

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 деньги 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?

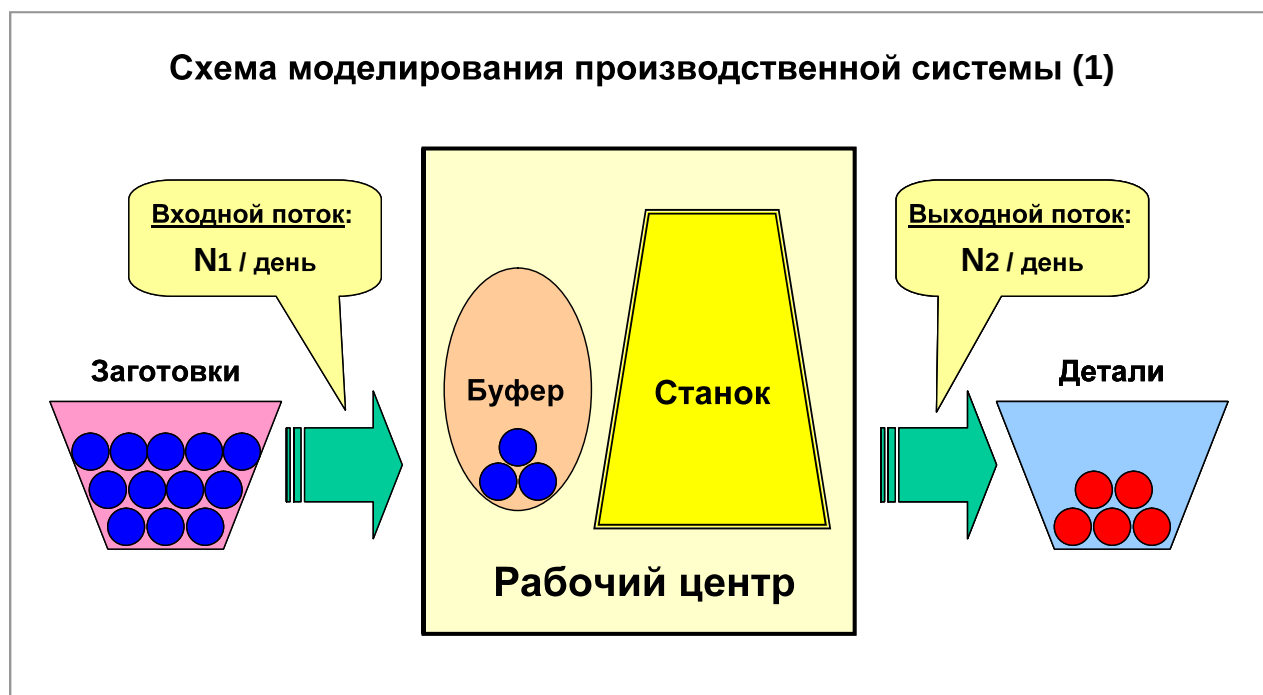
– ??? (Дальше совещание продолжается на повышенных тонах с широким использованием ненормативной лексики.) ...

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 рабочий центр 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 рабочего центра 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 рабочий центр 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).

