными словами, в какие-то дни в буфер-накопитель поступает чуть меньше заданий на обработку, а в какие-то - чуть больше. Причём в среднем – те же самые N_1 заданий в день. Если наш рабочий центр находится в середине технологической цепочки, то это может происходить из-за вариабельности на предыдущих переделах, либо неравномерности транспортировки (подачи в буфер). Если рабочий центр расположен в самом начале процесса (как в случае с NCX-10), то причинами подобных отклонений могут быть, например, задержки поставок исходного сырья и материалов.

А что, если вариабельность имеет место и при формировании выходного потока? Иными словами, в какие-то дни наш станок может обработать чуть меньше заданий, а в какие-то - чуть больше. Причём в среднем – те же самые N_2 заданий в день. Причин таких отклонений может быть сколько угодно: отказы оборудования, брак, качество сырья, износ инструмента, квалификация персонала, изменение условий труда и состояния самих работников, и так далее и тому подобное.

Как меняются свойства системы при наличии вариабельности входных и/или выходных потоков? Для ответа на этот вопрос проведём серию компьютерных экспериментов, описывающих функционирование нашей простейшей модели в рамках нескольких сценариев, отличающихся друг от друга характером вариабельности. В каждом из рассматриваемых сценариев задаётся некоторое вероятностное распределение числа заданий во входном и выходном потоках и используется датчик псевдослучайных чисел³. Один сеанс моделирования имитирует поведение системы за период 360 рабочих дней (12 месяцев по 30 дней). Анализируется размер очереди (число заданий в буфере-накопителе) в конце каждого рабочего дня и некоторые дополнительные характеристики. Считается, что перед началом каждого сеанса буфер пуст.

Ниже показаны результаты четырёх сценариев, соответствующих наиболее интересному варианту $N_1 \leq N_2$ (то есть когда скорость поступления заданий не превышает скорость их обработки).

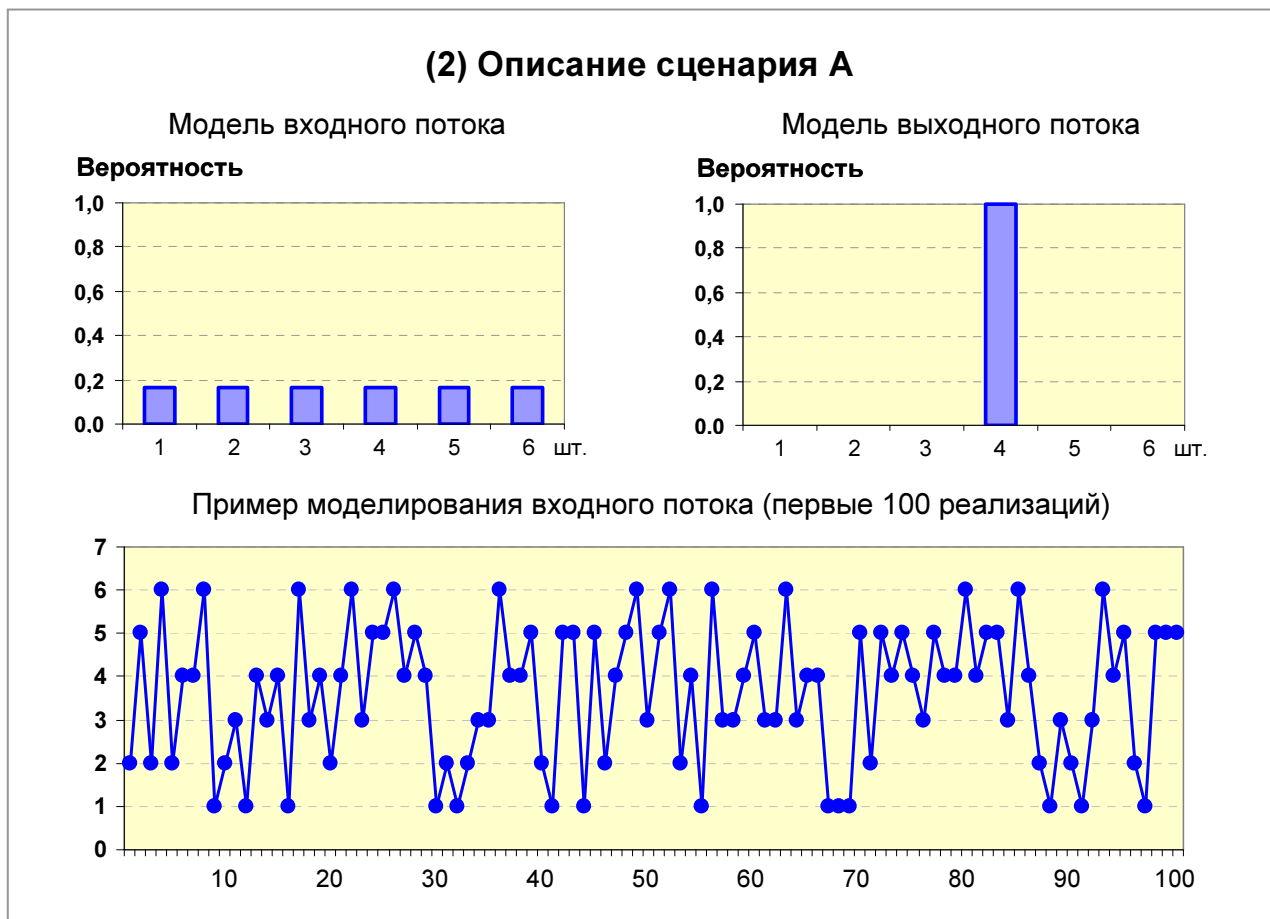
СЦЕНАРИЙ А: $N_1 < N_2$, вариабельность только на входе

Прежде всего, попробуем смоделировать ситуацию с NCX-10, которую наши производственники считают «оптимальной». Это тот случай, когда смежники поставляют примерно по 105 заготовок в месяц (или в среднем по 3,5 штуки в день), но размер входной партии меняется от 1 до 6. Помните? – «Поставки идут каждый день, в среднем партиями по три-четыре штуки. Правда, иногда к началу смены успевают подвести всего одну-две болванки, но бывает и так,

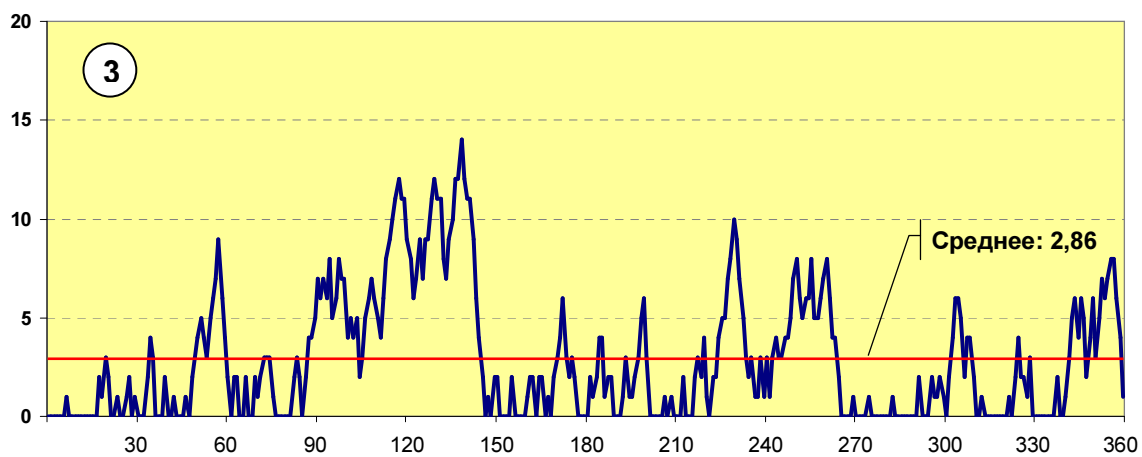
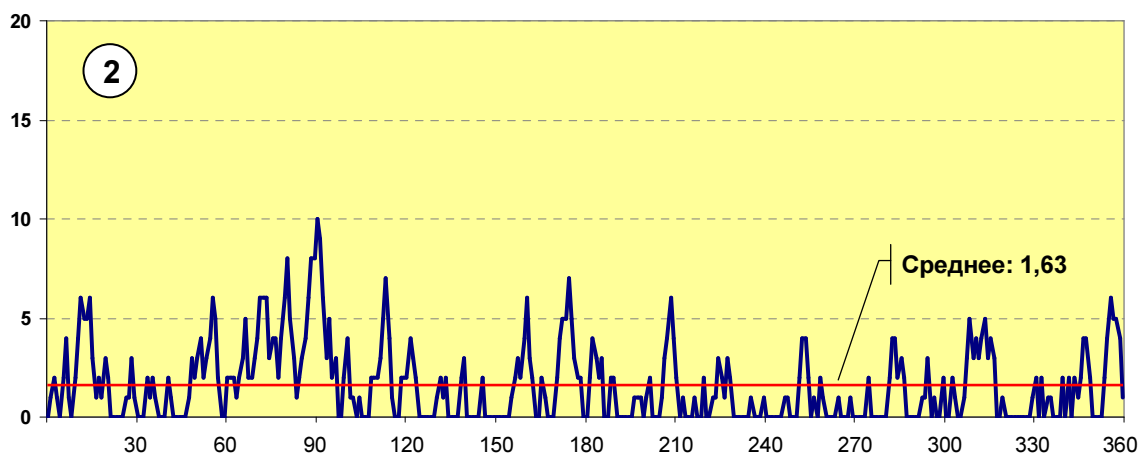
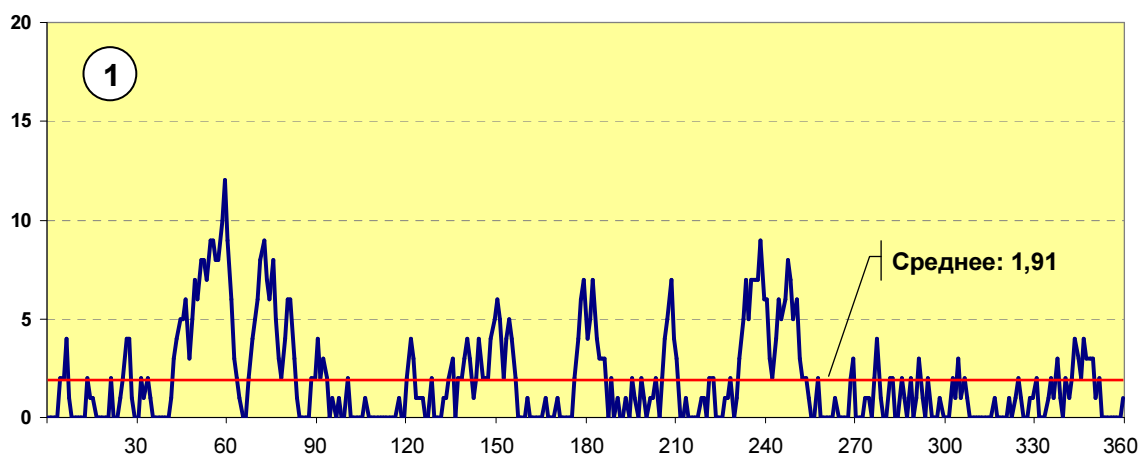
что сразу приходит пять-шесть». Точное распределение размера партии нам неизвестно, поэтому для наглядности будем считать его равномерным. То есть предположим, что в начале каждого рабочего дня в буфер перед станком с равной вероятностью поступает от 1 до 6 заданий⁴. Что же касается скорости выходного потока (производительности станка), то в «оптимальном» варианте она составляет ровно 4 штуки в день без каких бы то ни было отклонений (см. врезку 2).

