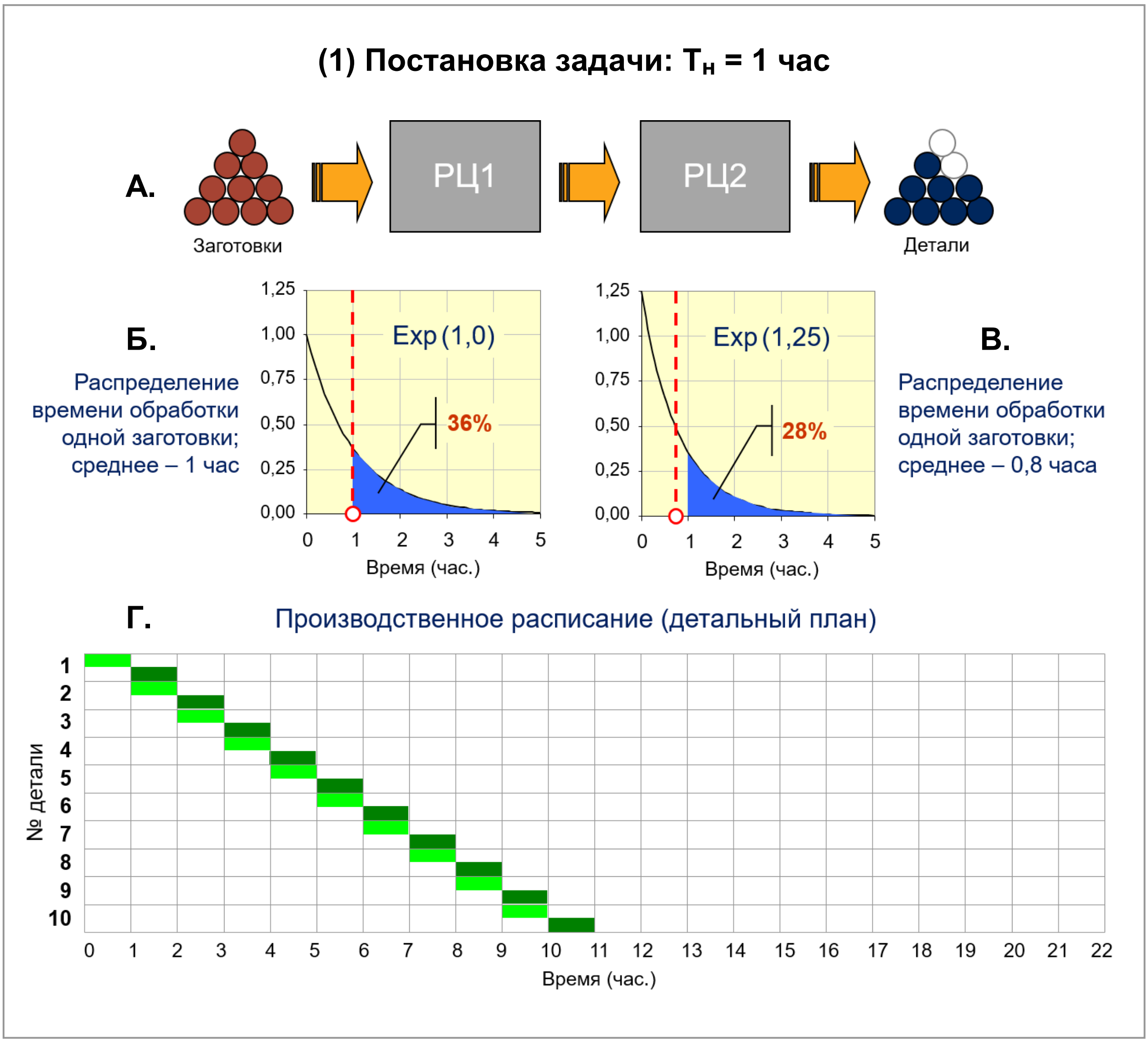
С. Жаринов

О детальном и укрупнённом планировании[1]

ПРИЛОЖЕНИЕ 2: Модель двух станков

Нет такой плохой ситуации, которая не могла бы стать ещё хуже.
Расширение закона Мерфи, сделанное Гаттузо [2]

Рассматривается производственная система из двух рабочих центров (РЦ); на входе – заготовки, на выходе – готовые детали (см. диаграмму **А** на врезке 1). Предполагается, что заготовки всегда имеются в наличии и после обработки



на РЦ1 сразу же поступают на РЦ2. Тогда, если нормативное время обработки одной заготовки $T_н$ на каждом РЦ составляет, например, 1 час, то детальный план будет выглядеть так, как это показано на диаграмме **Г** врезки 1 (светло-зелёный цвет – РЦ1, тёмно-зелёный – РЦ2). В соответствии с построенным производственным расписанием первая заготовка в течение первого часа будет обрабатываться на РЦ1, в течение второго часа на РЦ2; вторая заготовка – в течение второго часа на РЦ1, в течение третьего часа на РЦ2; и т.д. А вся программа из десяти деталей, очевидно, по плану должна быть целиком выполнена за 11 часов.

Если в системе отсутствует вариабельность (то есть на обработку любой заготовки на каждом РЦ уходит ровно $T_н$ времени), то ситуация полностью под контролем. По каждому РЦ заранее определены точные сроки запуска и выпуска любой детали, и для любого момента времени однозначно известно, какая деталь на каком РЦ в данный момент будет находиться в обработке.

А теперь посмотрим, что в подобной ситуации можно реально контролировать при наличии вариабельности процессов. Предположим, что время обработки распределено по экспоненциальному закону (см. диаграммы **Б** и **В** на врезке 1): для РЦ1 – с параметром $\lambda = 1{,}0$ (среднее 1 час, вероятность превышения норматива $T_н$ = 1 час составляет примерно 36%), для РЦ2 – с параметром $\lambda = 1{,}25$ (среднее значение 0,8 часа, вероятность превышения норматива $T_н$ = 1 час составляет примерно 28%). И проанализируем “реализуемость” показанного детального плана, под которой, – как и раньше[3], – будем понимать ***долю реализованных позиций от общего числа позиций плана***.

Прежде всего, заметим, что в данном случае 100-процентная реализуемость уже для одной детали теоретически составляет меньше 50% ($0{,}64 \cdot 0{,}72 \approx 0{,}46$), а для десяти деталей её вероятность ничтожно мала ($0{,}46^{10} \approx 0{,}00005$). На врезке 2 приведен пример реализации производственного расписания, где в качестве фактических значений для времени обработки заготовок взяты два набора из десяти квазислучайных[4] чисел:

(РЦ1) – {1,0; 0,3; 0,8; 0,6; 3,4; 0,4; 0,1; 1,9; 0,2; 1,3};

(РЦ2) – {0,8; 0,2; 1,9; 0,3; 0,5; 1,1; 0,1; 1,6; 0,6; 0,9}.

Среднее по выборкам – соответственно, 1 час и 0,8 часа (см. диаграммы **А** и **Б** на врезке 2). Результат представлен на диаграмме **В** врезки 2. При этом предполагается, что при работе “по плану” соблюдаются следующие правила запуска:

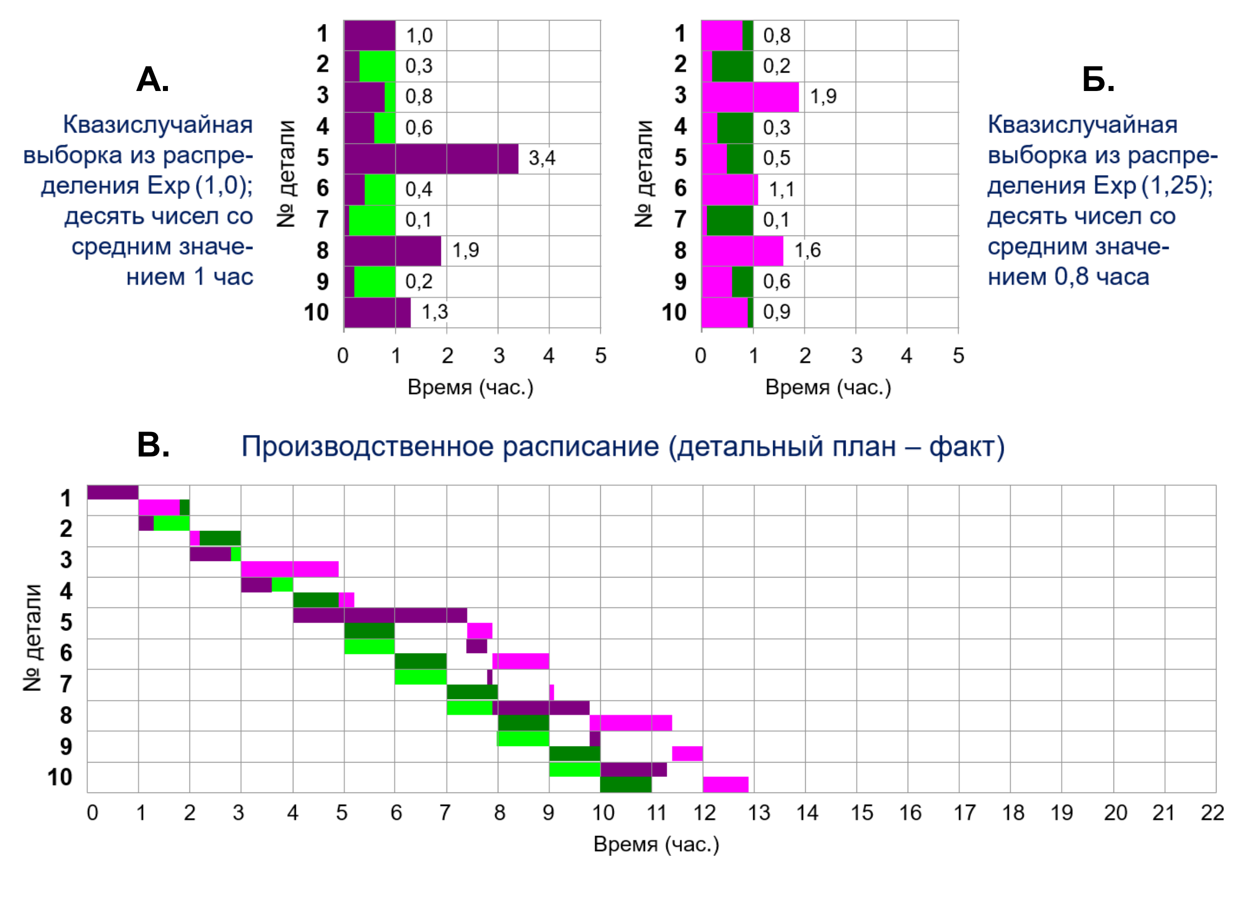
- если обработка заготовки на любом РЦ фактически завершается раньше соответствующего планового срока, то обработка следующей заготовки (для РЦ2 – при её наличии) начинается строго по плану;

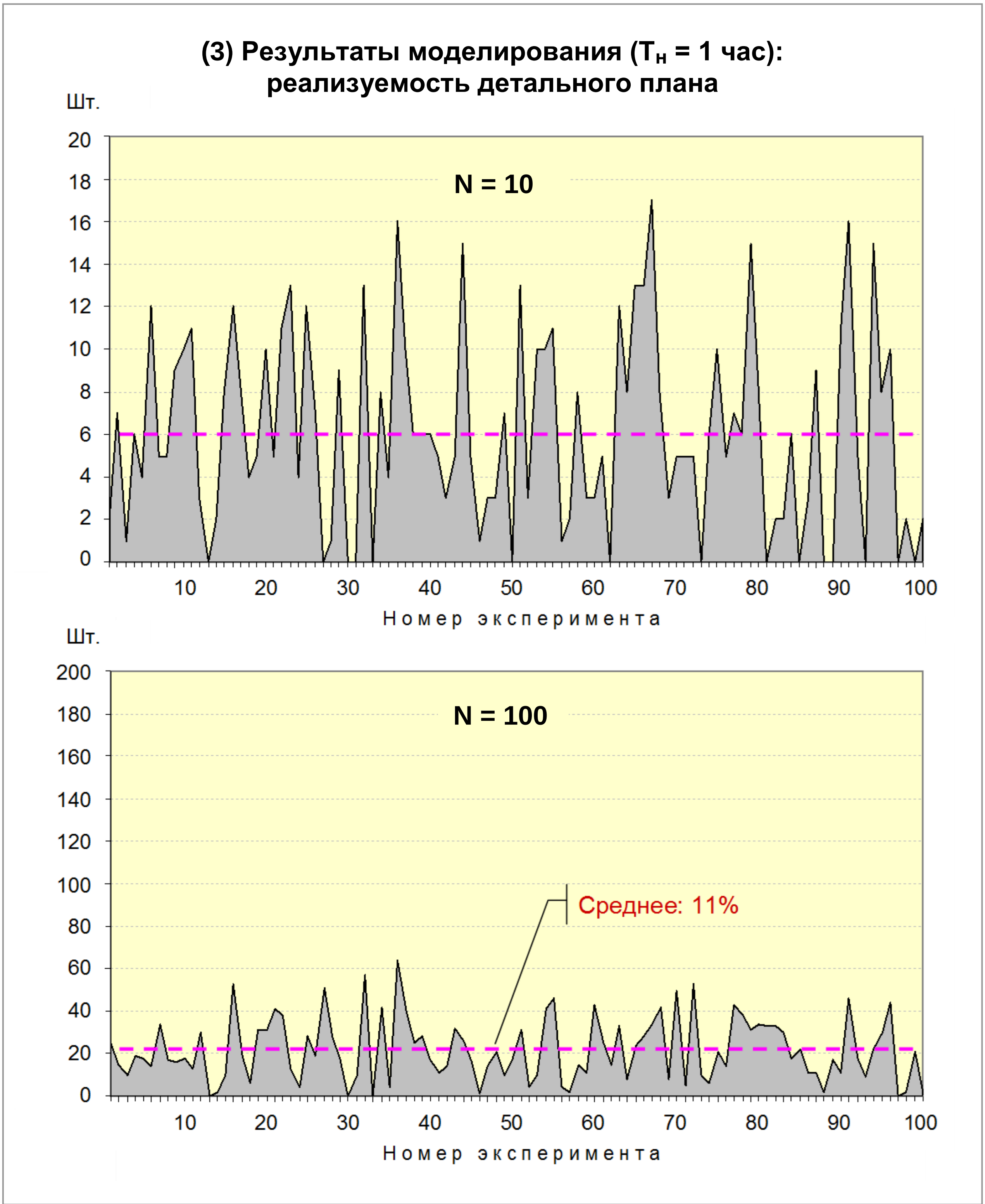
- если обработка заготовки на любом РЦ фактически завершается позже соответствующего планового срока, то обработка следующей заготовки (для РЦ2 – при её наличии) начинается сразу же без задержки.

Из построенного графика видно, что сначала всё идёт хорошо, и изготовление двух первых деталей укладывается в нормативы. Но как только случаются “выбросы”, то фактические сроки неизбежно начинают смещаться вправо из-за зависимости процессов обработки. В итоге из двадцати позиций плана успешно реализованными оказываются только шесть, то есть реализуемость плана составляет 30%. Не говоря уже о том, что и вся программа из десяти деталей в целом выполняется с превышением запланированного срока.

На врезке 3 представлены результаты компьютерного моделирования данной ситуации. В первой серии экспериментов генерировались выборки по N = 10 независимых псевдослучайных[5] чисел из распределений Exp (1,0) и Exp (1,25) и анализировалась работа системы по детальному плану из двадцати позиций, показанному на врезке 1. Во второй серии экспериментов моделировалась та

