

ОБЗОР ДЕЛИТЕЛЯ УИЛКИНСОНА

АНДРЕЙ БОРОЗДОВ, инженер

В статье рассматривается трехсекционный тонкопленочный делитель Уилкинсона PDW05758 для поверхностного монтажа компании Dielectric Laboratories (DLI).

В этом делителе мощности используются стабильные по температуре керамические материалы собственной разработки DLI, проводники с малыми потерями, а также интегральные резисторы.

Устройство имеет малый размер и совместимо со стандартными компонентами поверхностного монтажа. Размеры корпуса: 4,7×4,06×0,5 мм (см. рис. 1). У этого делителя – низкие возвратные потери (не более 20 дБ) на всех портах, а также хорошая гальваническая развязка между выходными портами (не менее 25 дБ в полосе 6–18 ГГц).

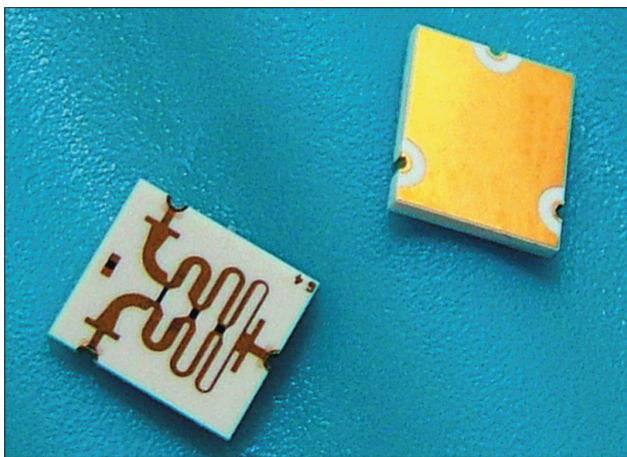


Рис. 1. Внешний вид делителя мощности 6–18 ГГц

В худшем случае превышение допустимых потерь составляет 0,7 дБ на частоте 18 ГГц при номинальной мощности 3,01 Вт и балансе фаз (расхождение 0°).

Типовые измеренные S-параметры показаны на рисунке 2. Точный баланс амплитуд и фаз достигается за счет высокой

точности фотолитографических процессов, используемых при производстве устройств. Баланс амплитуд (макс.): ±0,025 дБ, баланс фаз (макс.): ±3°.

СОХРАНЕНИЕ МОЩНОСТИ

Схематичная структура идеального трехсекционного делителя мощности Уилкинсона показана на рисунке 3. Для ее анализа можно воспользоваться анализом четных и нечетных мод.

По определению, при анализе в режиме нечетных мод источники напряжения устанавливаются на обоих выходах. Напряжения имеют одинаковую амплитуду, но находятся в противофазе. Известно, что в идеальном делителе Уилкинсона мощность рассеивается на резисторах только при возбуждении нечетными модами, т. е. вся приложенная мощность нечетных мод рассеивается на резисторах и 0% возвращается на входной порт.