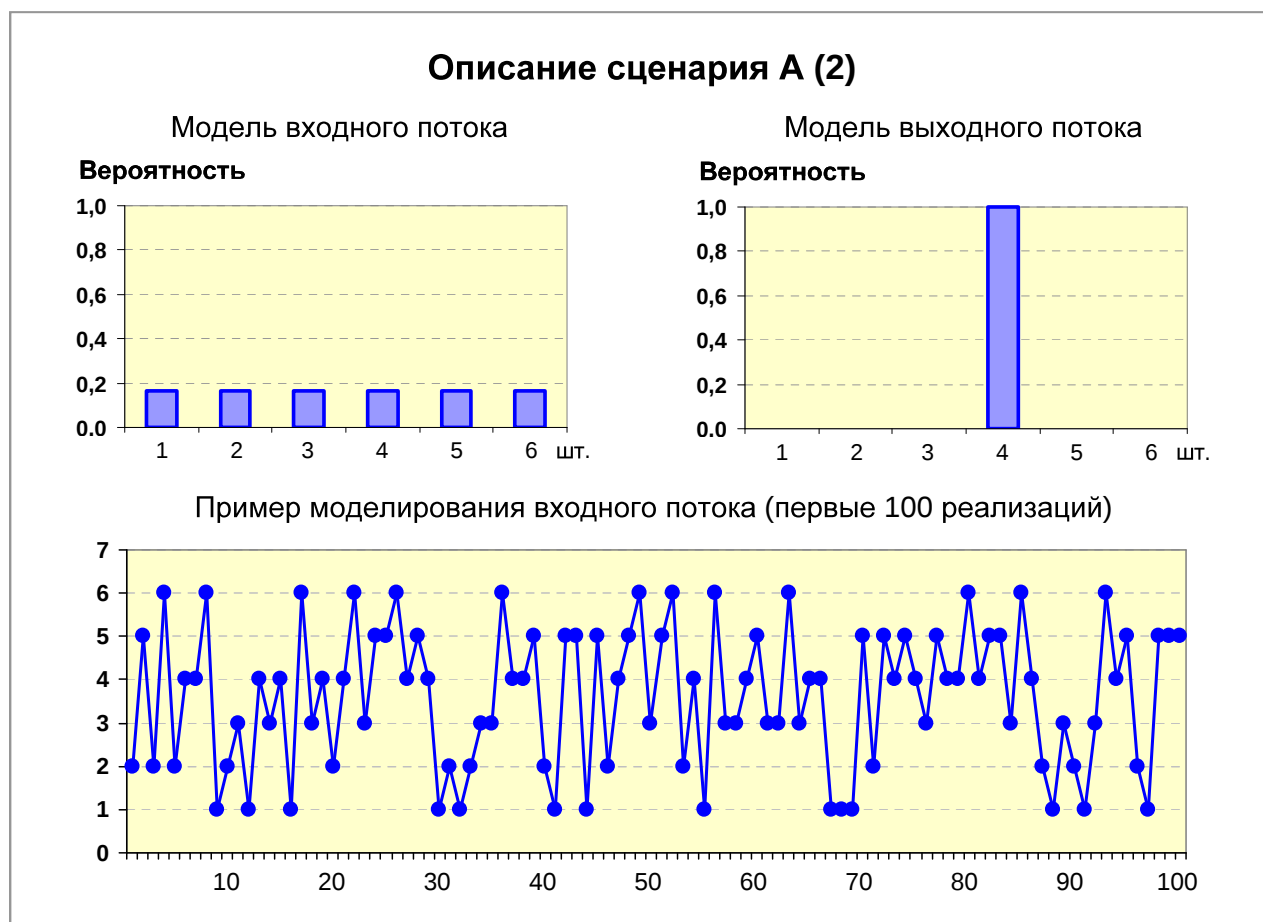
СЦЕНАРИЙ А: $N_1 < N_2$, вариабельность только на входе