Результаты трёх сеансов моделирования (по 360 дней в каждом) показаны на врезке 3.

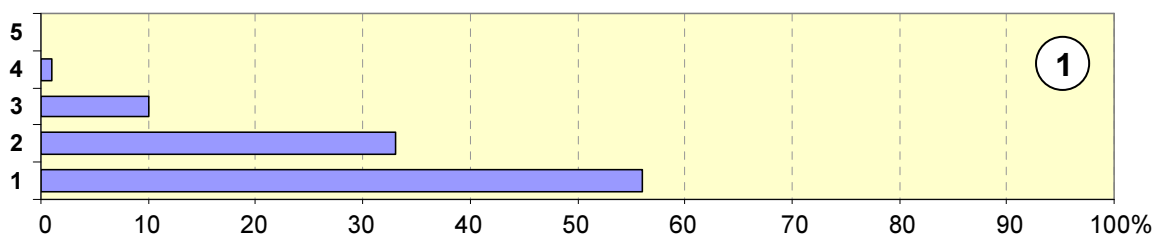
Не правда ли, весьма интересно? Средняя скорость входного потока составляет примерно 87% от производительности станка (3,5/4,0), но в конце почти каждого рабочего дня в буфере остаётся очередь из необработанных заготовок. Временами размер очереди близок или даже превышает 5 заданий, причём в отдельные дни оказывается больше 10 штук. А его среднее значение от сеанса к сеансу колеблется в районе двух заданий в день. Иными словами, почти половина всех заготовок обрабатывается только на второй день после запуска, а то и ещё позже. Для примера на врезке 3 приведена гистограмма распределения числа заданий по дням их обработки, построенная на основе



(3) Результаты моделирования по сценарию А



День обработки

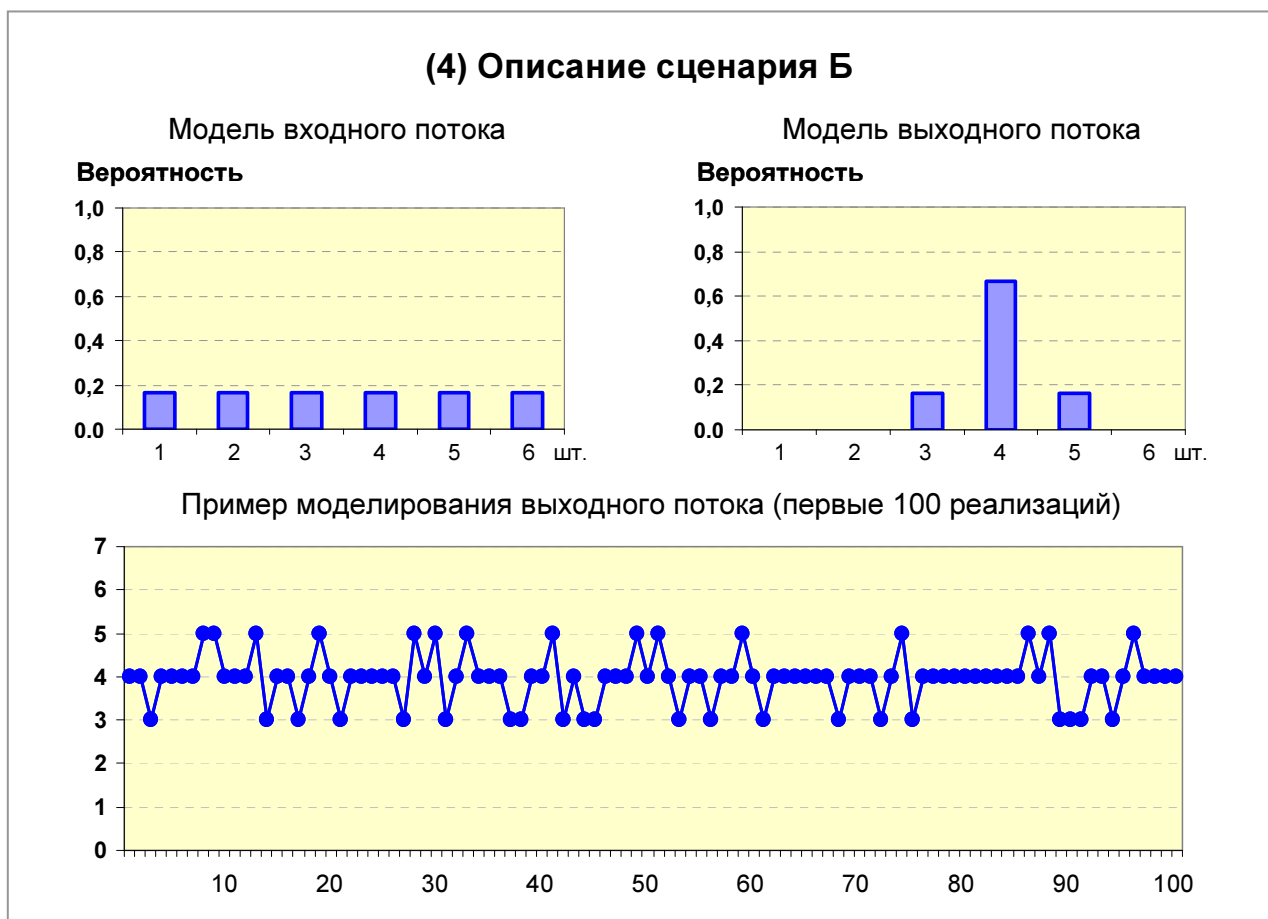


данных первого сеанса моделирования (всего 1257 заготовок за 360 дней). Как видно, в данном случае ровно треть всех заданий обрабатывается на второй день после их поступления, и ещё 11% - на третий или четвёртый день. И это почти в «идеальной» ситуации, когда станок способен выдавать ровно по 4 детали в день. Что же будет, если в выходной поток добавить хотя бы небольшой шум?

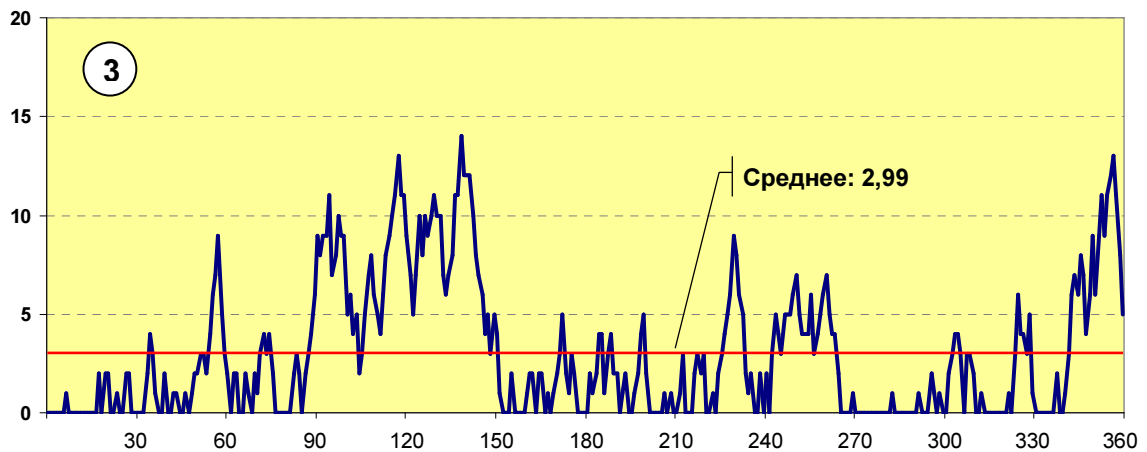
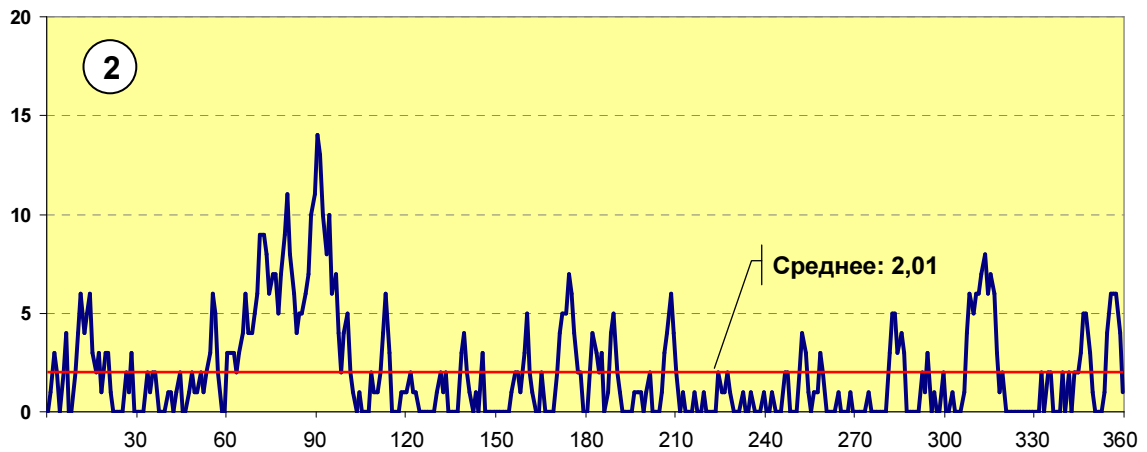
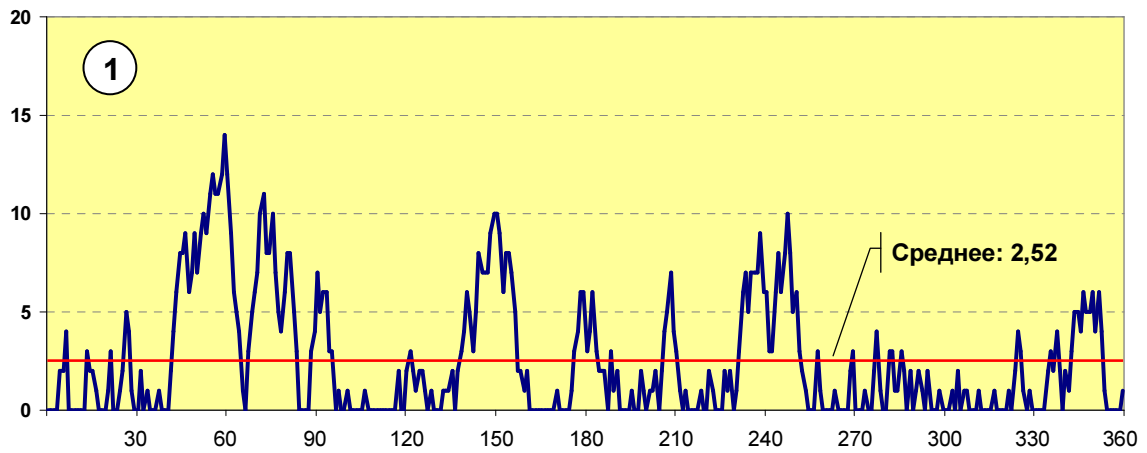
СЦЕНАРИЙ Б: $N_1 < N_2$, слабая вариабельность на выходе