(2) Пример реализации детального плана: $T_н$ = 1 час



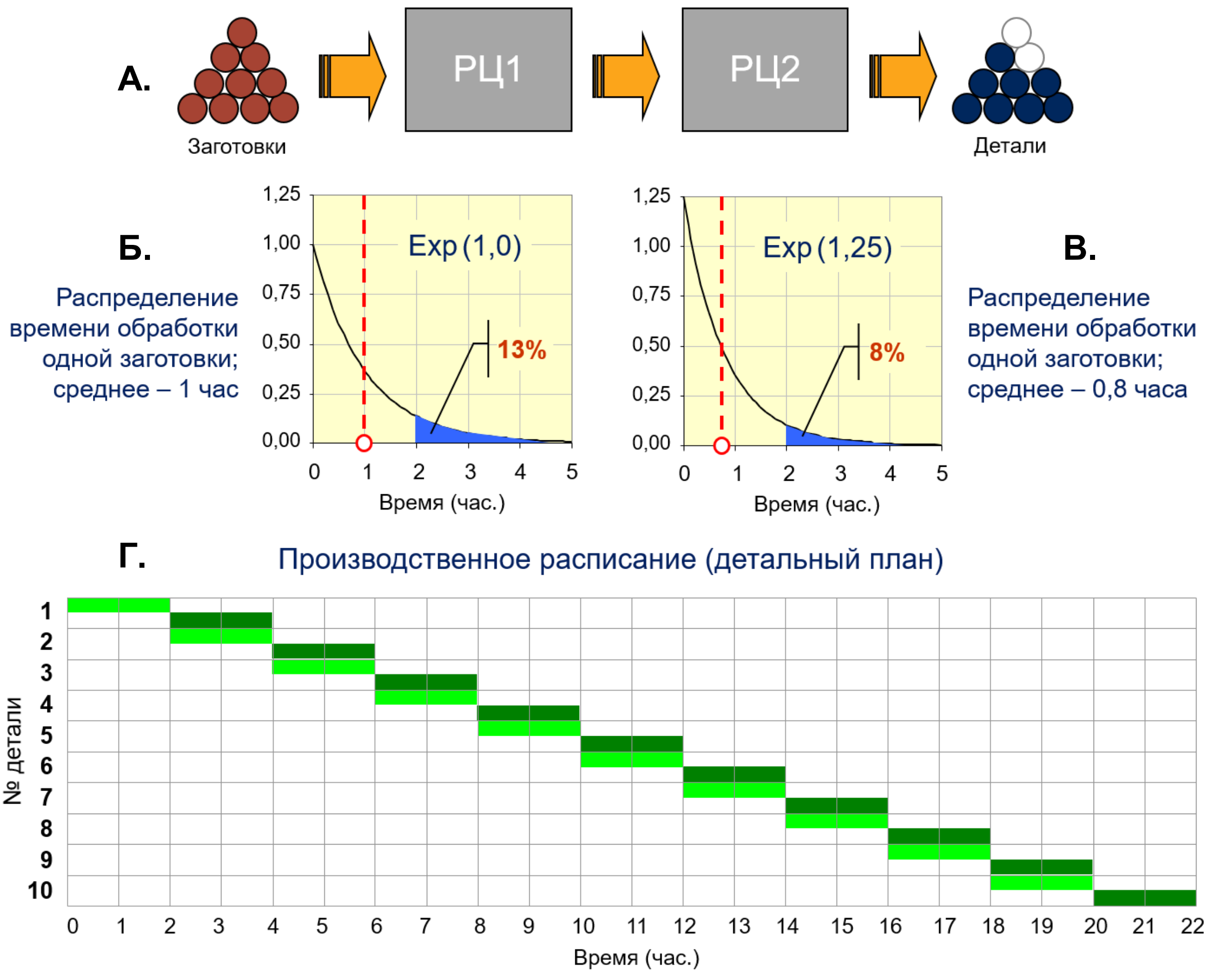


же ситуация, но для случая N = 100 деталей (производственное расписание из двухсот позиций, плановый срок выполнения всей программы – 101 час). Полученные экспериментальные значения реализуемости для плана из десяти деталей редко превышают 70% со средним 30%, а для плана из ста деталей почти никогда не оказываются выше 30% со средним показателем 11%.

Рассматриваемая система с двумя рабочими центрами и экспоненциальными распределениями времени обработки Exp (1,0) и Exp (1,25) экспериментально исследовалась также в варианте, когда в качестве норматива планирования было принято значение $T_н$ = 2 часа. В таком случае теоретическая вероятность превышения норматива для РЦ1 будет составлять 13%, для РЦ2 – чуть больше 8% (см. диаграммы **Б** и **В** на врезке 4), а соответствующее производственное расписание выглядит так, как показано на диаграмме **Г** врезки 4. На этот раз вся программа из десяти деталей по плану должна быть целиком выполнена за 22 часа, а из ста деталей – за 202 часа.

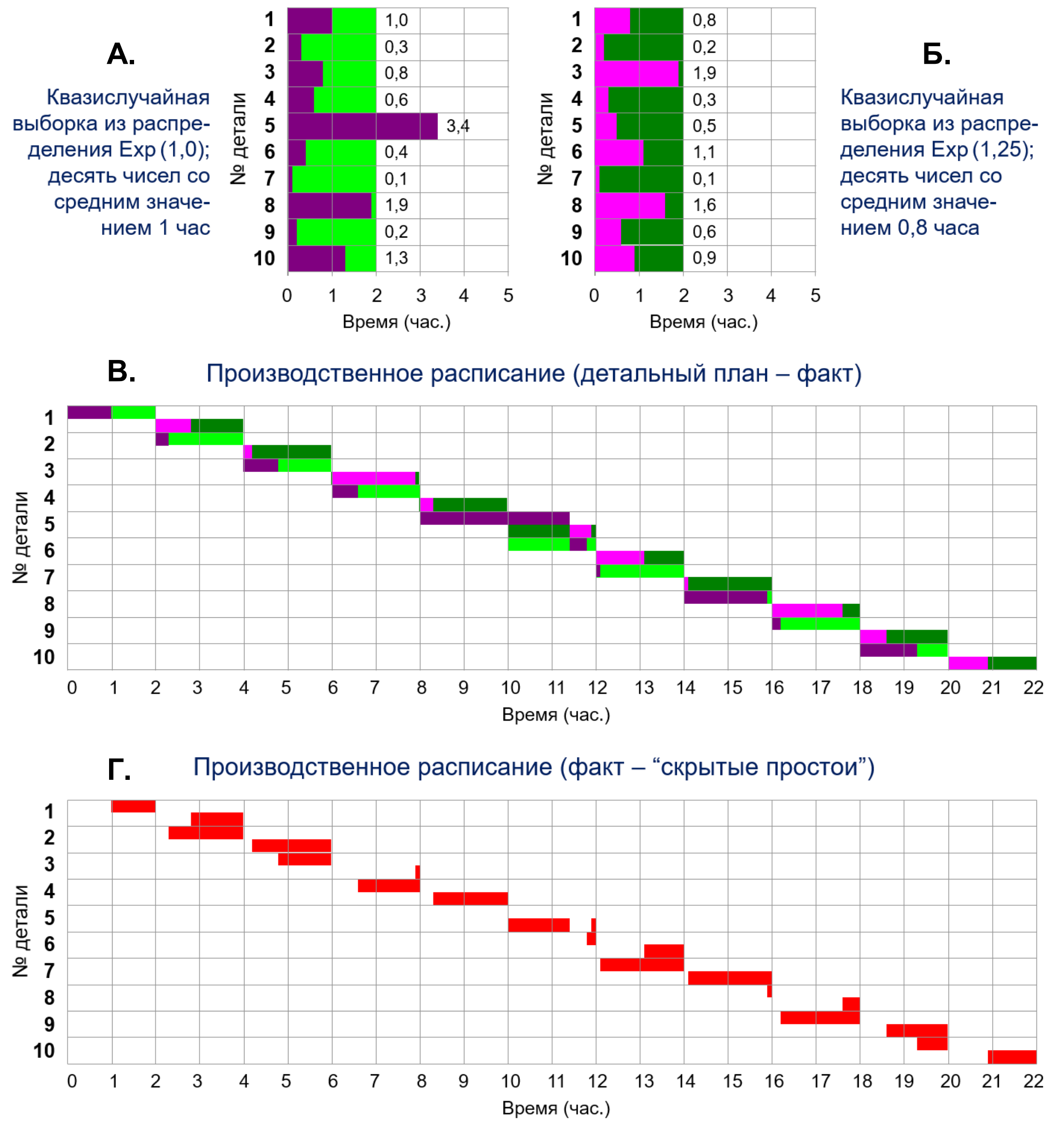
Пример реализации нового производственного расписания для выборки из тех же наборов квазислучайных значений времени обработки (см. диаграммы **А** и **Б** на врезке 5) показан на диаграмме **В** врезки 5. Вся программа успешно завершается в установленные сроки, и только по одной из двадцати позиций плана (обработка пятой детали на РЦ1) есть нарушение; реализуемость – 95%.