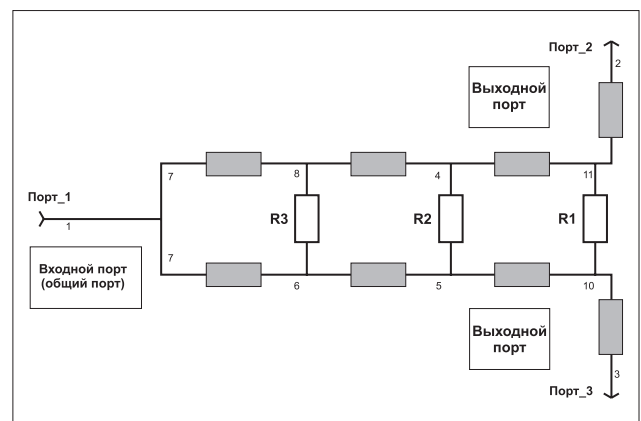


Рис. 3. Многосекционный делитель Уилкинсона

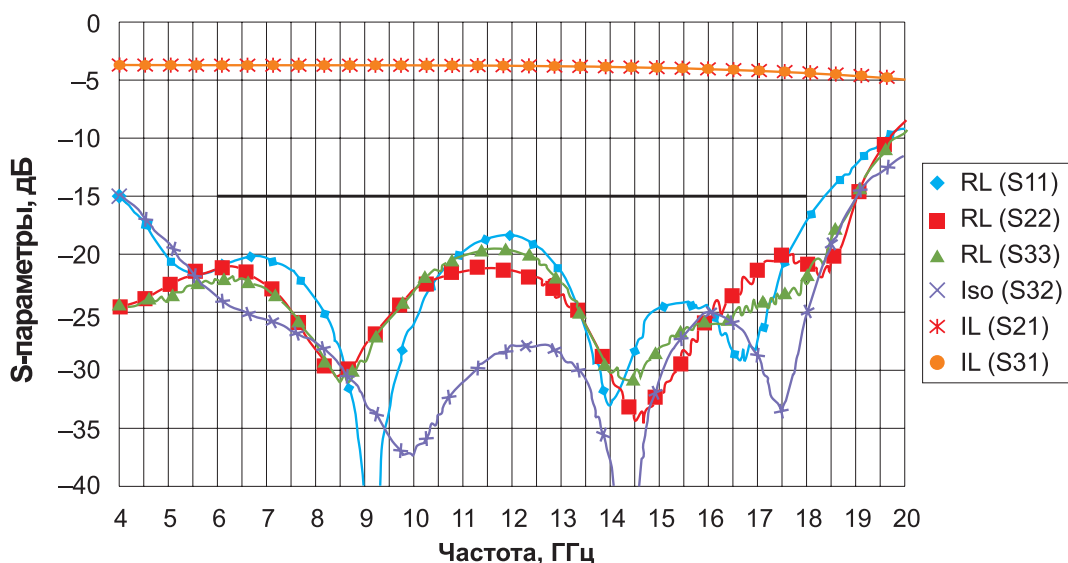


Рис. 2. Измеренные характеристики DLI PDW05758

Оценить реальную долю рассеиваемой мощности можно схемотехнически. Однако рациональнее использовать средство 3D-моделирования конечных элементов, которое позволяет анализировать распределение мощности рассеяния путем подачи сигнала 0,5 Вт с фазой 0° на порт 2 и 0,5 Вт – на порт 3 с фазой 180°.

Общая мощность, которую в состоянии принять делитель в этом случае, составляет 1 Вт. Поскольку физический делитель имеет невысокие, но не нулевые возвратные потери, малая доля этой мощности отразится от выходного порта.

Принятую делителем мощность обозначим как $P_{вх}$. Интегрируя вектор Пойнтинга на каждом входе, рассчитаем общую мощность $P_{вх}$. Величина выходной мощности $P_{вых}$ равна нулю в режиме нечетных мод и для идеального, и для реального устройства.

Мощность, рассеянную на каждом резисторе, обозначим P_{R1} , P_{R2} и P_{R3} , соответственно.

Для расчета мощности, рассеянной на каждом из трех резисторов следует интегрировать плотность потерь на поверхности каждого резистора. Сумму P_{R1} , P_{R2} и P_{R3} обозначим как $P_{расс}$.

Итак, в теории мощность рассеивается полностью. На практике существует несколько источников потерь: проводники, подложки, потери при излучении, которые приводят к снижению величины $P_{вх}$.

Мощность $P_{пот}$, рассеянную не на резисторах, можно найти исходя из закона сохранения энергии. На рисунке 4 показаны частотные зависимости для всех типов потерь.

Видно, что благодаря низким возвратным потерям делителя Уилкинсона величина $P_{вх}$ составляет почти 100% в рабочей полосе 6–18 ГГц. Кроме того, общее количество рассеянной на резисторах мощности превышает 95%. Это объясняется тем, что количество потерь в проводниках, диэлектриках и на излучение невелико и составляет менее 5% в рабочей полосе.

Наконец, видно распределение остальной приложенной мощности между тремя резисторами.

Распределение мощности зависит от номиналов сопротивлений, а также от реализации линий передачи делителя. В большей части диапазона 6–18 ГГц резистор R_2 рассеивает 45% мощности, резистор R_3 – около 35%, резистор R_1 – примерно 25%. В худшем случае на частоте 18 ГГц мощность, рассеиваемая R_2 , составляет 60%. Схемотехнически можно обеспечить равное распределение рассеиваемой мощности, однако, как правило, это сопровождается ухудшением полосы пропускания, вносимых потерь, размера схемы.