Рассмотрим ситуацию, при которой средняя производительность NCX-10 по-прежнему составляет 4 задания в день, но время от времени случаются сбои (и тогда станок в состоянии обработать всего 3 заготовки), хотя иногда выдаются и удачные дни (когда производительность доходит до 5 заданий). В нашей модели это будет отображаться так: с вероятностью $2/3$ станок может выдать 4 детали в день, с вероятностью по $1/6$ – соответственно, 3 и 5 штук⁵. Параметры входного потока остаются теми же, - с равной вероятностью от 1 до 6 заданий в день (см. врезку 4).

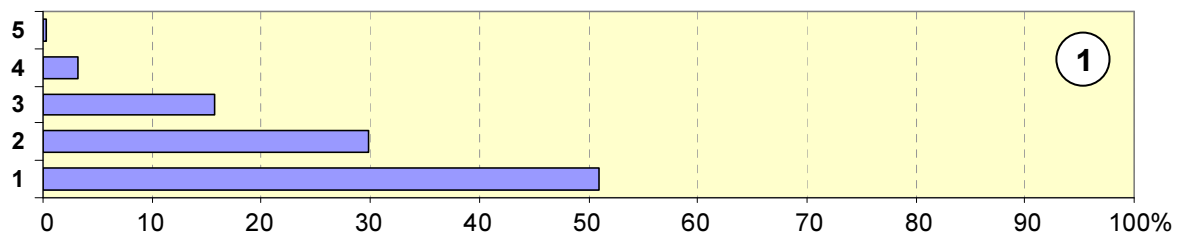
Результаты компьютерного моделирования представлены на врезке 5 (здесь для входного потока использовались те же выборки, что и в сценарии А).



(5) Результаты моделирования по сценарию Б



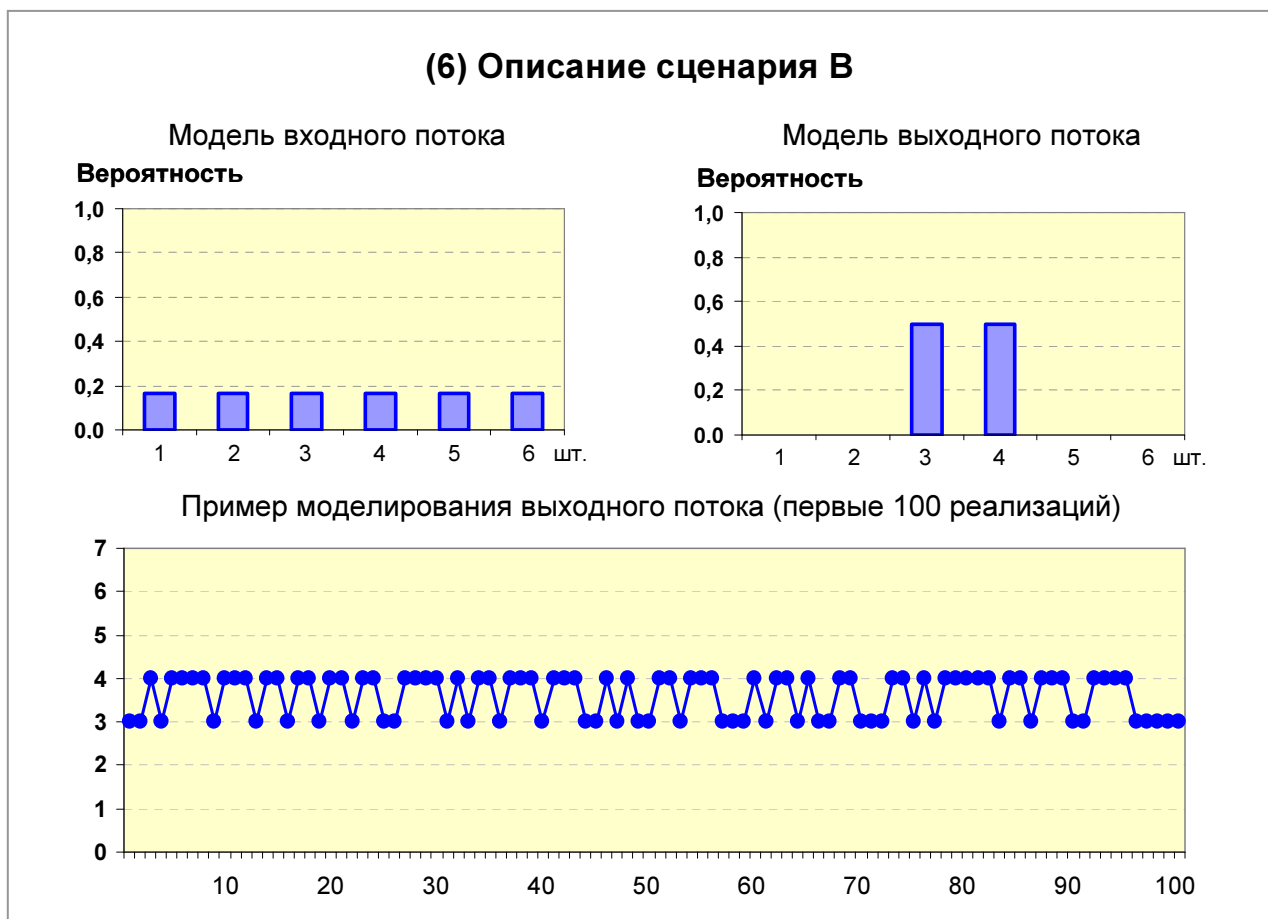
День обработки



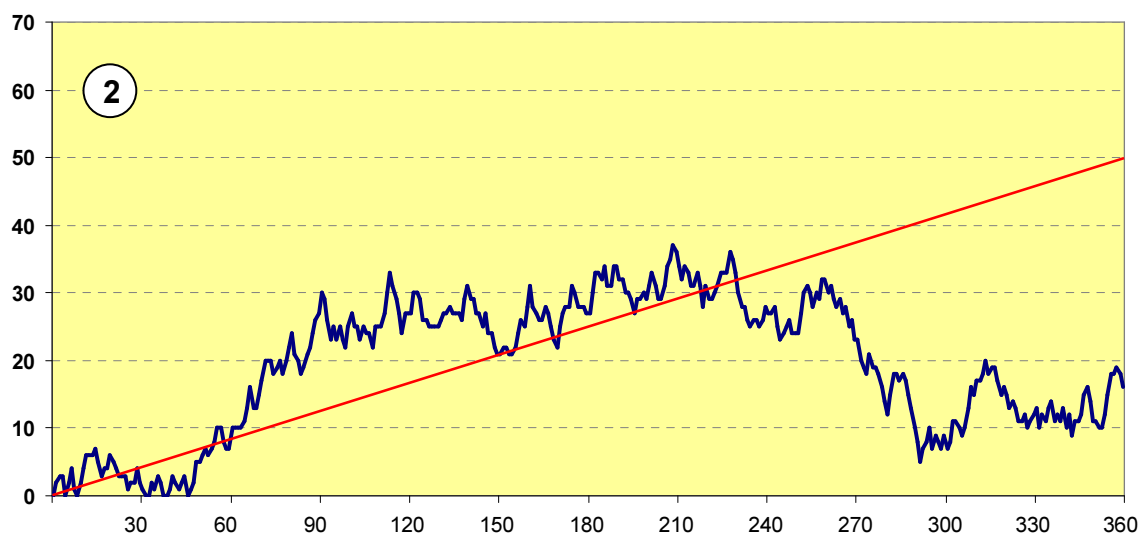
Система продолжает работать устойчиво, однако общий уровень отклонений стал заметно выше. Размер буфера в конце дня достаточно часто превышает 5 заданий, а его среднее значение уверенно приближается к трём. По данным первого сеанса моделирования уже 49% всех заготовок обрабатывается только на второй день после запуска или позже, причём почти 20% - на третий, четвёртый или пятый день.

СЦЕНАРИЙ В: $N_1 = N_2$, слабая вариабельность на выходе

Теперь обратимся к ситуации, которую производственники довольно часто считают наиболее предпочтительной. А именно, в последних двух сценариях рассмотрим случай «сбалансированных» мощностей, - когда средняя скорость входного потока заготовок в точности равна средней производительности станка. Вход в систему будем моделировать, как и прежде – с равной вероятностью поступления от 1 до 6 заданий в день (среднее 3,5 шт.), а для скорости обработки введём небольшие отклонения. Предположим, что станок может с равной вероятностью изготавливать 3 или 4 детали в день (среднее 3,5 шт.)⁶, как это показано на врезке 6. Соответствующие результаты очередных трёх сеансов компьютерного моделирования представлены на врезке 7.