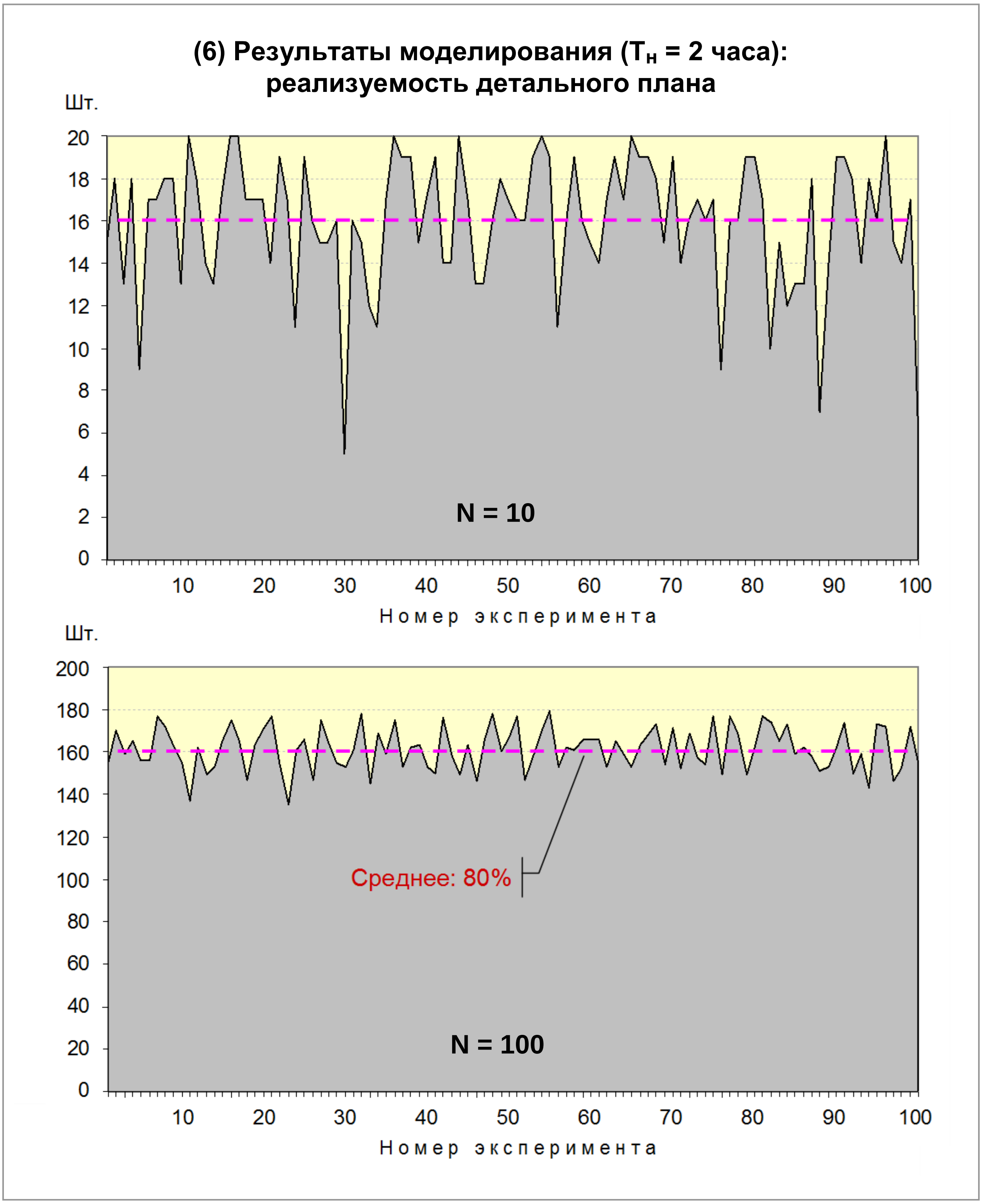
(4) Постановка задачи: $T_н$ = 2 часа



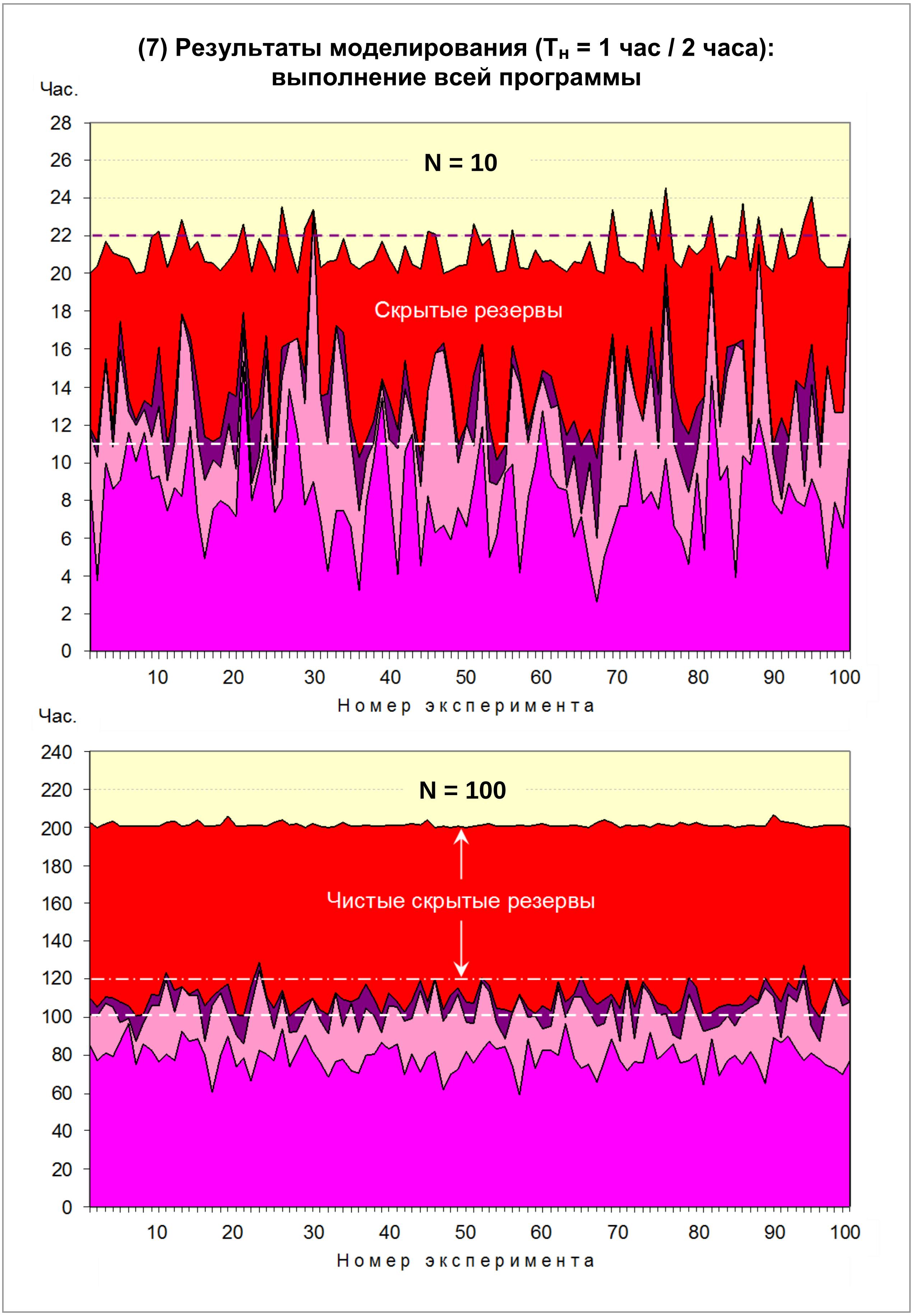
Приведенные на врезке 6 результаты компьютерного моделирования для тех же что и раньше экспериментальных выборок позволяют сделать следующие выводы. В случае десяти деталей 100-процентное значение реализуемости плана по факту наблюдается всего в 8 из ста экспериментов; в теории это чуть больше 10%: $(0{,}87 \cdot 0{,}92)^{10} \approx 0{,}108$. А для сотни деталей при 80-процентном среднем фактическая реализуемость плана находится в интервале 70-90% и практически никогда не достигает 100-процентного уровня.

(5) Пример реализации детального плана: $T_Н$ = 2 часа





Вообще говоря, реализуемость плана на уровне 80% можно было бы считать достаточно приемлемой, если бы не эффект “скрытых простоев”, отмеченный ранее ещё для модели одного рабочего центра[3]. Так, в показанном на врезке 5 примере реализации детального плана из отведённых на выполнение всей программы 40 плановых часов (по 20 часов на каждый РЦ) фактически было


(7) Результаты моделирования ($T_н$ = 1 час / 2 часа):
выполнение всей программы
Час.
N = 10
Скрытые резервы
Номер эксперимента
Час.
N = 100
Чистые скрытые резервы
Номер эксперимента

использовано меньше половины (точнее, 10 часов на РЦ1 и 8 часов на РЦ2, см. диаграмму **Г** на врезке 5). Приведенные на врезке 7 данные компьютерных экспериментов позволяют лучше понять характер и оценить масштаб этого явления. Пунктирные линии указывают на плановые сроки выполнения всей программы, – соответственно, 11 и 22 часа для десяти деталей, 101 и 202 часа для ста деталей. Цветом на графиках обозначены результаты трёх вариантов решения задачи: фиолетовый и красный – работа “по плану”, соответственно, для $\mathbf{T_н}$ = 1 час и $\mathbf{T_н}$ = 2 часа; розовый – “без плана”, когда каждый РЦ начинает обработку следующей заготовки сразу после завершения предыдущей (если, конечно, эта следующая заготовка имеется в наличии). Напомним, что по условиям задачи для РЦ1 заготовки есть всегда, а для РЦ2 возможны такие ситуации, когда ресурс свободен, но очередная заготовка ещё не поступила с предыдущего передела. Время, в течение которого при работе “без плана” оба ресурса одновременно активны, на графиках обозначено лиловым цветом.