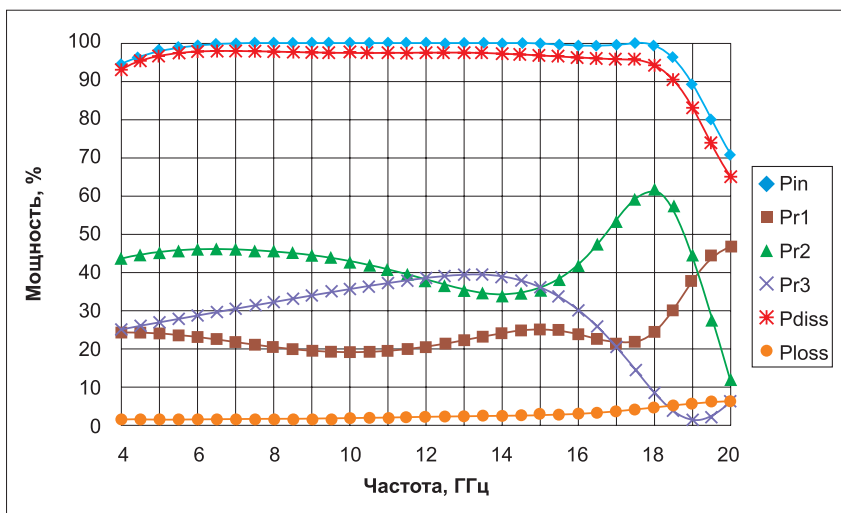


Рис. 4. Баланс мощности при возбуждении в режиме нечетных мод

УПРОЩЕННОЕ ТЕПЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Тщательный анализ тепловых потоков является сложной процедурой, в большой мере зависящей от текущих условий в среде. Мы рассмотрим упрощенную одномерную тепловую модель делителя мощности PDW05758. Отправной точкой в этой модели является температура участка платы под делителем. При генерации тепла за счет рассеяния мощности в резисторе появляется разность температур между резистором и референсной точкой. Эта температурная зависимость пропорциональна теплопроводности k и толщине подложки d делителя, а также определяется параметрами физической среды, по которой проходит тепло. Теплопроводность подложки k измеряется в Вт/(м·К). Рассеянная мощность внутри любого резистора и его соответствующее увеличение температуры описывается выражением:

$$Q = \frac{k\Delta t A}{d}, (1)$$

где Q – мощность, рассеянная внутри резистора; Δt – прирост температуры между исходным и текущим значением в резисторе; A – область, по которой распространяется тепловой поток между резистором и делителем. Тепловой поток через подложку проходит в поперечном направлении; при этом увеличивается площадь поперечного сечения потока по сравнению с физической площадью, занимаемой резисторной пленкой. Справедливо допустить, что угол расходимости теплового потока составляет 45° по отношению к резисторной пленке.

Площадь канала распространения теплового потока определяется следующим образом (2):

$$A = (w_{\text{физ}} + d) (l_{\text{физ}} + d), (2)$$

где $w_{\text{физ}}$ – физическая ширина; $l_{\text{физ}}$ – длина резистора.

Последнее допущение заключается в том, что резисторы достаточно развязаны друг от друга и между ними нет теплового взаимодействия. На практике это наблюдается очень редко. При значительном тепловом взаимодействии приходится использовать более точные модели с несколькими источниками тепла и более сложными инструментами анализа.

Физические размеры R_1 , R_2 и R_3 равны: 0,38×0,1 мм; 0,24×0,18 мм и 0,18×0,22 мм, соответственно.

Толщина подложки равна 0,5 мм. Теплопроводность керамической подложки DLI составляет около 9,0 Вт/(м·К). Используя уравнения (1–2), рассчитаем нагрев каждого резистора при рассеянии 1 Вт мощности в каждом из них:

$$\begin{aligned} \Delta T_{R_1} &= 113,04^\circ\text{C}/\text{Вт}; \\ \Delta T_{R_2} &= 118,94^\circ\text{C}/\text{Вт}; (3) \\ \Delta T_{R_3} &= 121,88^\circ\text{C}/\text{Вт}. \end{aligned}$$

Эти значения в сочетании с уровнями мощности (см. рис. 4) можно использовать для расчета температуры