(7) Результаты моделирования по сценарию В

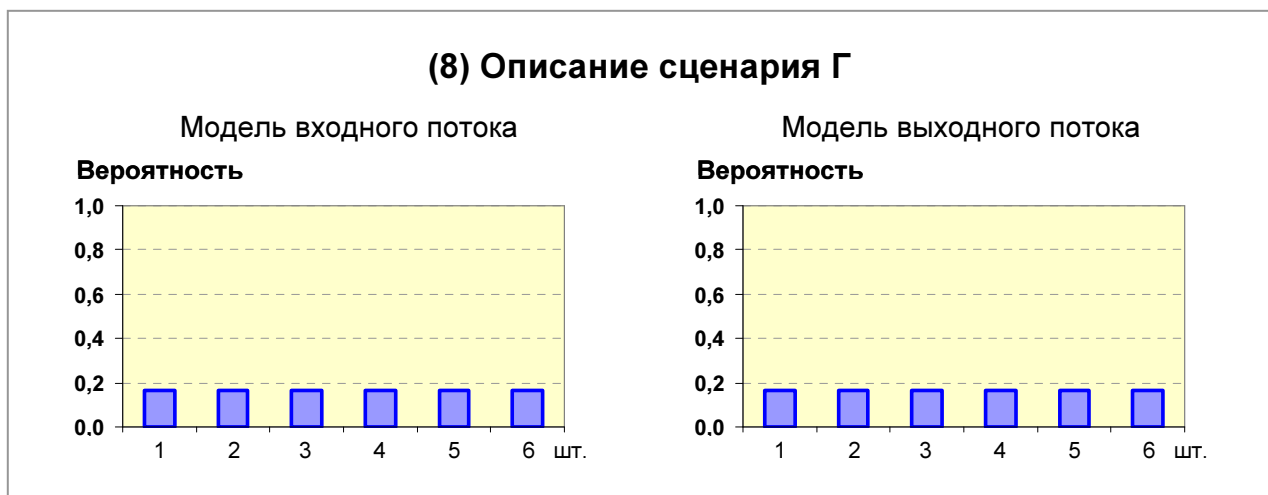


Кажется, что-то пошло не так, как хотелось бы! Есть ощущение, что размер буфера постоянно растёт, причём счёт идёт не на единицы, а на десятки. Уже не является большим исключением наличие в очереди по 20-30 заданий, что означает задержку их обработки (напомню, - при средней производительности станка 3,5 шт. в день) на неделю и больше. Вот вам и «сбалансированные» мощности! Понятно, от чего было возмущаться самому главному начальнику производства после ознакомления с фактическими данными по пролёживанию заготовок в ожидании обработки на NCX-10. Хотя при подобной организации потока 2-3 дня задержки в буфере – это ещё цветочки.

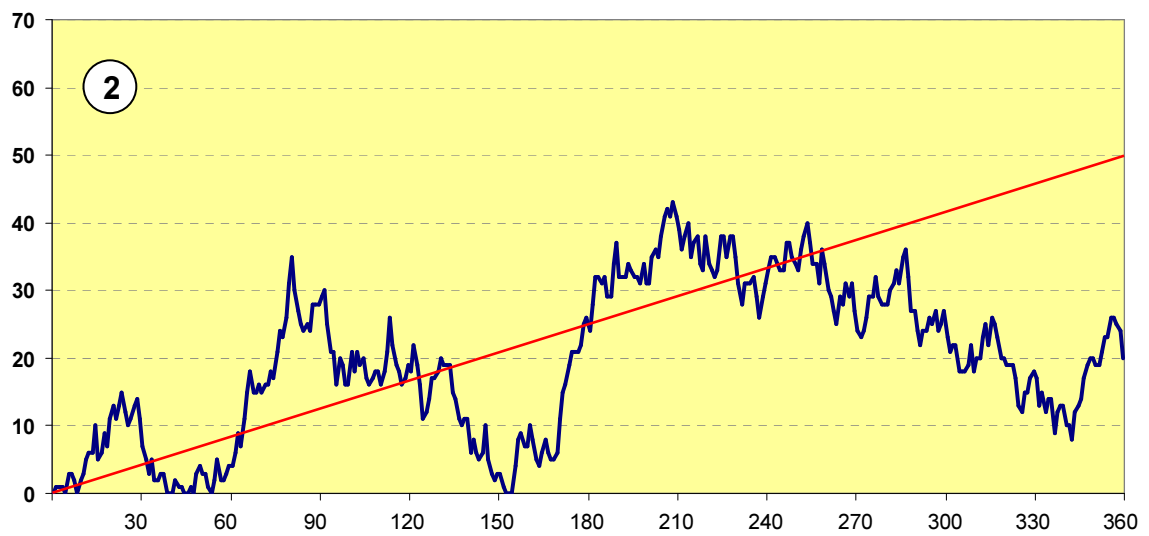
СЦЕНАРИЙ Г: $N_1 = N_2$, сильная вариабельность на выходе

Наконец, рассмотрим последний вариант развития событий, - когда мощности «сбалансированы» и, кроме того, отклонения от средних значений и на входе, и на выходе системы велики. Такую ситуацию мы будем моделировать двумя наборами случайных величин, с равной вероятностью принимающих значения от 1 до 6⁷ (см. врезку 8). Результаты выполненных экспериментов показаны на врезке 9.

По сравнению с предыдущим сценарием характерные особенности поведения системы теперь проявляются ещё более чётко. Прежде всего, это устойчивый рост длины очереди. Для наглядности на диаграммах врезок 7 и 9 проведена условная прямая линия, соответствующая равномерной скорости накопления заданий в буфере 50 штук за 360 дней. В последнем случае, - на фоне общего увеличения размера буфера, - можно зафиксировать и ещё одну интересную закономерность в работе системы, а именно, явное наличие «низкочастотных» колебаний с нарастающей амплитудой. Многим опытным руководителям из практики хорошо знаком эффект перемещения больших партий незавершёнки по производству «волнами» (то густо – то пусто), сметающими на своём пути все самые благие пожелания и лучшие прогнозы относительно эффективности



(9) Результаты моделирования по сценарию Г



наших производственных систем. Возможно, объяснение этого эффекта имеет смысл искать в ложных представлениях о целесообразности выстраивания сбалансированных производственных линеек?

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

В рассматриваемой нами простейшей модели производственной системы (см. врезку 1) считалось, что задания поступают в буфер-накопитель партиями, - по одной партии в начале каждого рабочего дня, и размер партий меняется от случая к случаю в соответствии с заданным видом входной вариабельности. При этом предполагалось, что обработка тоже происходит партиями, размер которых зависит от производительности станка в конкретный день (выходной вариабельности), но может оказаться и меньше этой величины, - в случае если в буфере нет нужного числа заготовок. Такая схема удобна для «ручного» моделирования и позволяет «на пальцах» почувствовать основные свойства и характер поведения системы в разных ситуациях.

Похожая модель, изучаемая в теории массового обслуживания⁸, использует другую схему, в которой задания и поступают в буфер, и обрабатываются станком по одному, причём входная вариабельность задаётся распределением времени между поступлением заданий, а выходная – распределением времени их обработки. Такая схема не очень удобна для «ручного» моделирования, но даёт возможность применять для качественного анализа конкретных ситуаций известные из теории результаты. В частности, в общем случае (для любого распределения входного и выходного потоков заданий) справедлива формула Кингмана⁹, в соответствии с которой среднее время ожидания в очереди на обработку приближённо оценивается следующим образом:

$$T_{\text{ож}}^* \approx \frac{(C_{\text{вх}}^2 + C_{\text{вых}}^2)}{2} \times \frac{U}{(1 - U)} \times T_{\text{вых}}^*$$

где $C_{\text{вх}} = \sigma_{\text{вх}} / T_{\text{вх}}^*$;

$T_{\text{вх}}^*$ и $\sigma_{\text{вх}}$ – среднее значение и среднеквадратичное отклонение распределения времени для входного потока;

$C_{\text{вых}} = \sigma_{\text{вых}} / T_{\text{вых}}^*$;

$T_{\text{вых}}^*$ и $\sigma_{\text{вых}}$ – среднее значение и среднеквадратичное отклонение распределения времени для выходного потока;

$U = V_{\text{вх}} / V_{\text{вых}}$ – коэффициент использования рабочего центра;

$V_{\text{вх}} = 1 / T_{\text{вх}}^*$ – средняя скорость (интенсивность) входного потока заданий;

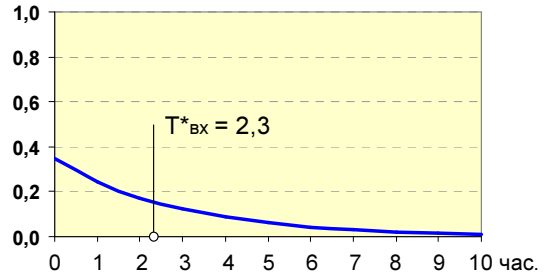
$V_{\text{вых}} = 1 / T_{\text{вых}}^*$ – средняя скорость (интенсивность) обработки заданий.

(10) Пример расчётов по формуле Кингмана

Входной поток: интервал времени между поступлением заданий на обработку подчиняется экспоненциальному распределению со средним значением 2,3 часа, что соответствует средней скорости $N_1 = 3,5$ шт. за 8-часовой рабочий день.

$T^*_{ВХ} = 2,3$ час.; $\sigma_{ВХ} = T^*_{ВХ} = 2,3$ час.; $C_{ВХ} = 1$;
 $V_{ВХ} = 1 / T^*_{ВХ} = 0,435$ шт./час.

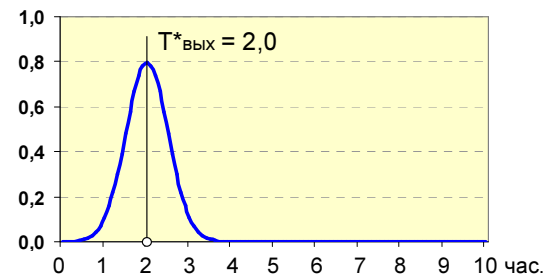
Вероятность



Выходной поток: время обработки заданий подчиняется нормальному распределению со средним значением 2,0 часа (что соответствует средней скорости $N_2 = 4$ шт. за 8-часовой рабочий день) и среднеквадратичным отклонением 0,5 часа.

$T^*_{ВЫХ} = 2,0$ час.; $\sigma_{ВЫХ} = 0,5$ час.; $C_{ВЫХ} = 0,25$;
 $V_{ВЫХ} = 1 / T^*_{ВЫХ} = 0,5$ шт./час.

Вероятность



Коэффициент использования рабочего центра: $U = V_{ВХ} / V_{ВЫХ} = 0,87$

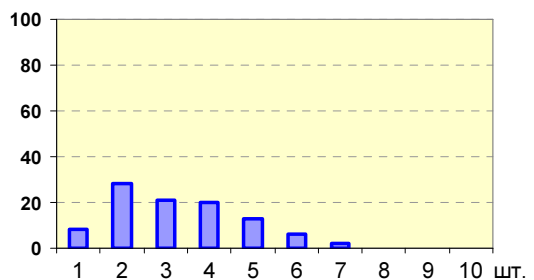
Среднее время ожидания в очереди на обработку:

$$T^*_{ОЖ} \approx \frac{(C^2_{ВХ} + C^2_{ВЫХ})}{2} \times \frac{U}{(1 - U)} \times T^*_{ВЫХ} = 0,53 \times 6,69 \times 2,0 \text{ час.} = 7,1 \text{ час.}$$

Результаты моделирования.

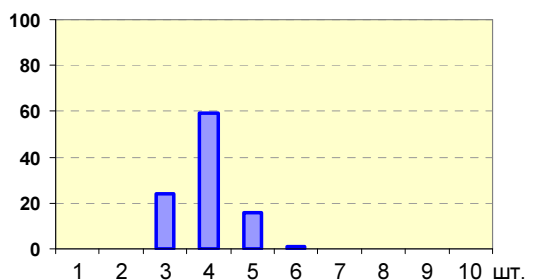
Имитация поступления заданий в буфер в соответствии с указанным выше экспоненциальным распределением; ось времени делится на 8-часовые интервалы и подсчитывается число событий в каждом интервале, - количество заданий, поступивших в течение одного рабочего дня (генерировалось примерно 350 заданий за 100 дней).