В таблицах 1-2 представлены сводные результаты моделирования, из которых видно, что средняя величина “скрытых резервов” (разница между плановым

Таблица 1. Реализуемость всей программы (N = 10)

Показатели результативности	Работа “без плана”	Работа по плану, $T_н$ = 1 час	Работа по плану, $T_н$ = 2 часа
Плановые сроки реализации (час.)	–	11	22
Среднее время выполнения (час.)	12,3	13,9	21,1
Средние “скрытые резервы” (час.)	–	1,2	8,4
Среднее время «простоя» РЦ2 (час.)	4,4	–	–

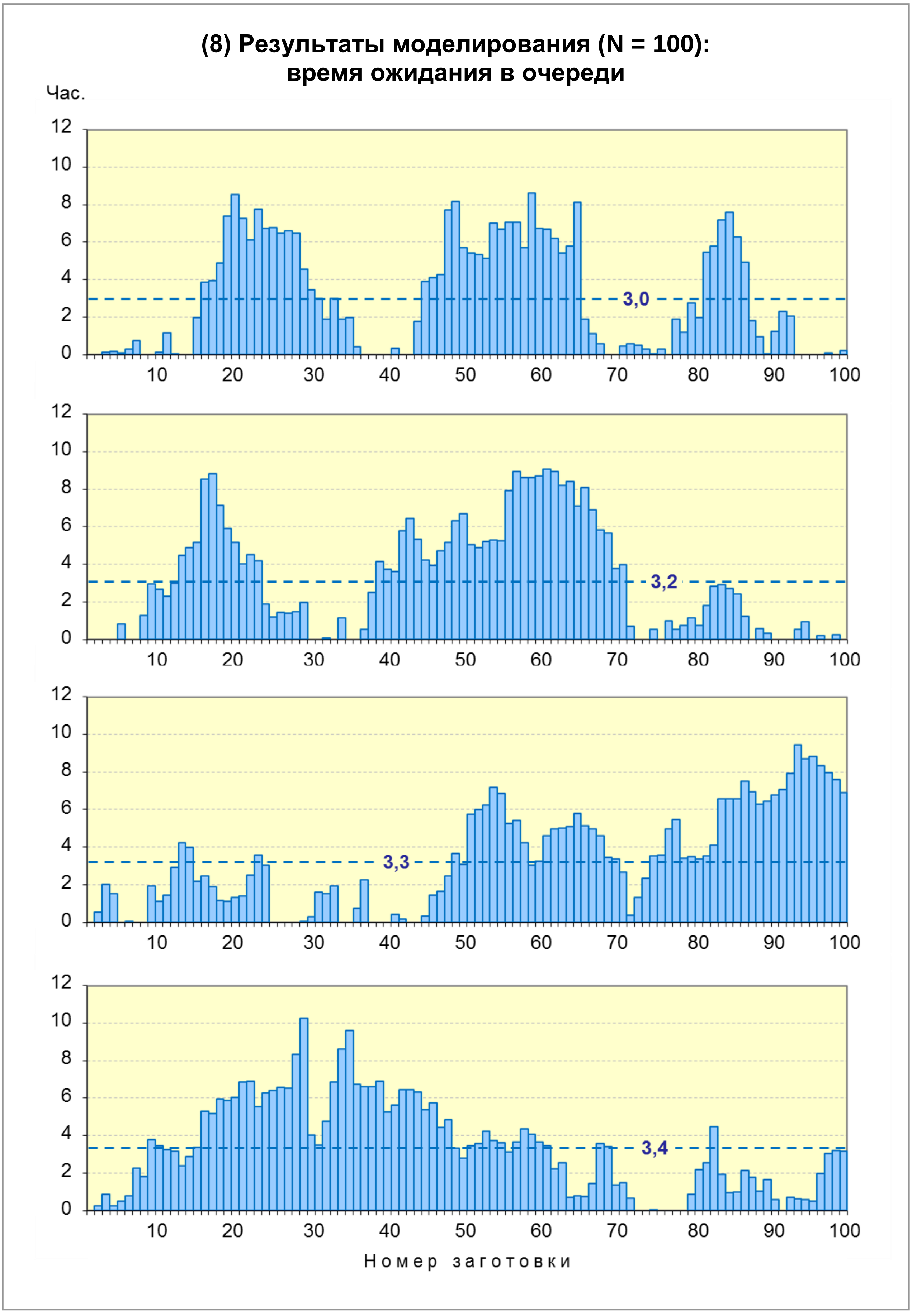
Таблица 2. Реализуемость всей программы (N = 100)

Показатели результативности	Работа “без плана”	Работа по плану, $T_н$ = 1 час	Работа по плану, $T_н$ = 2 часа
Плановые сроки реализации (час.)	–	101	202
Среднее время выполнения (час.)	103	110	201
Средние “скрытые резервы” (час.)	–	7	98
Среднее время «простоя» РЦ2 (час.)	24	–	–

сроком реализации и средним временем выполнения работ “без плана”) при T_H = 2 часа для десяти деталей составляет 38%, а для ста деталей – 49% от плана. При этом в последнем случае доля “чистых скрытых резервов” (разница между плановым сроком реализации и максимальным временем выполнения работ “без плана”) находится на уровне 40%.

Из показанных результатов также следует, что даже при работе “без плана” второй рабочий центр значительную часть времени остаётся незагружен, – в проведенных экспериментах в среднем от одной трети (для десяти деталей) до одной четверти (для ста деталей) от общего времени реализации программы. И это понятно, поскольку по условиям задачи его пропускная способность на 20% выше РЦ1, так что на очень больших выборках РЦ2 должен проводить в состоянии ожидания очередной заготовки в среднем 20 процентов времени. В подобных ситуациях у наших производственников часто возникает соблазн “догрузить” этот ресурс другими заданиями. Казалось бы, загвоздка только в том, что из-за вариабельности процессов моменты начала периодов простоя невозможно предугадать заранее. Хотя на практике такое препятствие обычно легко преодолевается за счёт наличия большого количества незавершёнки; поэтому как только станок освобождается, для него всегда можно найти какую-нибудь подходящую работу.

Однако реальная сложность заключается в другом, – в том, что зависимость в цепочке случайных процессов приводит к неравномерной загрузке ресурсов. Иными словами, несмотря на наличие периодов вынужденного простоя, бóльшую часть времени РЦ2 должен разгребать очередь из накапливающихся работ. И поведение всей системы в целом можно охарактеризовать известным выражением “то густо, то пусто”. Для иллюстрации этого эффекта на врезке 8 показаны результаты расчёта времени ожидания (от момента завершения обработки заготовки на РЦ1 до момента начала её обработки на РЦ2 в режиме работы “без плана”) в четырёх модельных экспериментах. На графиках виден явно выраженный “рваный” профиль, состоящий из нерегулярных циклов подъёма (вызванного ростом размера очереди) и спада (обусловленного более высокой скоростью обработки на РЦ2 по сравнению с интенсивностью поступления заготовок); при этом обозначенное пунктиром среднее время ожидания находится в диапазоне от 3,0 до 3,4 часа. Следует заметить, что для рассматриваемой здесь производственной системы с экспоненциальными распределениями параметров на обоих ресурсах точное значение среднего времени ожидания в очереди определяется по формуле Кингмана[6]; в данном случае оно составляет 3,2 часа. Иными словами, хотя 20% времени РЦ2 вообще не загружен, но (по закону Литтла) при среднем значении цикла изготовления детали 1,0 + 3,2 + 0,8 = 5 часов внутри системы (работающей со средней производительностью одна деталь в час) в среднем должно быть 5 заготовок. Причём любая “дозагрузка” ресурса только ухудшит ситуацию.


(8) Результаты моделирования (N = 100):
время ожидания в очереди
Час.
3,0
3,2
3,3
3,4
Номер заготовки

В самом деле, если коэффициент использования РЦ2 увеличить с текущих 80% до примерно 95% (скажем, в среднем каждые 5,5 часов дополнительно поставляя на РЦ2 по одной заготовке со стороны), то из формулы Кингмана немедленно следует, что среднее время ожидания в очереди возрастёт до 15,2 часа, то есть почти в 5 (пять!) раз. Соответственно, в разы увеличится и число заготовок внутри системы, то есть размер незавершённого производства. Это та цена, которую неизбежно придётся заплатить за неуёмное стремление к максимальной загрузке оборудования.

* * *

Возвращаясь к главной теме обсуждения, – ***есть ли*** ~~*жизнь на Марсе*~~ ***польза от детального планирования*** при наличии вариабельности процессов (то есть в условиях практически любого реального производства)[1], – напомню суть вопроса.