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,

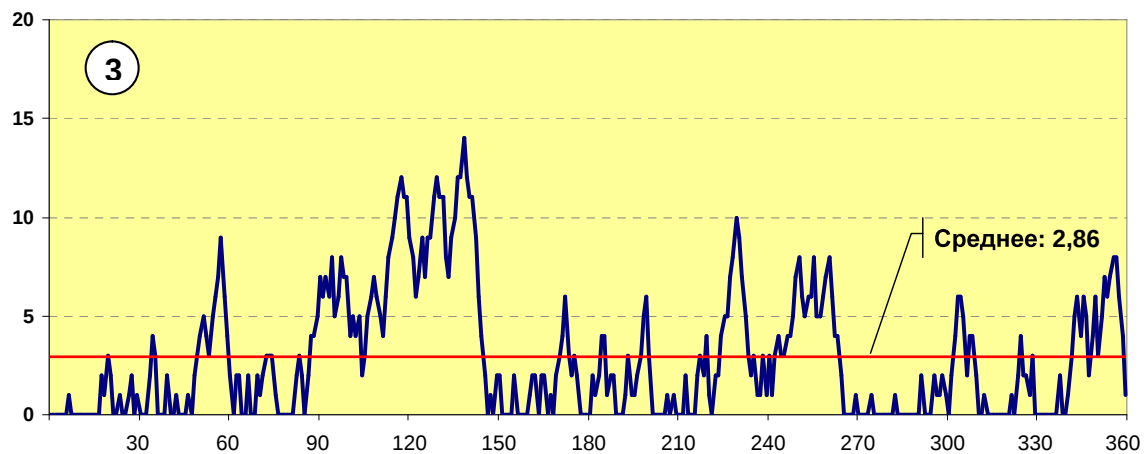
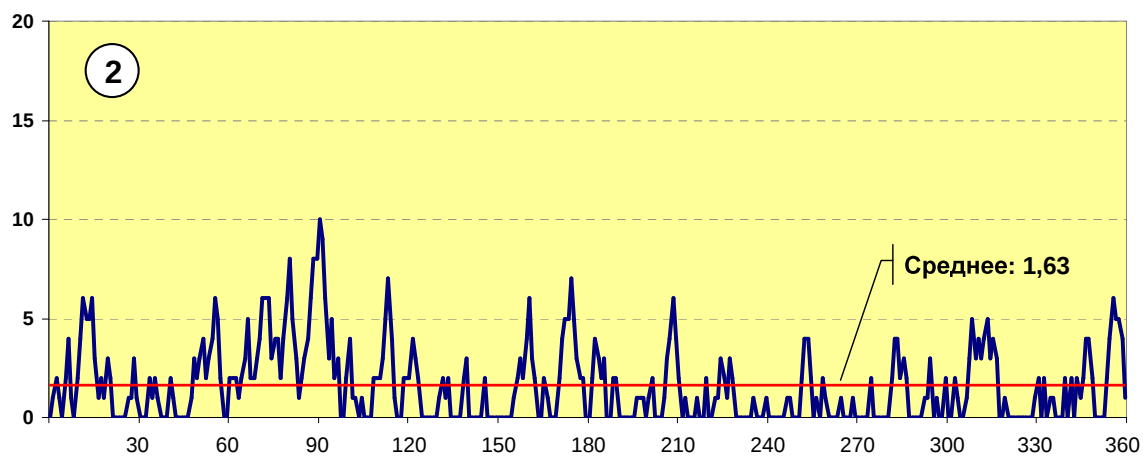
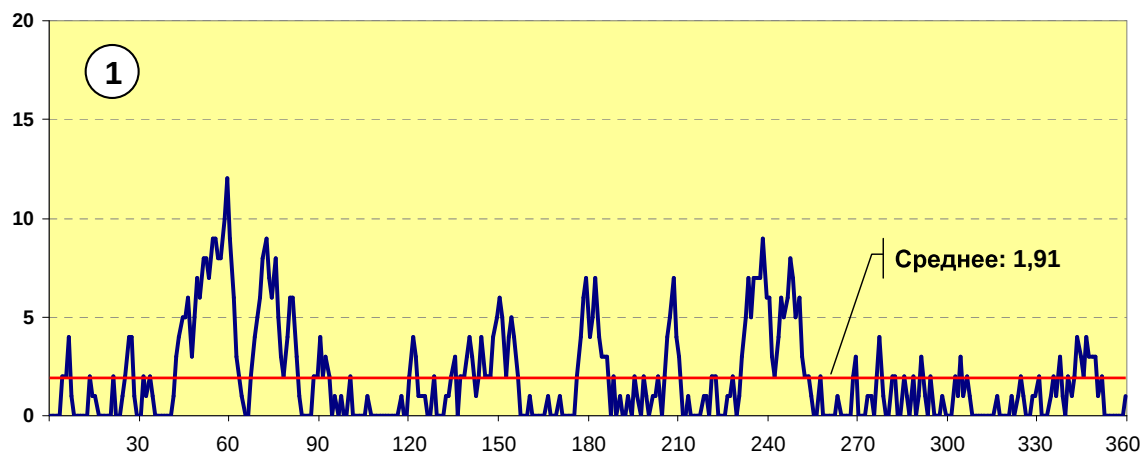
что сразу приходит пять-шесть». Точное распределение размера партии нам неизвестно, поэтому для наглядности будем считать его равномерным. То есть предположим, что в начале каждого рабочего дня в буфер перед станком с равной вероятностью поступает от 1 до 6 заданий⁴. Что же касается скорости выходного 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.

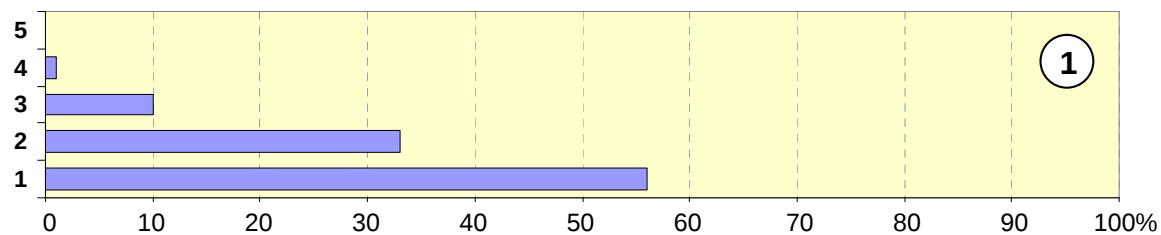
Не правда ли, интересно? Средняя скорость входного потока составляет примерно 87% от производительности рабочего центра (3,5/4,0), но в конце почти каждого рабочего дня в буфере остаётся очередь из необработанных заготовок. Временами размер очереди близок или даже превышает 5 заданий, причём в отдельные 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