Число дней



Имитация обработки заданий на станке в соответствии с указанным выше нормальным распределением; ось времени делится на 8-часовые интервалы и подсчитывается число событий в каждом интервале, - количество заданий, обработанных в течение одного рабочего дня (генерировалось примерно 400 заданий за 100 дней).

Число дней



Из приведенной формулы следуют две важных закономерности:

- при одинаковых средних скоростях входного и выходного потоков среднее время ожидания в очереди больше в той системе, в которой выше общая вариабельность (сумма квадратов относительных отклонений от средних значений);
- по мере приближения коэффициента использования рабочего центра к 100% (то есть при попытке выравнивания средних скоростей поступления и обработки заданий) среднее время ожидания стремится к бесконечности, причём при любом ненулевом уровне общей вариабельности в системе.

На врезке 10 показан пример применения формулы Кингмана для ситуации, когда интервал времени между поступлением заданий в буфер-накопитель имеет экспоненциальное распределение со средним 2,3 дня, а время обработки заданий - нормальное распределение со средним значением 2,0 дня и среднеквадратичным отклонением 0,5 дня. Как видно из результатов моделирования, это напоминает рассмотренный нами ранее сценарий Б. В том случае средний размер буфера оказался близок к трём, что при средней скорости обработки 4 задания в день означает среднюю задержку с началом обработки заданий примерно на 6 часов. По формуле Кингмана получается близкое значение чуть больше 7 часов.

Заметим, что если и интервал между поступлением заданий в буфер и время их обработки распределены по экспоненциальному закону (так называемые системы обслуживания марковского типа М/М/1, для которых $C_{вх} = C_{вых} = 1,0$), то для среднего времени ожидания справедлива точная формула:

$$T_{ож}^* = \frac{U}{(1 - U)} \times T_{вых}^*$$

Например, если в рассмотренном на врезке 10 случае заменить выходное нормальное распределение на экспоненциальное с тем же самым средним значением 2,0 часа, то соответствующее среднее время ожидания в очереди увеличится до 13,4 часа или почти до двух рабочих дней. И это при том, что средняя скорость обработки заданий в системе на 14% выше средней скорости их поступления.

ВЫВОДЫ

- При наличии вариабельности входных и/или выходных потоков (то есть в условиях любого реального производства) поведение даже простейшей системы, состоящей из одного рабочего центра, принципиально отличается от идеальной ситуации, в которой вариабельность отсутствует.

- Управленческие решения (в том числе показатели, программы и детальные планы), принимаемые только лишь на основе средних значений без учёта вариабельности процессов, могут приводить к значительным ошибкам в оценке эффективности производственных систем.
- Попытки «сбалансировать» скорости поступления и обработки заданий для отдельных рабочих центров ведут к прямо противоположному результату, - к полной «разбалансировке» производственной системы.

ССЫЛКИ И КОММЕНТАРИИ

- ¹ Деминг Э. *Новая экономика*. – М.: Эксмо, 2006; с. 172.
- ² Модель, описывающая ситуацию с несколькими рабочими центрами в цепочке последовательной обработки, будет рассмотрена в следующей части настоящей статьи.
- ³ За основу для моделирования взят генератор равномерно распределённой случайной величины на интервале (0,1) из пакета, который можно найти по ссылке: www.hcxl.ru/mcf02.html.
- ⁴ При «ручном» моделировании это соответствует результату бросания обычной 6-гранной игральной кости; при компьютерном моделировании нужное число получается по формуле: $y = \text{INT}(6 \cdot x) + 1$, где x – значение, возвращаемое генератором равномерно распределённой случайной величины на интервале (0,1).
- ⁵ При «ручном» моделировании обычная 6-гранная игральная кость каждый день бросается дважды; для входного потока – аналогично сценарию А; для выходного потока – при выпадении чисел 1, 2 или 6 в качестве результата принимается значение 4.
- ⁶ При «ручном» моделировании обычная 6-гранная игральная кость каждый день бросается дважды; для входного потока – аналогично сценарию А; для выходного потока – при выпадении чисел 1 или 2 в качестве результата принимается значение 3, при выпадении чисел 5 или 6 принимается значение 4.
- ⁷ При «ручном» моделировании обычная 6-гранная игральная кость каждый день бросается дважды, - отдельно для входного и выходного потоков.
- ⁸ См., например: **Клейнрок Л.** *Теория массового обслуживания*. – М.: Машиностроение, 1979.
- ⁹ См., например: **Hopp W., Spearman M.** *Factory Physics*. – McGraw-Hill / Irwin, 2007. В Интернете также можно найти прекрасную работу: **Hopp W.J.** *Single Server Queuing Models* - <http://iiesl.utk.edu/Courses/E406%20S07/Slides/Single%2520Server%2520Queueing%2520Models.pdf> (хотя следует иметь в виду, что в ней формула Кингмана приведена с опечаткой).

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.

(1) Экономическая модель производства в условных единицах**ДОХОДЫ**

Отпускная цена конечного изделия:

$$C_1 = 10 \text{ у.е./шт.}$$

РАСХОДЫ

Переменные затраты (покупная цена заготовки):

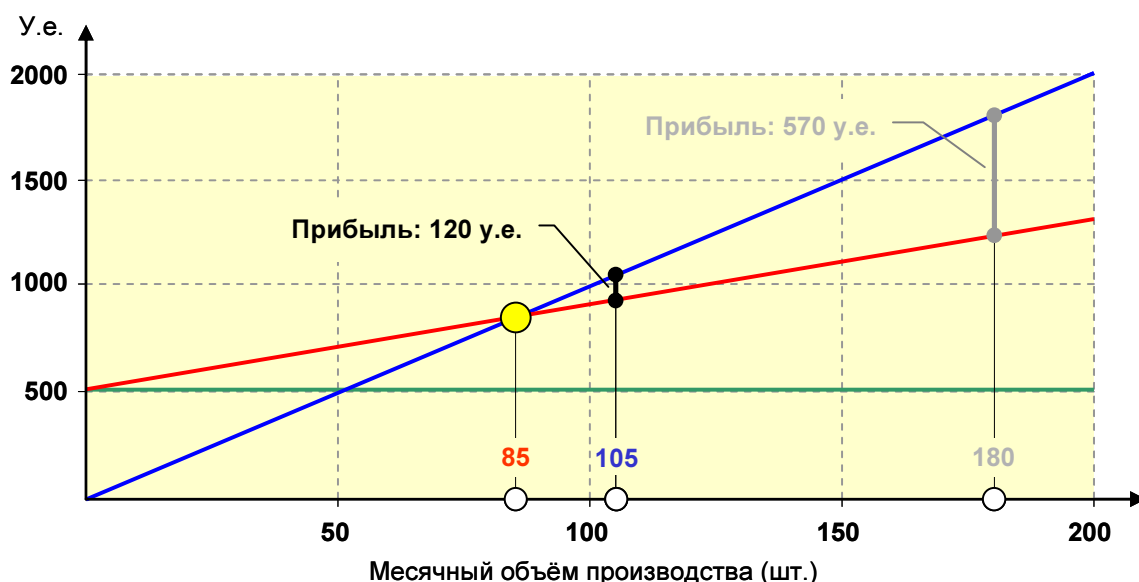
$$C_2 = 4 \text{ у.е./шт.}$$

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.

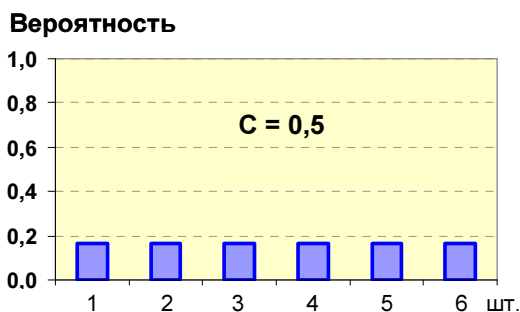


– Мы исходили из условия, – поясняет начальник производства, – что средняя пропускная способность нашей системы должна составлять примерно 105 изделий в месяц (на всякий случай, чуть больше плана) или 3,5 штуки в день. Именно с такой средней скоростью от смежников поступают заготовки, и на такую среднюю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

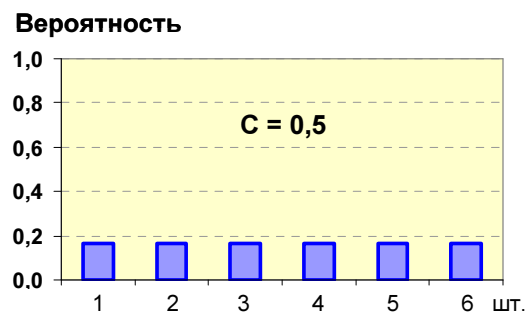
– Ничего не понимаю! – раздражённо реагирует генеральный директор. – Если производственная цепочка выстроена самым оптимальным образом, всё сбалансировано и на вход подаётся 105 заготовок в месяц, то почему же тогда на выходе всего 80? Значит, что-то не так происходит внутри самой системы. Вероятно,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