Сторонники детального планирования утверждают, что если заложить в компьютер все операционные нормативы (по каждой детали и для каждого этапа обработки), то с помощью неких сложнейших математических приёмов можно получить производственное расписание для сотен станков и тысяч операций на месяцы вперёд и с точностью до минут, – причём расписание не простое, а самое “оптимальное” по каким-то фантастическим критериям типа максимальной загрузки всего станочного парка. Так вот, – даже не вдаваясь в дискуссию о смысле и разумности подобных критериев оптимизации, – надо признать, что это утверждение, безусловно, является справедливым. И никто не собирается его оспаривать. Действительно, информационный объект под названием "производственное расписание" таким способом получить можно. Более того, его можно распечатать на листе бумаги, повесить на стенку либо использовать в иных (не связанных напрямую с производством) полезных целях.

Проблема в другом. Дело в том, что если уровень реальной вариабельности производственных циклов измеряется днями (а то и неделями), то отдельные события с характерными временами в несколько часов (не говоря уже про минуты) на этом фоне представляют собой всего лишь статистический шум. Поэтому вероятность того, что запланированная на завтра (не говоря уже про расписание следующей недели или месяца) с 10:37 до 11:56 обработка детали Д на станке Х состоится в указанные сроки, близка к нулю. Соответственно, нулевой является и практическая польза от подобного "информационного объекта".

Обычно приходится выслушивать возражения двух типов. Во-первых, адепты детального планирования заявляют о том, что вариации операционных времён (особенно на станках с ЧПУ) не такие уж и большие. "Откуда же большим-то взяться: оператор нажимает на кнопку пуска, и станок действует по заданной программе в течение заранее установленного времени. Ну, может быть, плюс-минус пара процентов на отклонения от стандартного режима обработки". Да, это так. Но касается только чистого штучного времени. А снять-поставить очередную заготовку? А подналадка оборудования? А переналадка на новую партию? А заправить магазин инструментом, установить оснастку, с чертежом ознакомиться, ... И так далее, и тому подобное. Вот тут-то вариабельность и накапливается. "Но уж не настолько же, – настаивают оппоненты, – чтобы экспоненциальным распределением моделировать? Скорее подойдёт что-то типа нормального с небольшими симметричными отклонениями от среднего значения."

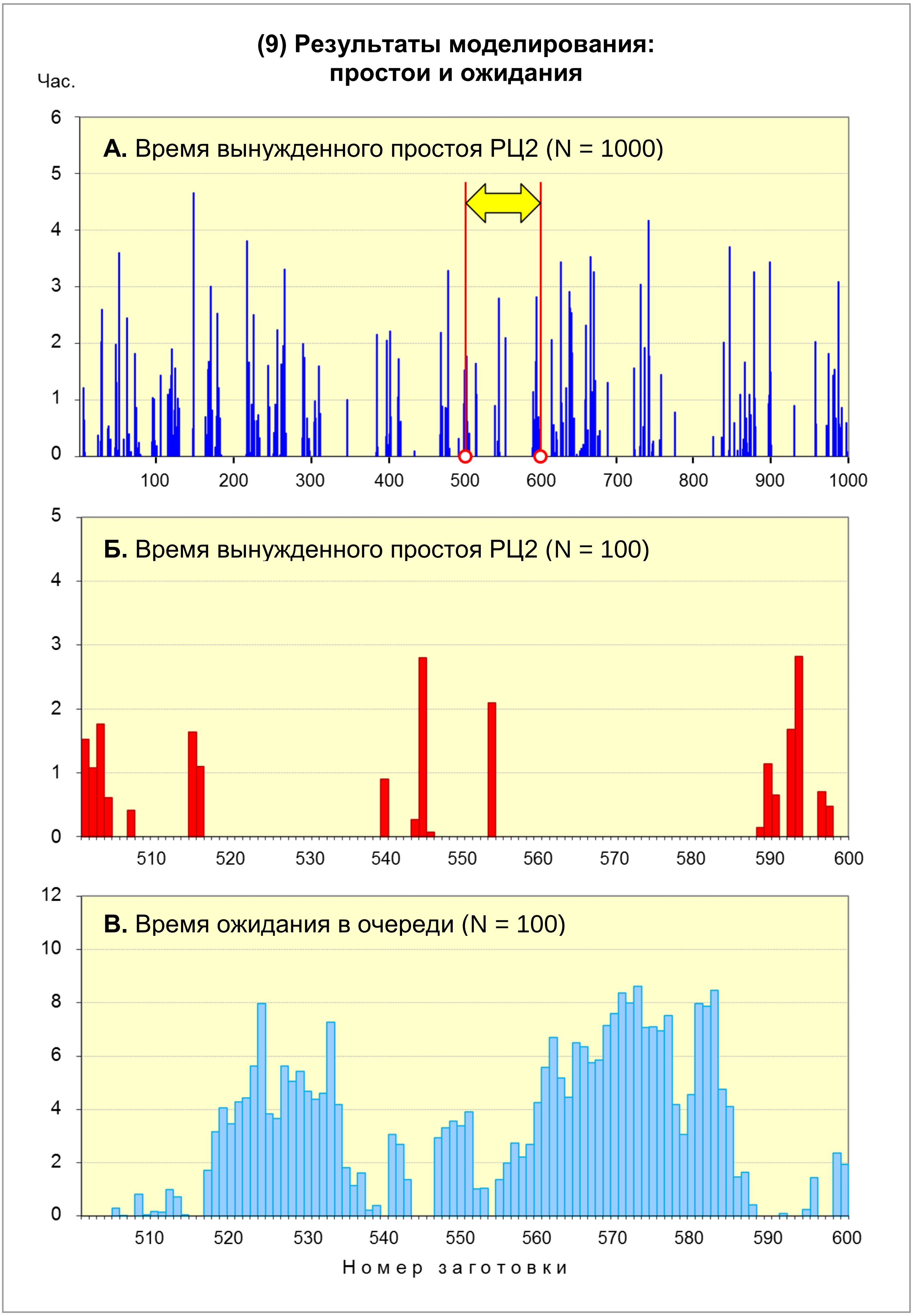
Нет, никак не подойдёт. А что, если нет инструмента или станок сломался? На штучное и подготовительно-заключительное время не влияет; оно обычно и измеряется-то при полной комплектации и работающем оборудовании. А если вышел брак? Ведь для планирования зависимых процессов важно знать не столько время обработки на станке, сколько срок, к которому заготовка будет доступна на следующем переделе. Какая радость от того, что станок выдаёт детали строго по нормативу каждые 30 минут с точностью до секунды, – если потом эти детали часами (а то и днями) лежат в ожидании передачи в другой цех? Настоящая вариабельность сидит именно здесь, и её уровни на порядки превышают операционные времена. Поэтому при правильных и аккуратных измерениях соответствующие распределения, скорее всего, окажутся сильно асимметричными и похожими на экспоненциальное. Это в лучшем случае. А в худшем – ещё и с тяжёлыми хвостами.

Возражения второго типа относительно утверждения о “нулевой” пользе от детальных расписаний, как правило, сводятся к тезису о том, что лучше иметь хоть какой-то план, чем не иметь никакого, – тем более что в процессе работы этот план можно скорректировать по фактическим отклонениям. Согласен: "хоть какой-то план" иметь, действительно, необходимо. Вопрос – насколько детальным должен быть этот план? Например, чтобы завтра с утра попасть на работу к 9:00 вы можете планировать, как всегда, сначала ехать на автобусе, а заключительный отрезок пути пройти пешком. Кроме того, поскольку обычно у вас на это уходит не больше сорока минут, то будет разумно выйти из дома не позднее 8:20. Подобный план в момент его составления представляется вам вполне реализуемым, а значит осмысленным. Однако когда вы – ещё не выходя из дома – с точностью до секунды прокладываете траекторию движения по всему маршруту, то это, вообще говоря, паранойя или, мягко выражаясь, ничем не оправданные бессмысленные фантазии. Там, где ещё вчера не было препятствий, сегодня на дороге могла образоваться пробка, на тротуаре – большая лужа или, что более вероятно, городские власти затеяли в очередной раз перекладывать плитку. И много других непредвидимых заранее событий разнонаправленного характера. Так что объяснения типа "лучше иметь хоть какой-то план" в данном случае могут породить обоснованные сомнения в вашей психической адекватности. Как остроумно заметил Нассим Талеб, "если утром вы хоть с какой-то степенью точности знаете, как сложится ваш день, то вы чуть-чуть мертвы, и чем точнее ваши знания, тем вы мертвее".[7-1]

Аналогично обстоят дела и с так называемой "корректировкой расписаний по фактическим отклонениям". Вот типичная ситуация: запланированная работа вовремя не пришла с предыдущего этапа обработки. Что делать? Казалось бы, взять и поставить на станок следующее задание из очереди (если, конечно, для его выполнения всё есть в наличии). Но наши оптимизаторы не ищут простых решений. "Изменение текущего графика повлечёт за собой перераспределение работ по другим ресурсам, причём на всём горизонте планирования. Поэтому, естественно, следует пересчитать расписание заново, – на сотни станков и тысячи операций на месяц вперёд." И в результате сложнейших вычислений "проложить новую траекторию движения", в соответствии с которой завтра (или через неделю, а то и месяц) деталь Д на станке Х нужно делать уже не с 10:37 до 11:56, а с 13:20 до 14:39. А ровно 5 минут спустя, – когда случится очередное отклонение от плана, – выдать новую бессмысленную фантазию: через месяц деталь Д на станке Х делать не с 13:20 до 14:39, а с 8:12 до 9:31. В общем, доведённый до полнейшего абсурда мартышкин труд, порождающий обоснованные сомнения в психической адекватности занятых им людей.