Результаты моделирования по сценарию А (3)



День обработки

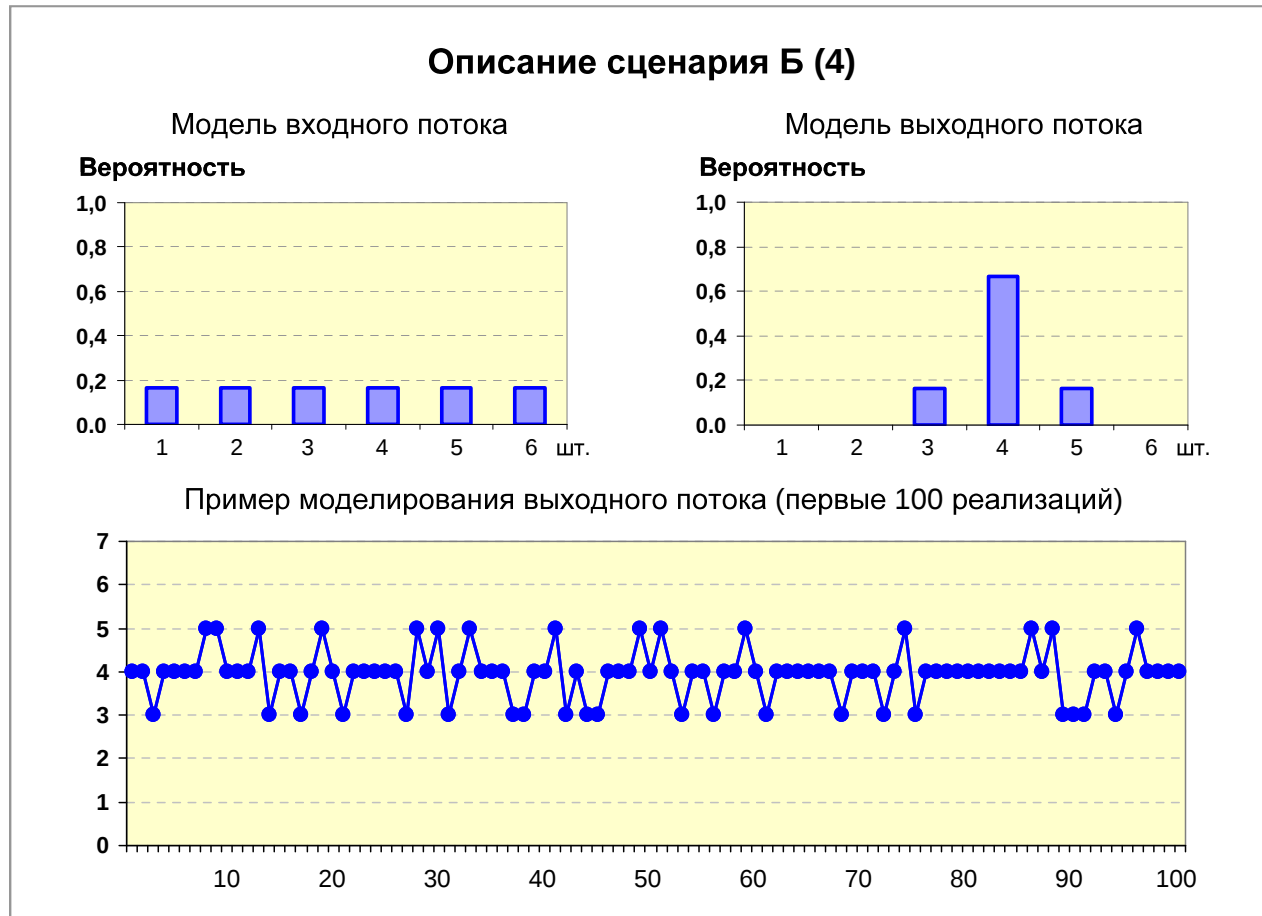


данных первого сеанса моделирования (всего 1257 заготовок за 360 дней). Как видно, в данном случае ровно треть всех заданий обрабатывается на второй день после их поступления, и ещё 11% - на третий или четвёртый день. И это почти в «идеальной» ситуации, когда рабочий центр способен выдавать ровно по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