(2) Пример моделирования производственного процесса

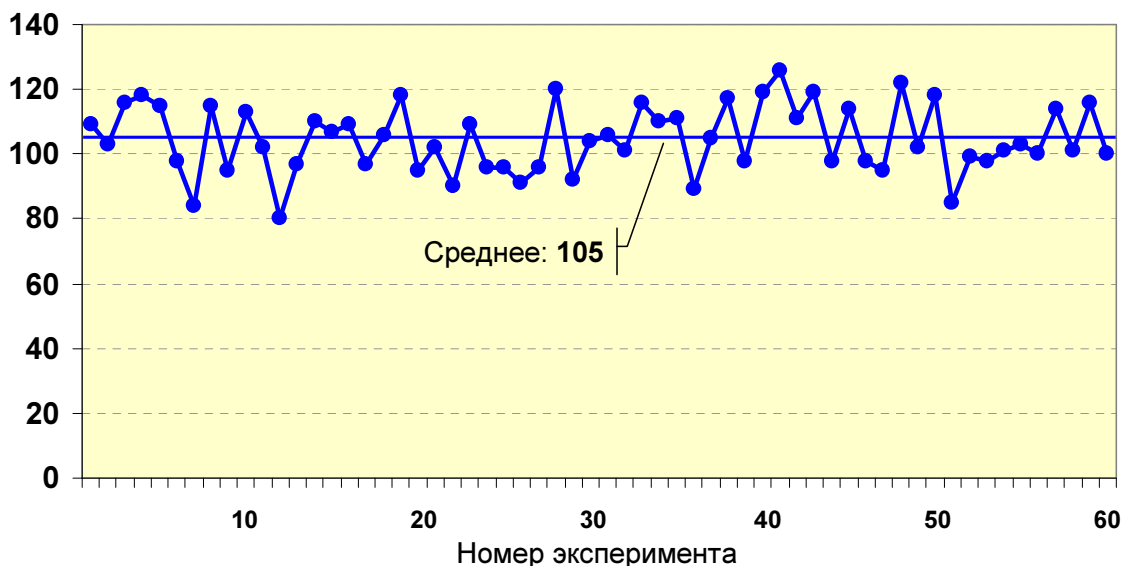
Модель входного потока



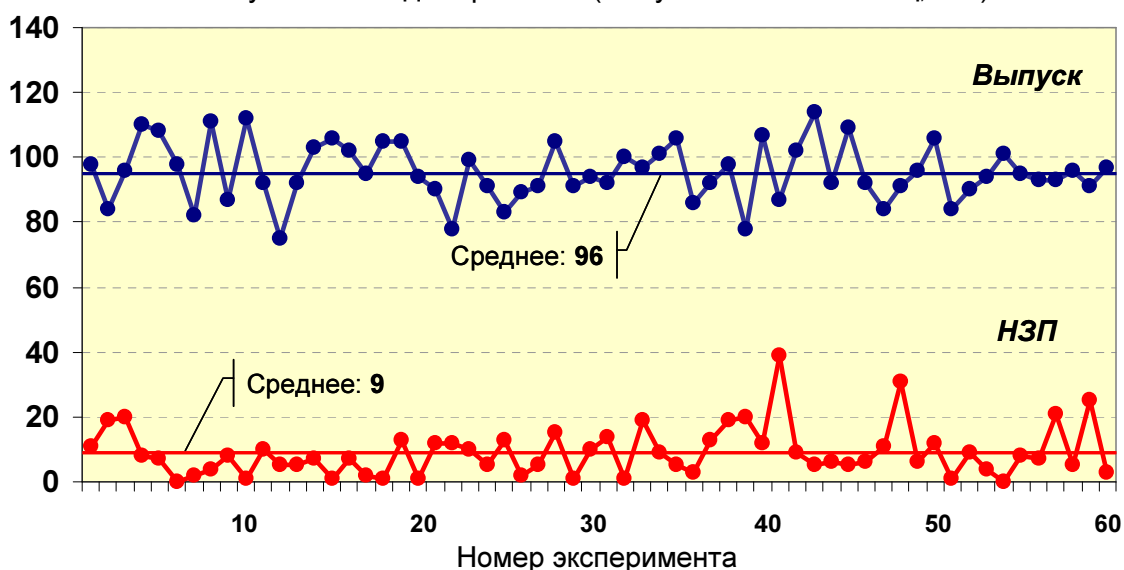
Модель выходного потока



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.

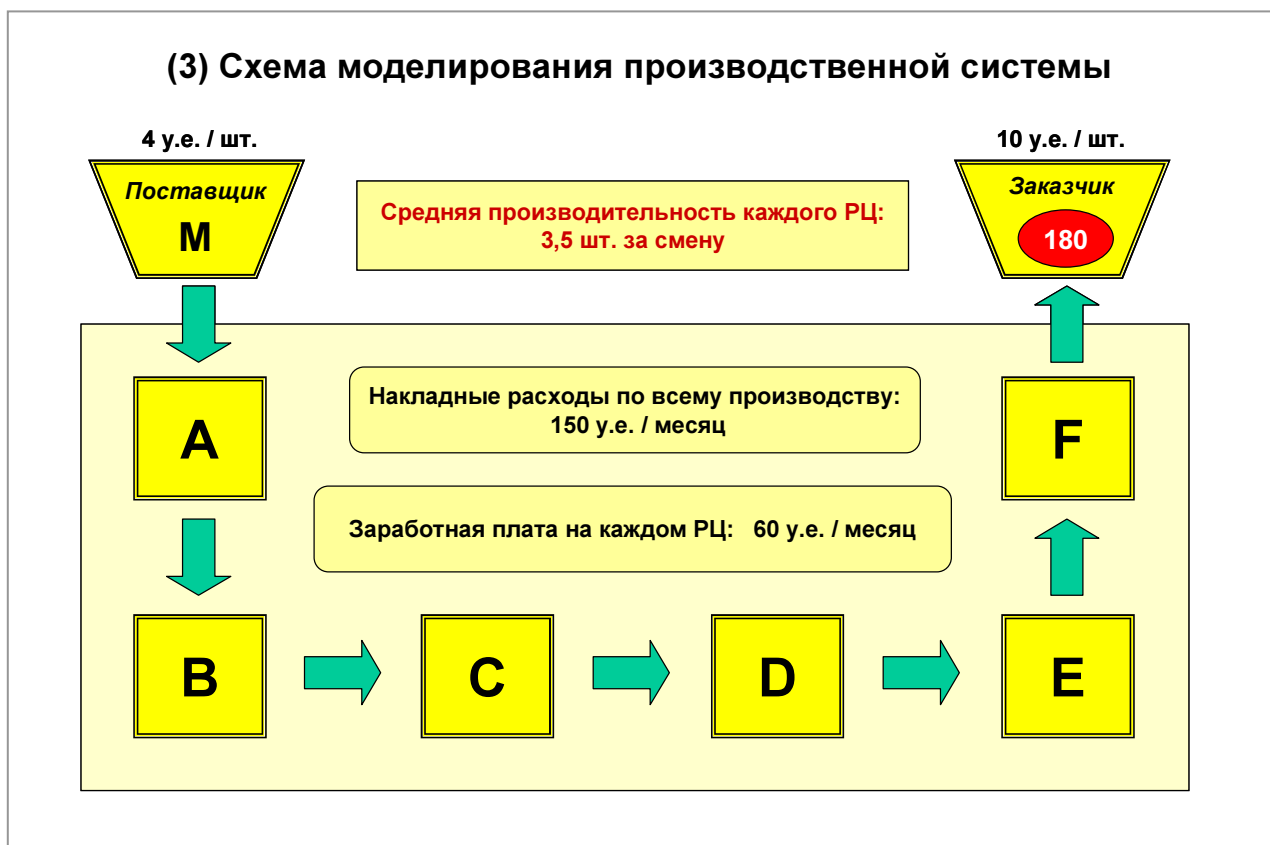
Поскольку наше производство содержит шесть последовательных переделов, то давайте рассмотрим простую модель, схема которой приведена на врезке 3. Будем считать, что моделируемое предприятие выпускает одно-единственное изделие, которое изготавливается в процессе последовательной обработки одной заготовки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

1. От поставщика **М** 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.

- 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 **Ф** в виде готовой продукции сразу же отправляются заказчику. День обработки заготовки на рабочем центре **Ф** считается днём выпуска соответствующего изделия.
- 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!

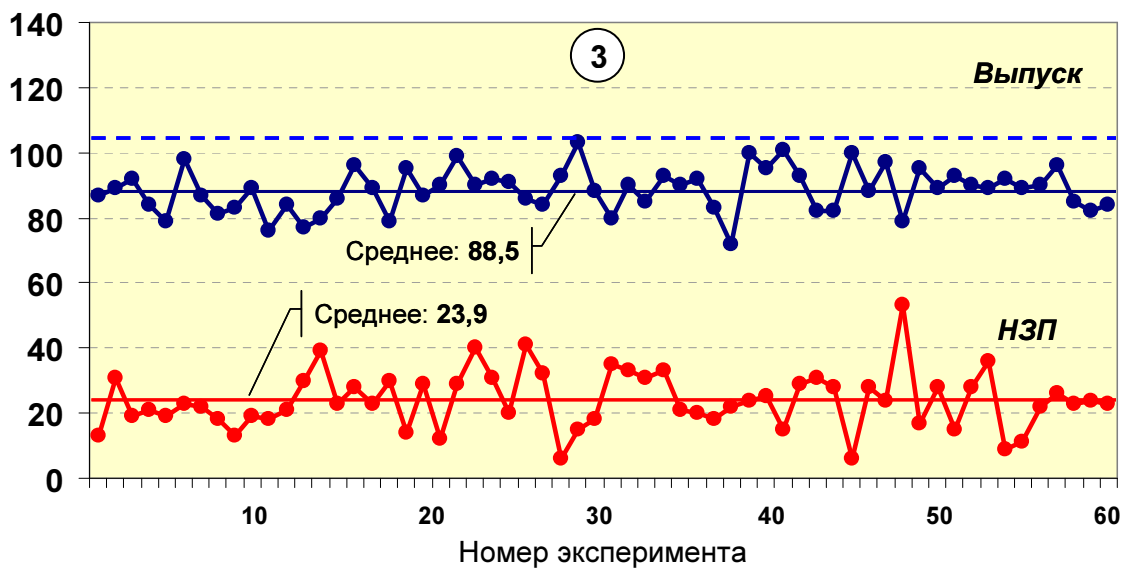
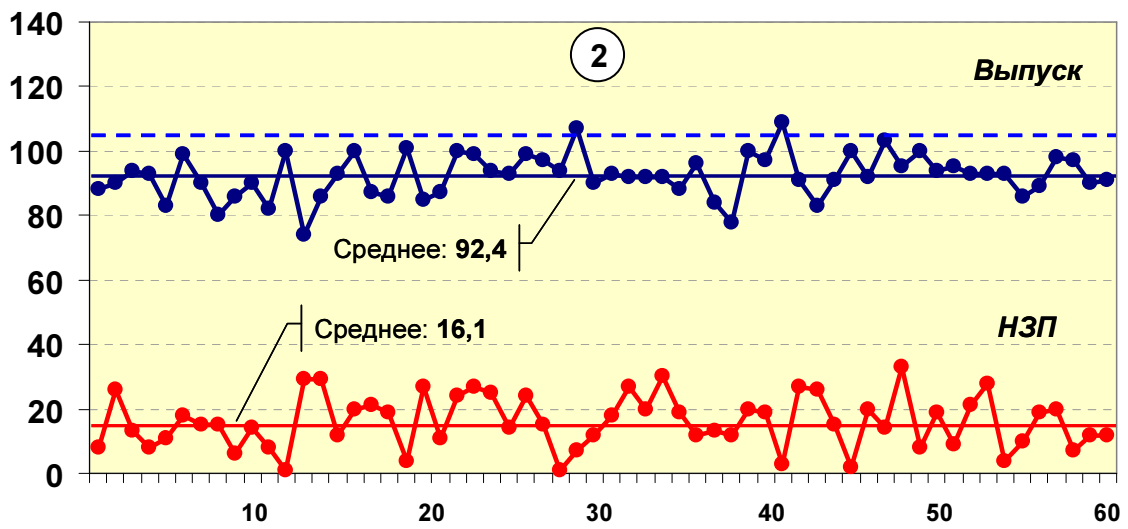
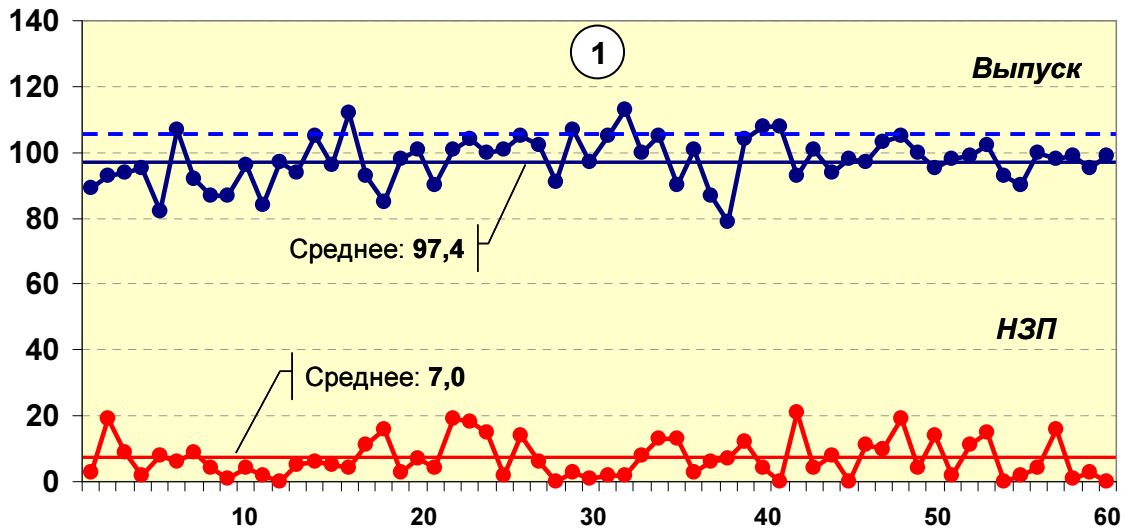
Кажется, производственники правильно учли влияние случайных факторов и построили вполне адекватную модель доходности своего бизнеса. Так что, по всей видимости, причины низких фактических показателей деятельности их предприятия не следует связывать с внутренней структурой системы. Но, тем не менее, проведём 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, D, E** и **F** 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.