Подобные умозрительные эксперименты по прокладке детальных траекторий движения можно было бы считать бесполезными, но хотя бы не вредными. Если бы ни одно обстоятельство, иллюстрация которого приводилась ранее. Это та самая ситуация, когда в момент "корректировки" расписания станок оказывается без работы и с целью его "дозагрузки" перебрасываются задания с других ресурсов. Исследование показывает, что в условиях вариабельности в системах последовательной обработки наблюдается интересный и, казалось бы, неожиданный эффект, когда при стабильном в целом состоянии работы происходит циклическая смена фаз перегрузки и вынужденного простоя. При этом одна часть простоев связана с дефектами детального планирования и образует так называемые "чистые скрытые резервы", а другая представляет собой защитные мощности нелимитирующих ресурсов, необходимые для буферирования неопределённости и страховки от пиковых нагрузок.

В качестве дополнительной иллюстрации указанного выше эффекта на врезке 9 представлены результаты одного компьютерного эксперимента при работе "без плана" в рамках рассматриваемой модели 2-х станков. В частности, на диаграммах **А** и **Б** показано время ожидания РЦ2 для каждой заготовки после обработки предыдущей; в первом случае по всей выборке размером N = 1000, во втором – по её средней части из 100 заготовок с номерами 501 – 600.


(9) Результаты моделирования:
простои и ожидания
Час.
А. Время вынужденного простоя РЦ2 (N = 1000)
0
1
2
3
4
5
6
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Б. Время вынужденного простоя РЦ2 (N = 100)
0
1
2
3
4
5
510
520
530
540
550
560
570
580
590
600
В. Время ожидания в очереди (N = 100)
0
2
4
6
8
10
12
510
520
530
540
550
560
570
580
590
600
Номер заготовки

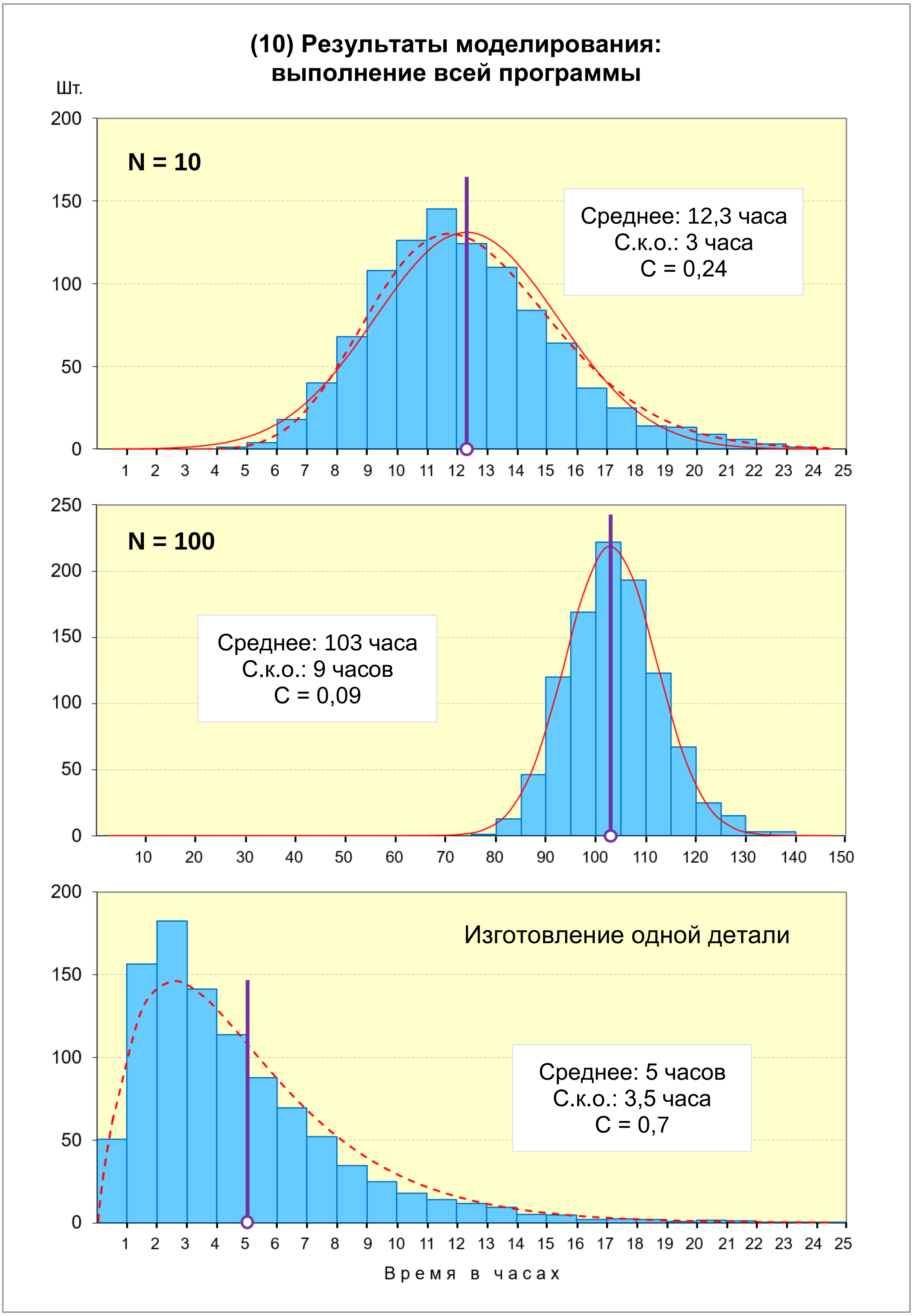
Здесь среднее время простоя РЦ2 по выборке в целом составляет 12 минут, то есть в точности соответствует теоретическому, – 20% от 60 минут (среднего времени между поступлением заготовок в систему). Однако по отдельным заготовкам “вынужденные простои” иногда длятся по 2-3 часа и даже более. Так, на диаграмме **Б** отображена ситуация, когда РЦ2 находился в ожидании 19 заготовок из 100, причём в десяти случаях – больше часа, а в трёх – больше двух часов. Для сравнения на диаграмме **В** приводятся данные по времени ожидания обработки для тех же 100 заготовок (как видно, до восьми и более часов, в среднем чуть больше трёх часов по всей анализируемой выборке, – напомню, при теоретическом значении 3,2 часа).

Наконец, на верхней и средней диаграммах врезки 10 представлены данные компьютерного моделирования времени выполнения всей производственной программы, соответственно, из $N = 10$ и $N = 100$ деталей при работе “без плана”. Производилось по тысяче независимых экспериментов, для каждого из которых изначально система считалась “пустой”.

В случае десяти деталей при среднем значении 12,3 часа разброс выборочных величин характеризуется среднеквадратичным отклонением (с.к.о.) ~ 3 часа, то есть коэффициентом вариации $C \approx 0{,}24$. При этом частотная гистограмма имеет небольшую асимметрию с удлинённым правым хвостом. Красными линиями на верхней диаграмме врезки 10 изображены графики плотности аппроксимирующих гамма-распределения (пунктирная кривая) и нормального распределения (сплошная) с параметрами, рассчитанными по выборочным оценкам двух первых моментов. Из полученных данных можно делать важные для укрупнённого планирования выводы, например, о том, что с вероятностью 90% вся программа будет выполнена не больше чем за 16 часов, а вероятность уложиться в 11 часов составляет менее 40%.

В случае ста деталей при среднем значении времени выполнения программы ~ 103 часа выборочное с.к.о. составляет ~ 9 часов, а коэффициент вариации $C \approx 0{,}09$. Частотная гистограмма имеет почти идеальную симметричную форму; сплошной красной линией на средней диаграмме врезки 10 показан график соответствующего нормального распределения. На основании этих данных можно, например, утверждать, что с вероятностью 95% для выполнения всей программы будет достаточно 120 часов.