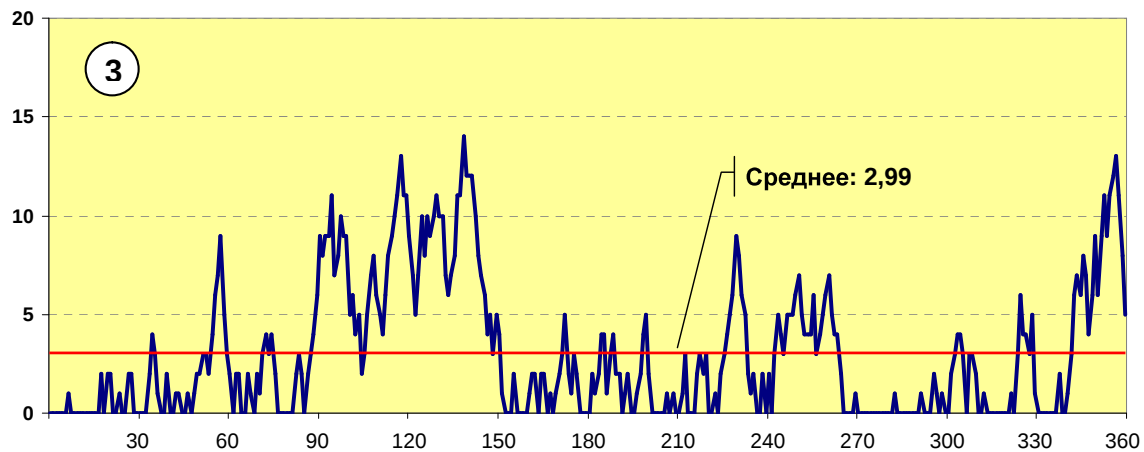
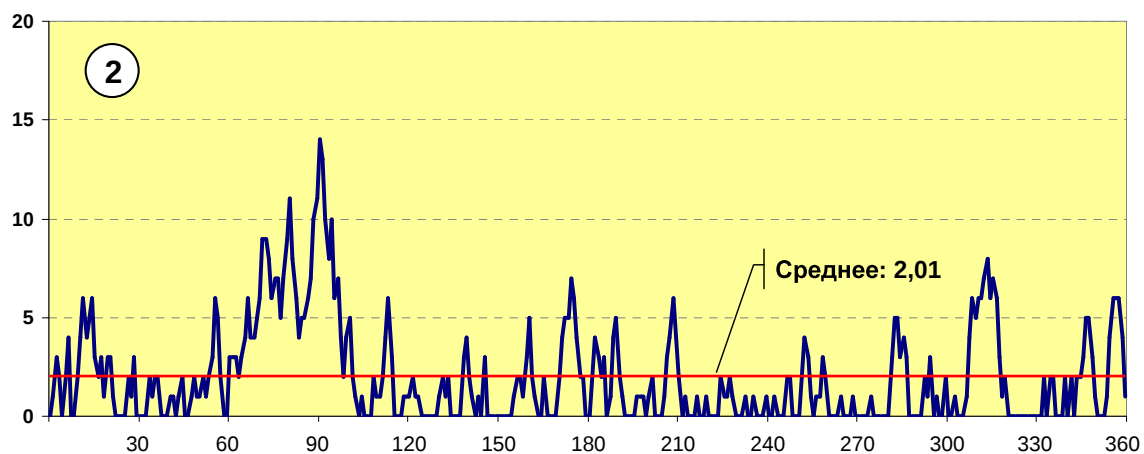
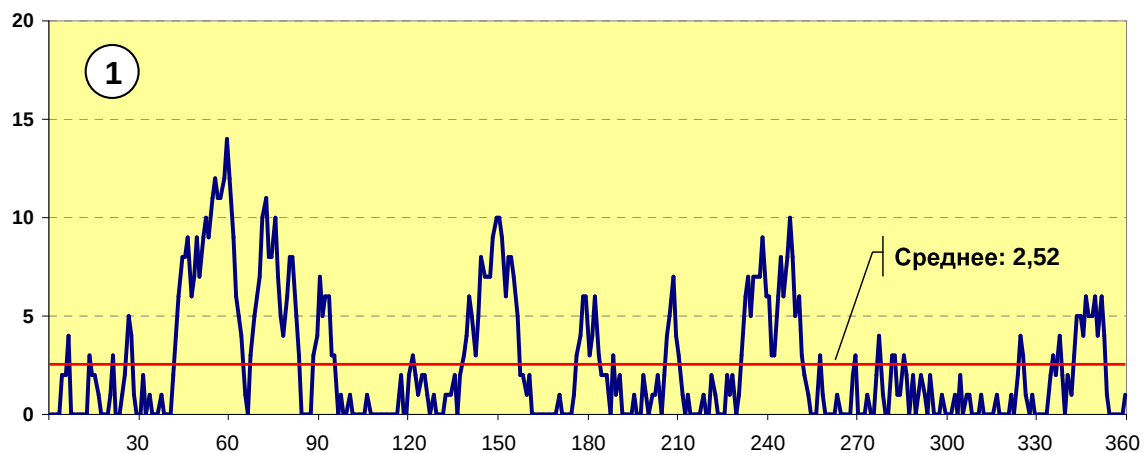
СЦЕНАРИЙ Б: $N_1 < N_2$, слабая вариабельность на выходе