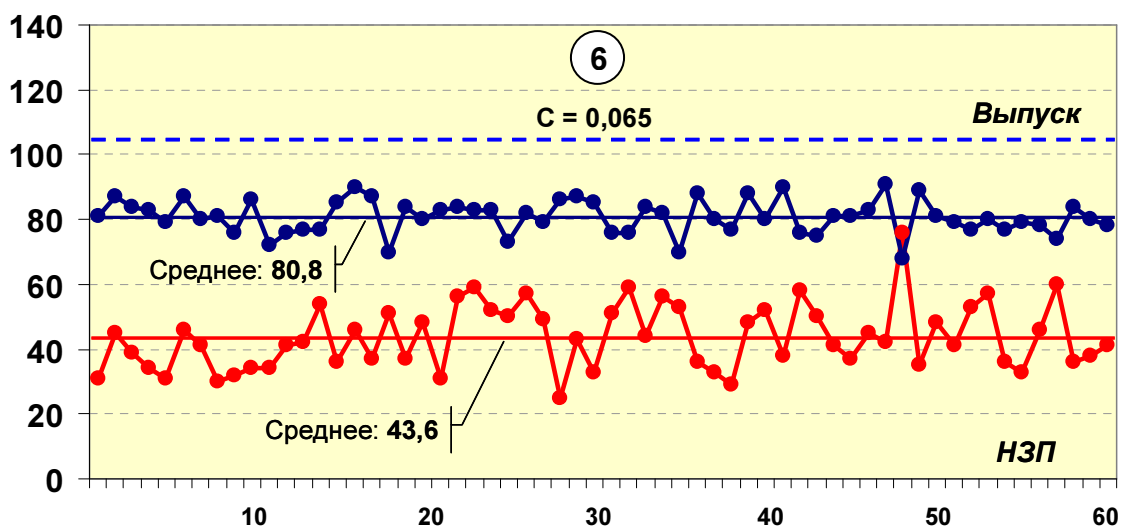
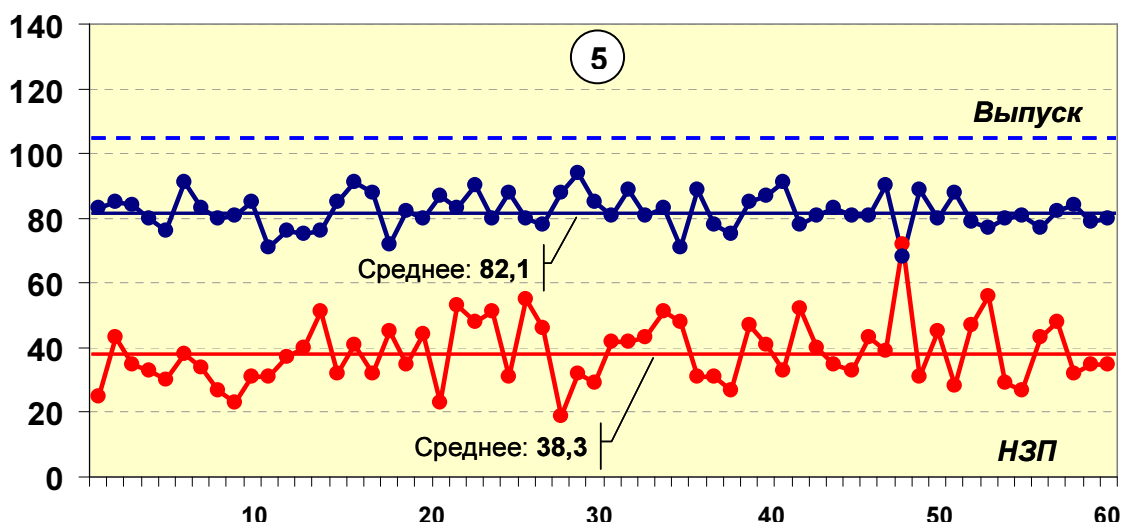
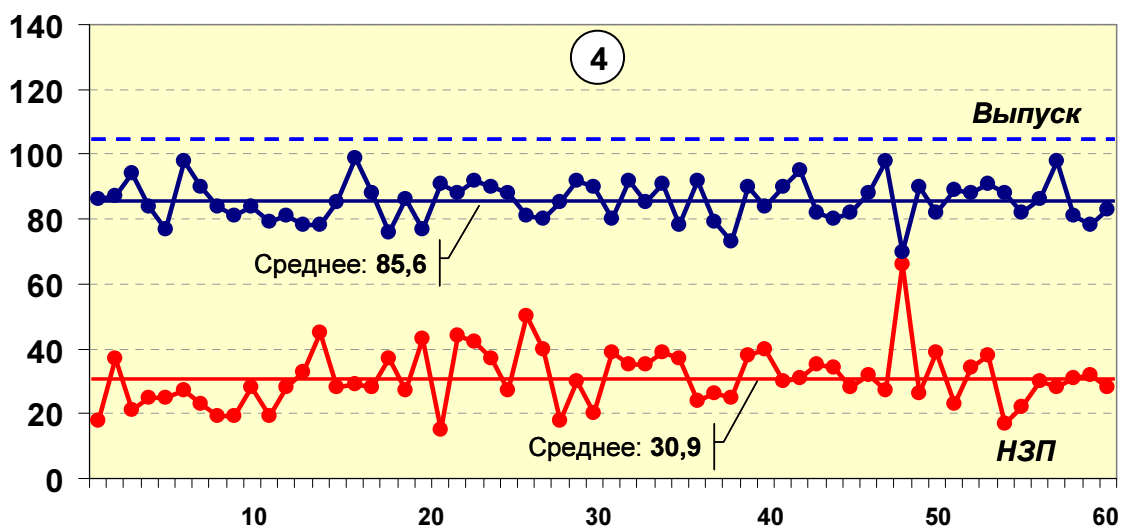
Итак, что же получается? Характеристики графика под номером 1 в целом соответствуют данным моделирования, которое в своё время провёл молодой специалист завода: среднемесячный выпуск составляет чуть меньше 100 (96-

(4) Результаты моделирования для исходного сценария



Номер эксперимента

(5) Результаты моделирования для исходного сценария



Номер эксперимента

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.

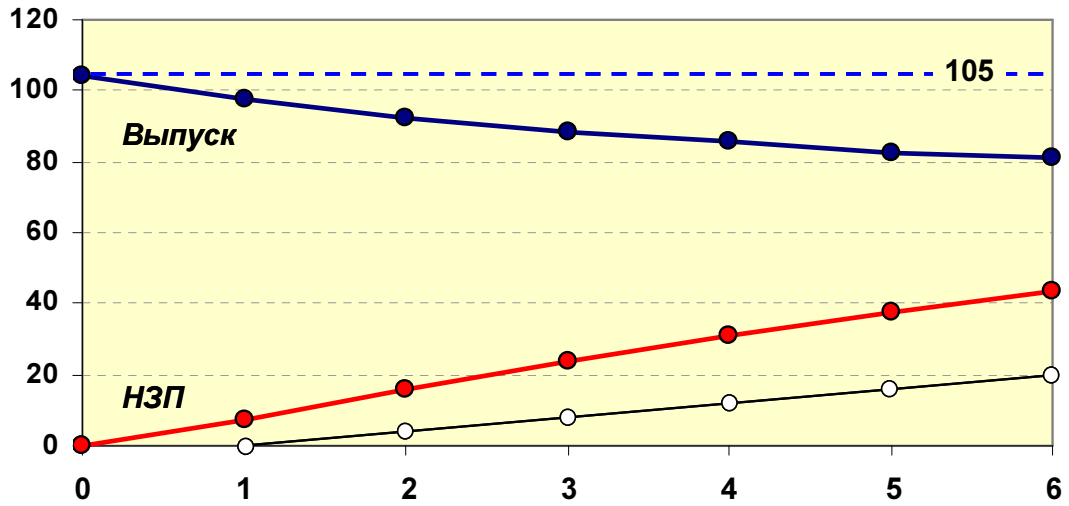
Для иллюстрации эффекта мультипликации вариабельности в системах с последовательной обработкой на врезке 6 приведены дополнительные данные, полученные по материалам выполненного компьютерного моделирования. На верхнем графике отражена зависимость среднего выпуска и среднего размера незавершённого производства 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 **A** составляло бы ровно 6 дней, а объём незавершённого производства оставался бы постоянным на уровне 20 единиц.