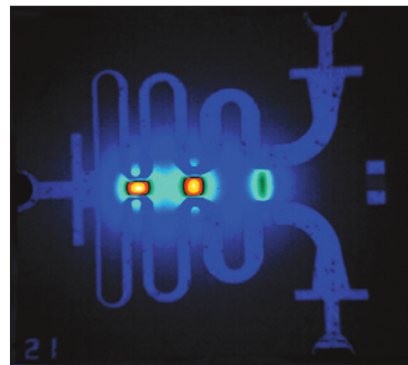


Рис. 5. Карта распределения тепла при поступлении 1 Вт в режиме нечетных мод

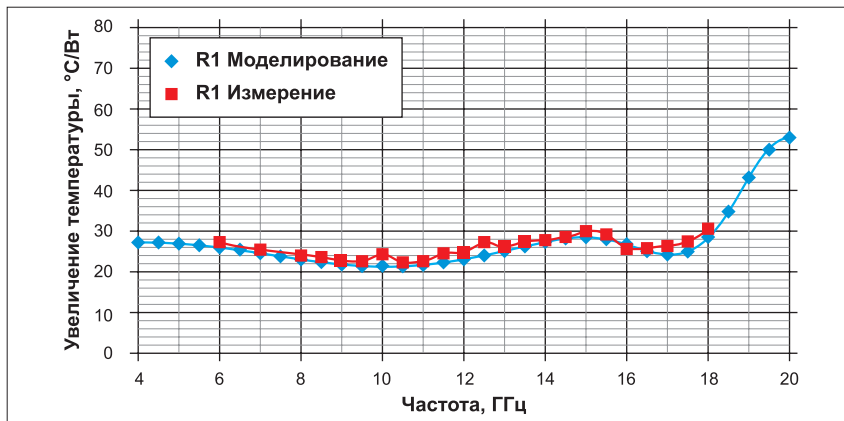


Рис. 6. Прирост температуры R₁ из расчета на 1 Вт

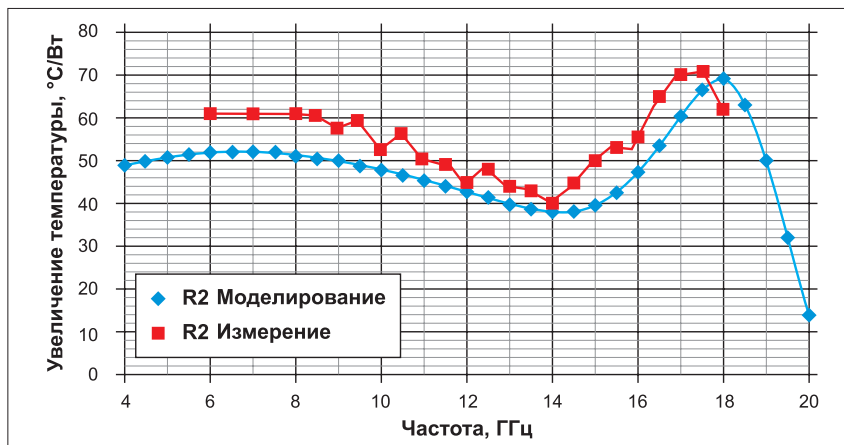


Рис. 7. Прирост температуры R₂ из расчета на 1 Вт

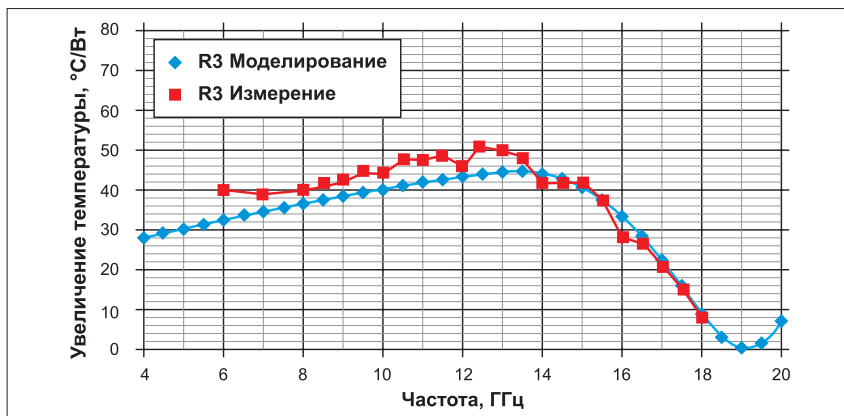


Рис. 8. Прирост температуры R₃ из расчета на 1 Вт

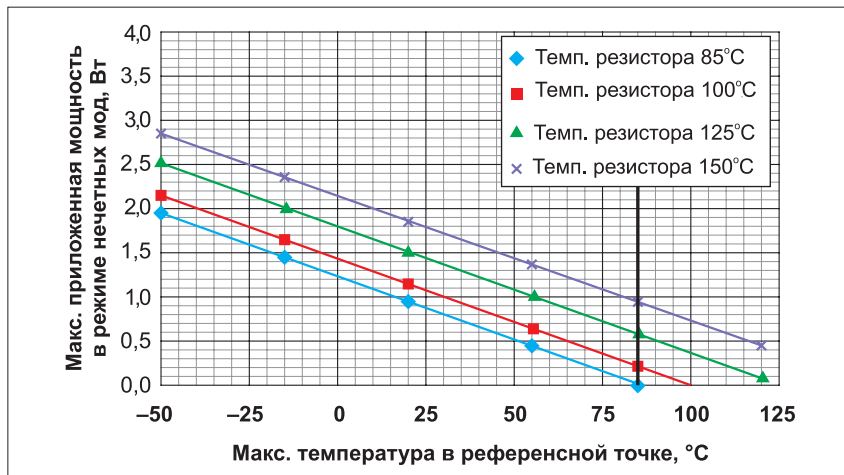


Рис. 9. Зависимость максимальной рассеиваемой мощности от температуры в референсной точке и максимальной температуры резистора при 18 ГГц

пленочного резистора при приложении противофазной волны любой амплитуды и частоты.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗИСТОРА

До сих пор мы рассматривали данные, полученные программно с помощью электромагнитного анализа конечных элементов и простых тепловых моделей. Для проверки справедливости этого подхода измерим температуру пленочных резисторов в делителе PDW05758 при подаче радиосигнала на выходные порты в режиме нечетных мод. Измерение температуры пленочных резисторов произведем с помощью ИК-камеры (см. рис. 5).

Это изображение было получено при максимальной приложенной мощности 1 Вт в режиме нечетных мод при частоте 12 ГГц. Видно, что прирост температуры на каждом резисторе разный. Резисторы 2 и 3 нагреваются в гораздо большей мере, чем резистор 1.