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 изделия 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).

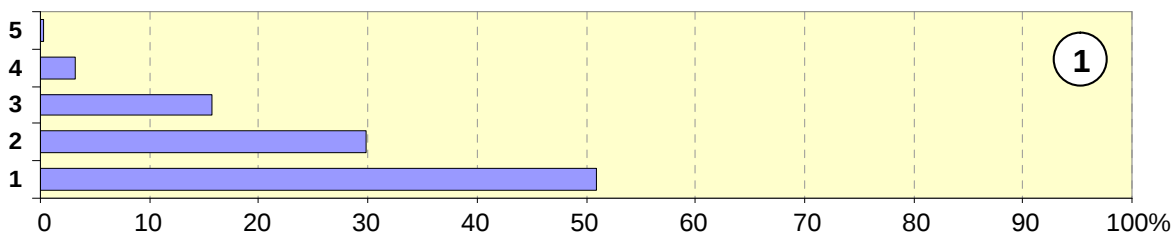
Результаты компьютерного моделирования представлены на врезке 5 (здесь для входного потока использовались те же выборки, что и в сценарии А).



Результаты моделирования по сценарию Б (5)



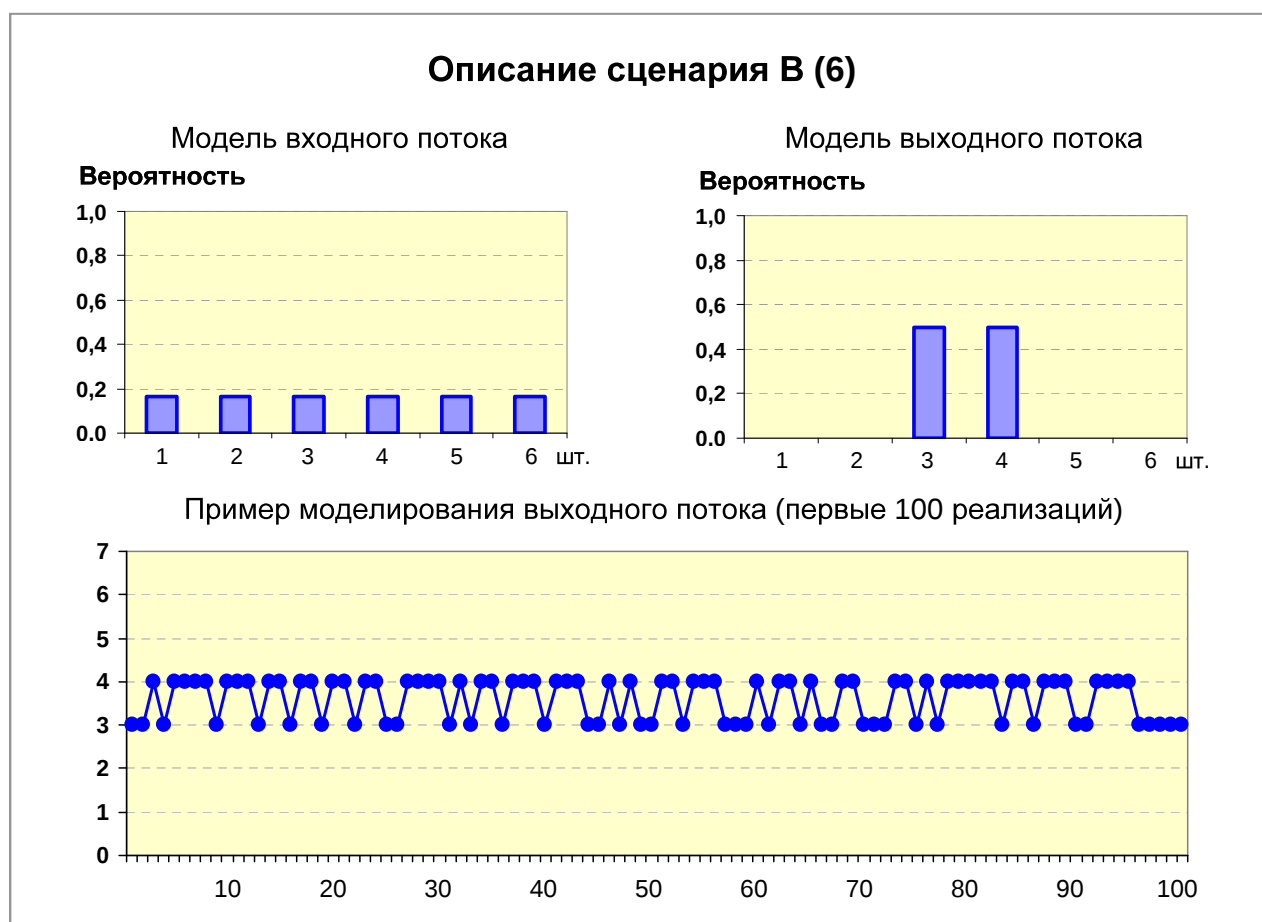
День обработки



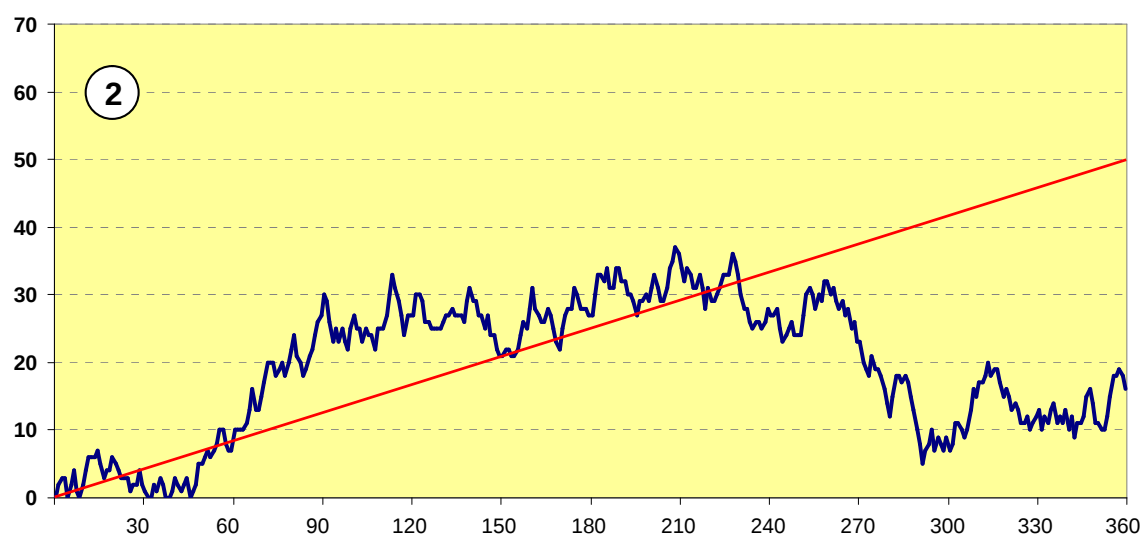
Система продолжает работать устойчиво, однако общий уровень отклонений стал заметно выше. Размер буфера в конце дня достаточно часто превышает 5 заданий, а его среднее значение уверенно приближается к трём. По данным первого сеанса моделирования уже 49% всех заготовок обрабатывается только на второй 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 рабочего центра. 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 изделия в день (среднее 3,5 шт.)⁶, как это показано на врезке 6. Соответствующие результаты очередных трёх сеансов компьютерного моделирования представлены на врезке 7.



Результаты моделирования по сценарию В (7)