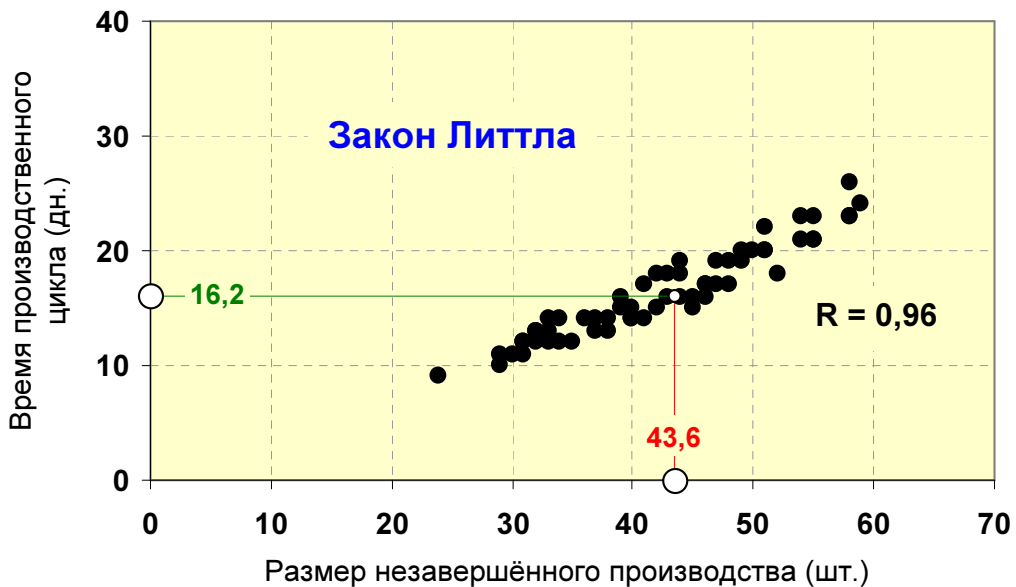
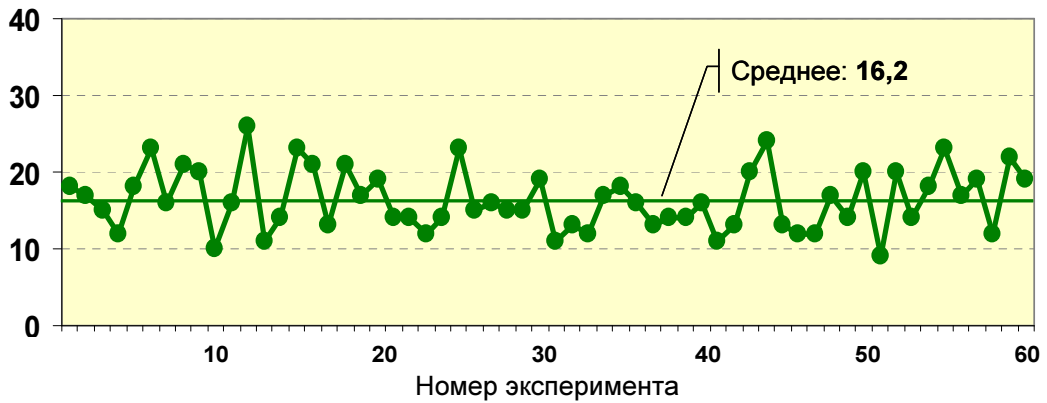
Однако при наличии вариабельности поведение нашей системы изменяется кардинальным образом. Время изготовления изделий становится значительно больше (см. средний график на врезке 6), причём оно возрастает прямо пропорционально размеру незавершённого производства (см. нижний график на врезке 6). Что лишний 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

(6) Дополнительные результаты моделирования для исходного сценария

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 центров?⁷ 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 для 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.

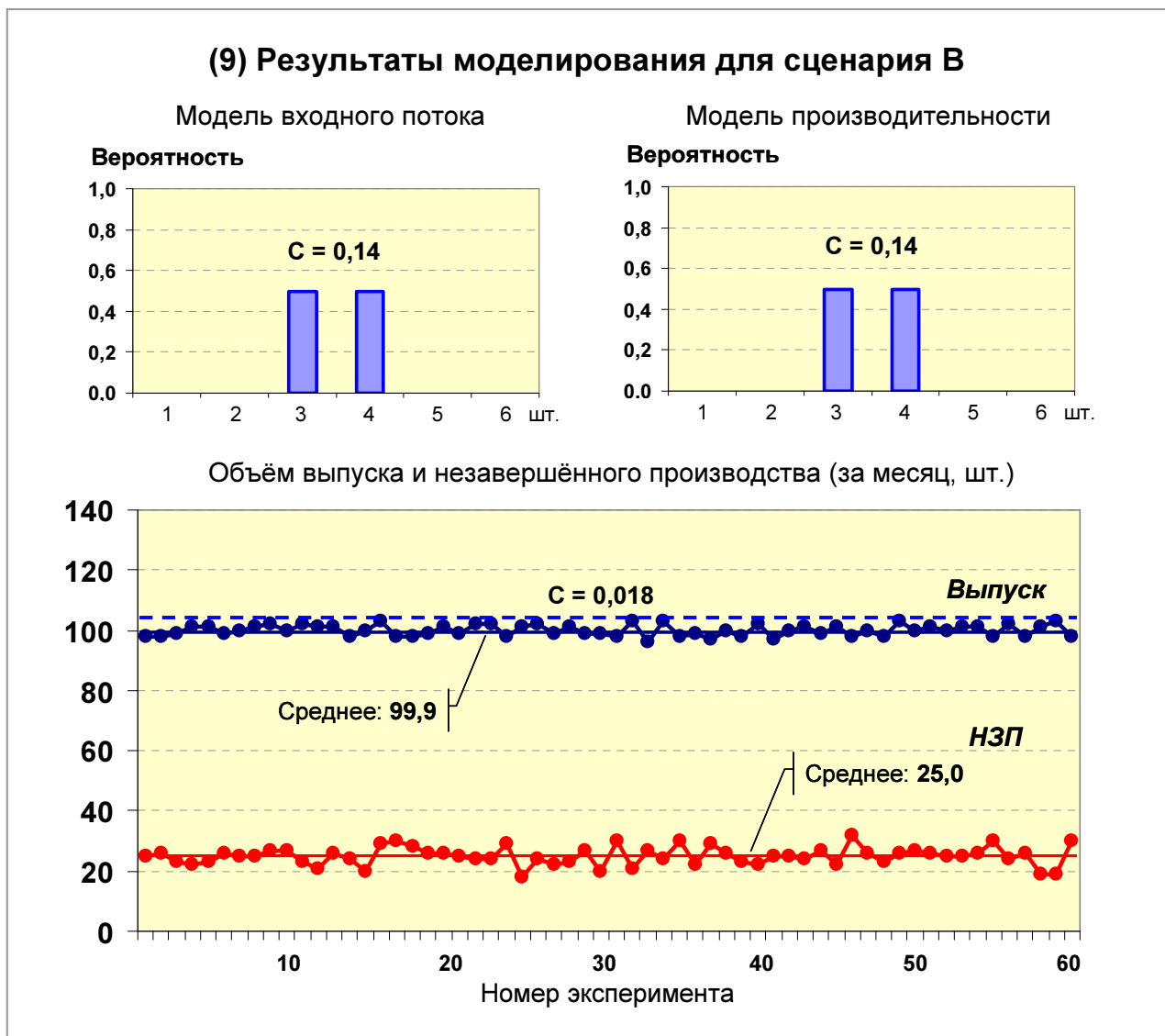
Соответствующие результаты компьютерного моделирования показаны на врезке 8. Средний выход всей системы вырос до 96 изделий в месяц (против 81 при исходном сценарии и 89 при сценарии А), а размер накопленного за 30 дней НЗП сократился до 29 штук. Расчётное значение «эффективной» точки безубыточности 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

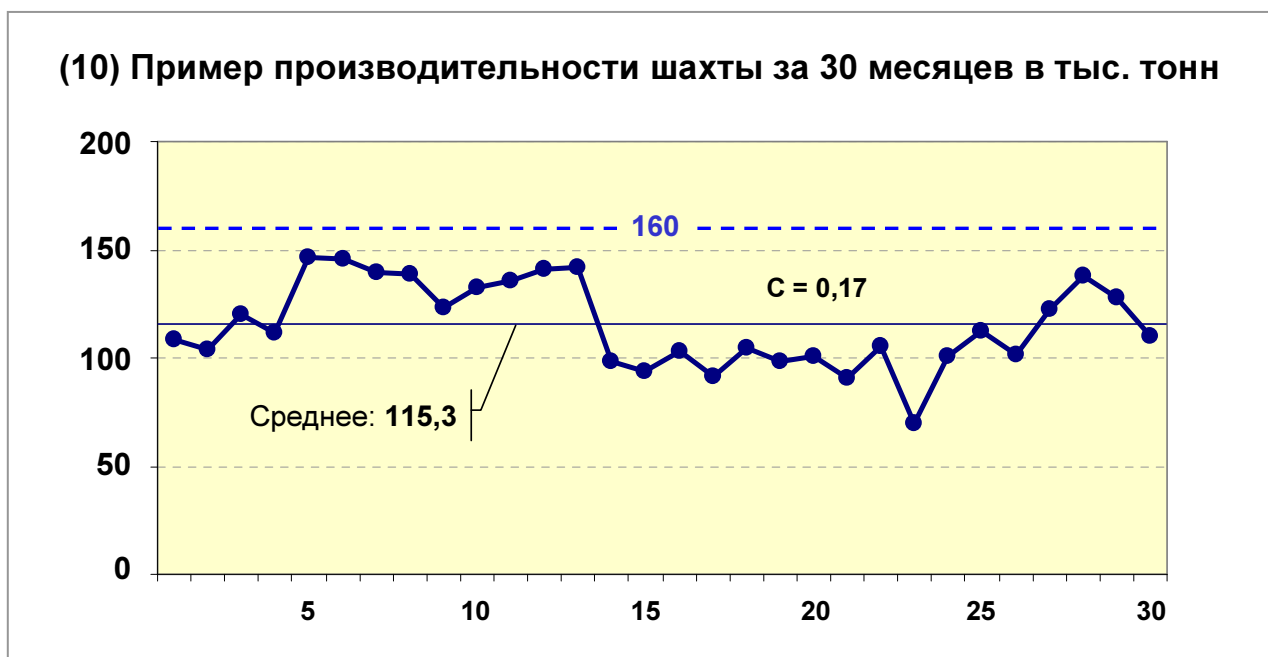
Допустим, что поставщику заготовок также удалось существенно улучшить свою производственную систему, и теперь он может с равной вероятностью подвозить нам ежедневно 3 или 4 заготовки (среднее 3,5 шт.). При этом все рабочие центры в состоянии обеспечивать производительность обработки как в предыдущем 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. При этом внутри системы происходит постоянное накопление необработанных заданий (незавершённого производства), а время производственного цикла изготовления изделий (по закону Литтла) 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'e, 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 и зависимости процессов более подробно обсуждается в заметке автора: **Жаринов С.** *О детальном и укрупнённом планировании.* - www.leanzone.ru
- 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.