На нижней диаграмме врезки 10 для сравнения представлены результаты модельного эксперимента по анализу времени цикла изготовления отдельных деталей (РЦ1 + ожидание в очереди + РЦ2) в процессе последовательной обработки тысячи заготовок. Как видно из полученных данных, при среднем значении 5,0 часов (что в точности соответствует теоретическому значению) с.к.о. составляет 3,5 часа, коэффициент вариации 0,7, а частотная гистограмма


(10) Результаты моделирования:
выполнение всей программы
Шт.
N = 10
Среднее: 12,3 часа
С.к.о.: 3 часа
С = 0,24
N = 100
Среднее: 103 часа
С.к.о.: 9 часов
С = 0,09
Изготовление одной детали
Среднее: 5 часов
С.к.о.: 3,5 часа
С = 0,7
Время в часах

характеризуется ярко выраженной асимметрией. Пунктирной красной линией изображён график плотности аппроксимирующего гамма-распределения с рассчитанными по выборочным оценкам двух первых моментов параметрами формы 2,0 и масштаба 2,5. Было бы очень интересно полюбопытствовать у любителей детального планирования, – как в подобной ситуации они будут контролировать сроки запуска-выпуска каждой детали и управлять загрузкой отдельных ресурсов?

* * *

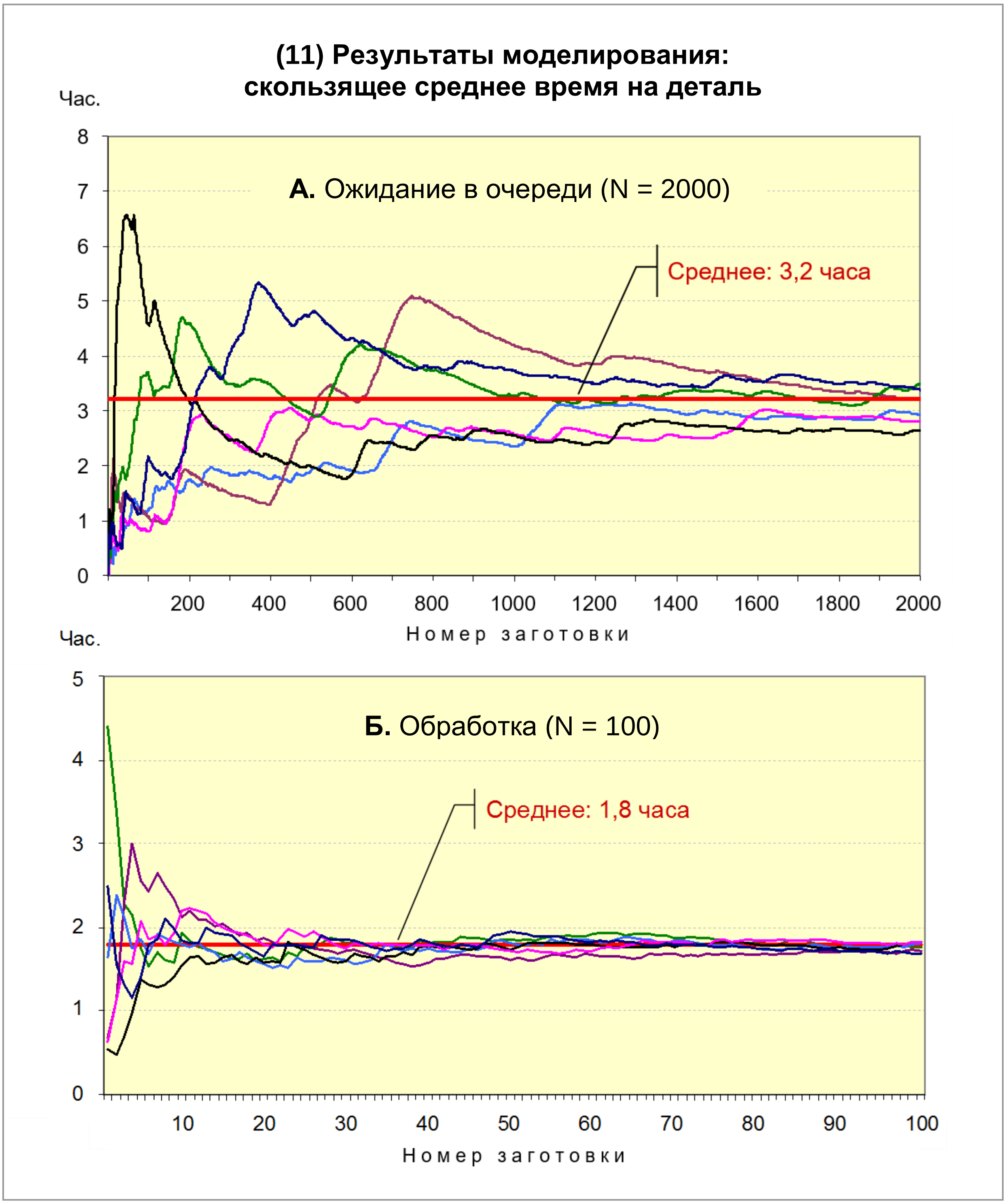
Описанное в настоящей заметке модельное исследование было проведено с целью иллюстрации следующих общих выводов по поводу детального и укрупнённого производственного планирования в условиях вариабельности и зависимости процессов:

- Если для детального планирования ресурсов используются нормативы времени, близкие к соответствующим средним выборочным значениям, то добавление рабочих центров в цепочку последовательной обработки приводит к уменьшению и без того низкой реализуемости получаемых планов.
- Если с целью повышения реализуемости производственных расписаний используются увеличенные нормативы (близкие к соответствующим максимальным выборочным значениям), то добавление рабочих центров в цепочку последовательной обработки приводит к увеличению доли скрытых резервов времени.
- Вынужденные простои ресурсов – не обязательно резервы; часть из них представляет собой защитные мощности, абсолютно необходимые для буферирования неопределённости, прежде всего, страховки от пиковых нагрузок, наличие которых является внутренним свойством системы.
- Сокращение защитных мощностей ресурсов в результате бездумного "перепланирования" только ухудшает ситуацию, поскольку приводит к удлинению производственных циклов и росту объёмов незавершённого производства.
- Чем выше степень укрупнённости плана, тем более эффективно могут быть использованы имеющиеся скрытые резервы.
- Детальное пооперационное планирование в указанных обстоятельствах не только не приносит пользу, но сильно вредит производству.

«Трагедия в том, что большинство явлений, которые кажутся вам случайными, на самом деле закономерны – и наоборот, что ещё хуже».[7-2]

* * *

И ещё одно заключительное замечание по поводу особенностей модели двух (и более) станков по сравнению с исследованной ранее[3] системой из одного рабочего центра. При проведении компьютерных экспериментов мне долго не удавалось выйти на теоретические значения формулы Кингмана, – несмотря на, казалось бы, достаточно большие выборки в сотню заготовок. Результат



получился только после увеличения размеров выборок до нескольких тысяч. Оказалось, что время ожидания плохо сходится к своему среднему значению, то есть центральная предельная теорема теории вероятностей, конечно же, работает, но ооооооооооочень медленно. На диаграмме **А** врезки 11 приведены данные шести серий экспериментов по 2000 заготовок в каждой серии; видно, что даже при таких огромных выборках наблюдаются весьма значительные отклонения от среднего. Вероятно, подобное поведение системы обусловлено “тяжёлыми” хвостами у соответствующего распределения. Для сравнения на диаграмме **Б** врезки 11 показаны аналогичные графики скользящего среднего для общего чистого времени обработки заготовки (сумма двух независимых псевдослучайных экспоненциально распределённых величин со средними 1,0 час и 0,8 часа), где прекрасная сходимость имеет место уже на выборках объёмом несколько десятков заготовок.

ССЫЛКИ И КОММЕНТАРИИ

1 Заметка представляет собой одно из приложений к статье автора: **Жаринов С.** *О детальном и укрупнённом планировании.* – www.leanzone.ru

2 Из серии так называемых законов Мерфологии; цитируется по ссылке: murhpy-law.net.ru/advanced.html

3 См. заметку автора: **Жаринов С.** *О детальном и укрупнённом планировании. Приложение 1: Модель одного станка* – www.leanzone.ru

4 Квазислучайная выборка получается из набора десяти псевдослучайных чисел (см. комментарий (5)) в результате их округления до одного знака после запятой и нормирования по сумме так, чтобы среднее значение было в точности равно, соответственно, 1,0 или 0,8.

5 Необходимые псевдослучайные числа получаются по формуле: $y = -LN(x)/\lambda$, где λ – параметр экспоненциального распределения, x – значение, возвращаемое стандартным генератором равномерно распределённой случайной величины на интервале (0,1).

6 См., например, заметку автора: **Жаринов С.** *О вариабельности и зависимости процессов. Часть II.* – www.leanzone.ru

7 **Талеб Н.** *О секретах устойчивости. Прокрустово ложе.* – М.: КоЛибри, Азбука-Аттикус, 2012; с. 143[1], с. 186[2].