Кроме того, видно, что теплота распространяется в поперечном направлении между резисторами с небольшим наложением особенно между резисторами 2 и 3.

Как уже упоминалось, с помощью уравнения (3) и рисунка 4 можно оценить нагрев каждого резистора, нормированный к общей приложенной мощности. На рисунках 6–8 сравниваются измеренные и расчетные данные. Видно близкое соответствие между ними, что подтверждает применимость такого упрощенного анализа.

Одним из способов применения зависимостей, показанных на рисунках 6–8, является определение максимальной мощности в режиме нечетных мод для заданной максимальной температуры в исходной точке. Например, на частоте 18 ГГц прирост температуры R₂ в перерасчете на 1 Вт в режиме нечетных мод в худшем случае составляет 70,75°C/Вт. На рисунке 9 показана зависимость максимальной мощности нечетных мод от максимальной температуры в исходной точке. Показаны зависимости для четырех температур: 85; 100; 125 и 150°C. Вертикальной черной линией отмечена температура подложки 85°C – типичное максимальное значение рабочей температуры коммерческих и военных систем. Соответствующее максимальное значение мощности в режиме нечетных мод равно 0; 0,22; 0,57 и 0,93 Вт для максимальных разрешенных температур 85; 100; 125 и 150°C, соответственно.

НЕГАТИВНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ НАГРЕВА

В общем случае можно выделить два отрицательных эффекта, обусловленных

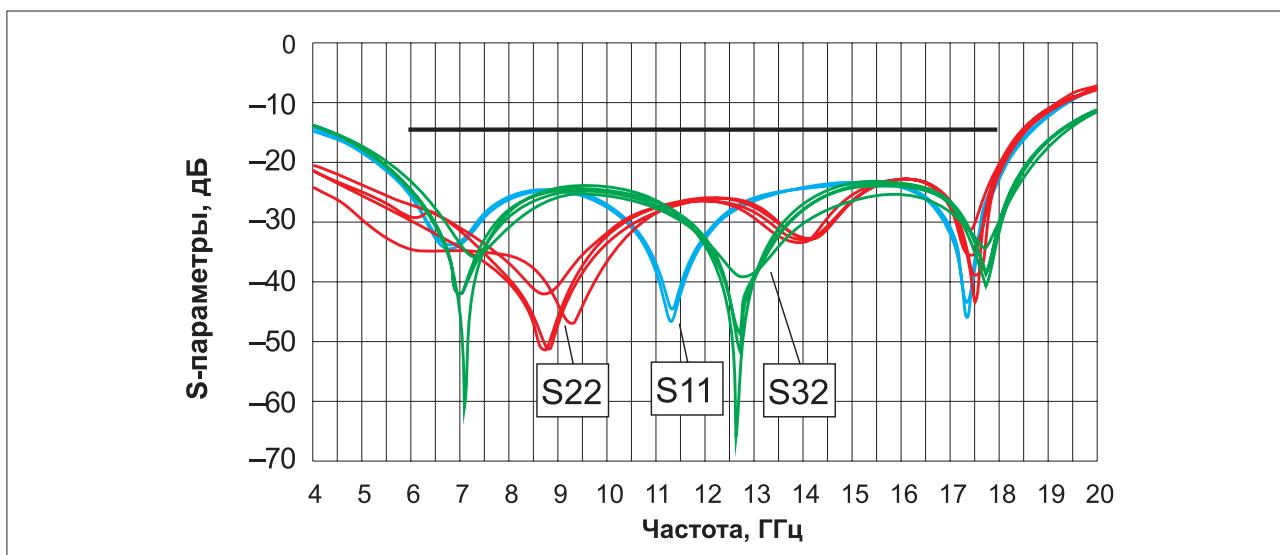


Рис. 10. Моделирование процесса старения резистора

нагревом резисторов: старение резистора и нагрев контактов делителя, которыми он крепится к печатной плате. Первый эффект, как правило, долгосрочный, тогда как второй даже при кратком временном воздействии может привести к отказу.

Старение – это процесс окисления пленок из нитрида тантала при работе на высоких температурах. В зависимости от температуры резистора и длительности воздействия сопротивление увеличивается по логарифмическому закону. Как правило, температура пленки должна быть значительно выше 85°C, чтобы сопротивление значительно увеличилось. Например, тестирование в печи показывает, что сопротивление возрастает примерно на 1,2% при 85°C за 250 тыс. ч (28,5 лет). Когда температура резистора увеличивается до 100°C, за то же время сопротивление увеличивается уже на 2,5%. При температуре 125°C прирост составит 7,3%. При сокращении длительности воздействия сопротивления увеличивается медленнее.

В случае делителя Уилкинсона изменение сопротивлений само по себе не вызывает опасений, однако оно может привести к изменению S-параметров. На рисунке 10 показаны S-параметры делителя Уилкинсона при номинальном сопротивлении, а также при его увеличении на 1,2; 2,5 и 7,3%. Видно, что изменения, вызванные старением, минимальны даже при увеличении сопротивления на 7,3%.

Температура контактов между делителем и печатной платой также может ограничить максимальную мощность. Во многих заказных схемах для реализации и защиты контактов используется припой и эпоксидная смола. Нельзя допускать нагрева припоя до температуры плавления. Для эпоксидной смолы максимальная температура указывается в документации. В большинстве случаев максимальные значения находятся в диапазоне 180–250°C. На практике ограничение задается на уровне 125°C, чтобы гарантировать непрерывную работу.

Выводы

Мы показали, что упрощенная модель распространения тепла по плате является надежной – она обеспечивает значения, близкие к реальным.

Общее значение рассеянной мощности в нормальном режиме работы окажется, скорее всего, ниже уровня, который упоминался выше. Рассеянная мощность зависит от величины и фазы источника, а также от коэффициента отражения нагрузок, подключенных к портам делителя.

Обычно проводят анализ нечетных мод, поскольку он позволяет учесть худший случай, который в то же время маловероятен. —