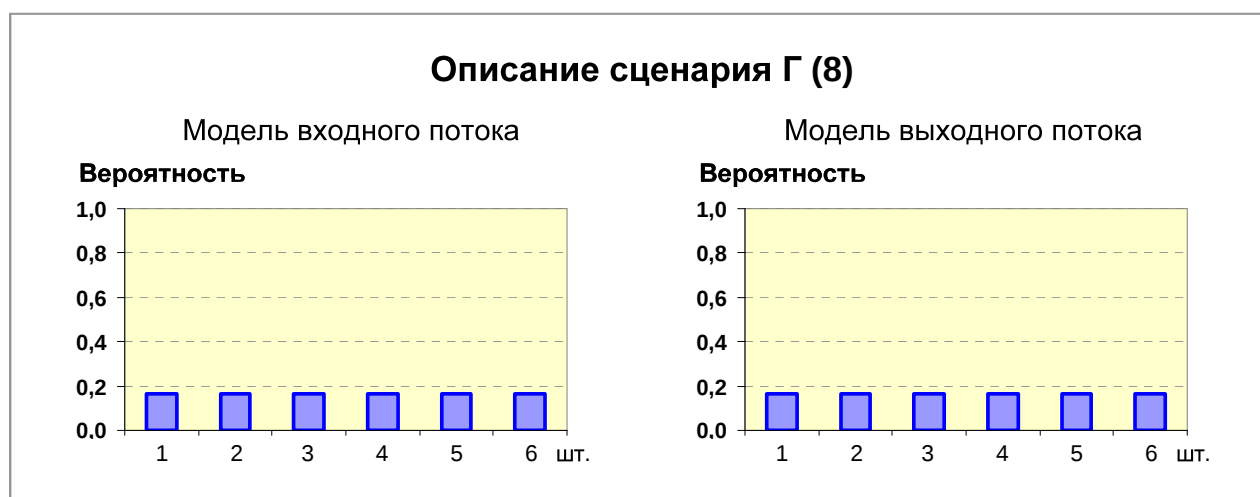


Кажется, что-то пошло не так, как хотелось бы! Есть ощущение, что размер буфера постоянно растёт, причём счёт идёт не на единицы, а на десятки. Уже не является большим исключением наличие в очереди по 20-30 заданий, что означает задержку их обработки (напомню, - при средней производительности станка 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



Результаты моделирования по сценарию Г (9)



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;

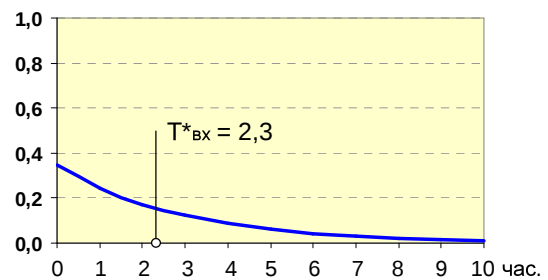
$V_{\text{вых}} = 1 / T_{\text{вых}}^*$ – средняя скорость (интенсивность) обработки заданий.

Пример расчётов по формуле Кингмана (10)

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.

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

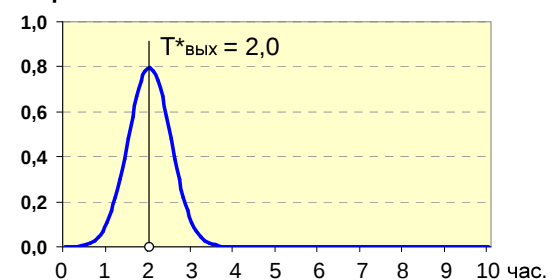
Вероятность



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.

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

Вероятность



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

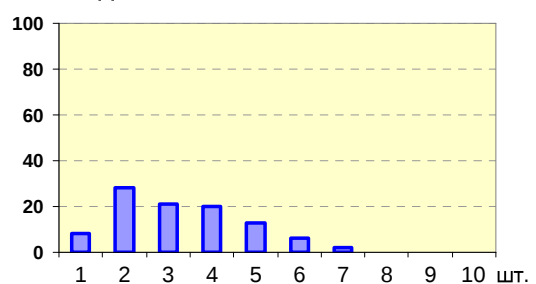
Среднее время ожидания в очереди на обработку:

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

Результаты моделирования.

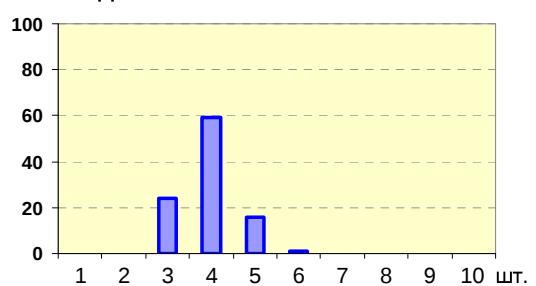
Имитация поступления заданий в буфер в соответствии с указанным выше экспоненциальным распределением; ось времени делится на 8-часовые интервалы и подсчитывается число событий в каждом интервале, - количество заданий, поступивших в течение одного рабочего дня (генерировалось примерно 350 заданий за 100 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 средне-квадратичным 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/IE406%20S07/Slides/Single%2520Server%2520Queueing%2520Models.pdf> (хотя следует иметь в виду, что в ней формула Кингмана приведена с опечаткой).

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.