 iam sam 1 мая 2018 в 00:11

SamsPcbGuide, часть 4: Трассировка сигнальных линий. Минимизация индуктивности

Производство и разработка электроники, Электроника для начинающих

Мир, трассировка печатной платы, май. Потому что трассировка печатной платы — это труд. И эта статья открывает целый блок, цель которого дать правильные инструменты для этой задачи. В ней обосновывается важность контроля траектории возвратного тока и минимизации индуктивности контура тока критических сигнальных линий, а также даются рекомендации по их оптимальной трассировке.

Как уже говорилось в предыдущих статьях цикла, в процессе разработки печатной платы должны учитываться возможности доступной технологии её производства. При этом под «доступностью» здесь следует понимать «доступность в заданных временных, финансовых и организационных рамках». Технологические ограничения особенно важны на этапе трассировки печатной платы. Поэтому перед началом трассировки рекомендуется изучить технологические нормы предполагаемого завода-изготовителя и создать в используемой САПР набор правил, выполнение которых будет автоматически контролироваться при трассировке печатной платы. Сразу оговорим, что хотя современные САПР и предлагают средства автоматической трассировки печатной платы, они в данной статье рассмотрены не будут и в общем случае к использованию не рекомендуются. Только для относительно простого проекта с хорошим размещением компонентов и продуманным набором правил эти средства позволяют получить качественную топологию.

Не забываем про возвратный ток

Трассировка печатной платы — процесс, при котором разработчик задаёт пути протекания токов в слоях металлизации печатной платы. В электрических цепях токи текут по замкнутым траекториям — контурам — от положительного полюса источника напряжения к отрицательному. Поэтому необходимо понимать, что прямому току, текущему от источника напряжения к нагрузке, всегда соответствует возвратный ток, текущий от нагрузки обратно к источнику. Эта пара токов образует замкнутый контур, контроль параметров которого, особенно в случае высокочастотных сигналов, является основной задачей разработчика. Большое количество ошибок и проблем с ЭМС и ЭМИ печатных плат связано именно с тем, что разработчик не анализирует траектории и взаимное влияние возвратных токов. На рис. 1 представлен типовой контур протекания тока сигнальной линии, а цветным прямоугольником выделен участок этого контура, которому обычно уделяется большая часть внимания разработчика, тогда как оставшаяся часть контура иногда остаётся предоставленной сама себе. На рисунке также отражён тот факт, что интегральные микросхемы не являются источниками электрической энергии. Они выполняют функцию сложных ключевых элементов, тогда как источниками энергии служат батареи, конденсаторы подсистемы питания, а также внешние относительно печатной платы источники.

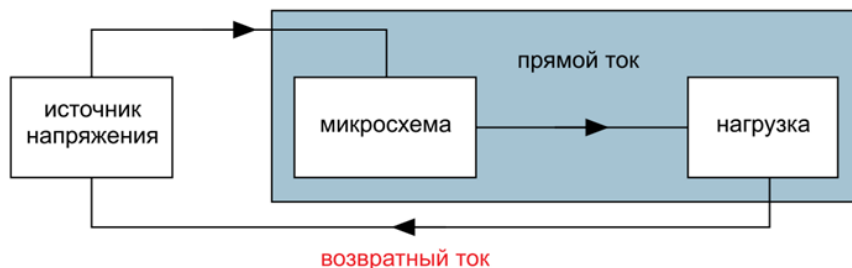


Рис. 1. Замкнутый контур тока в электрической цепи.

Когда траектория возвратного тока не задана разработчиком, она определяется топологией платы (прежде всего общего провода) и законами физики (как, впрочем, и всегда) — возникает распределение плотности тока по траекториям в обратной зависимости от их импеданса. В общем случае это распределение аналитически не выражается, однако для простых случаев решения существуют. Во второй статье цикла приводилась рекомендация располагать сигнальные слои вблизи сплошного слоя земли или питания. В такой конфигурации распределение возвратного тока в опорном слое для низкочастотного сигнала близко к равномерному (рис. 2А), так как при расширении области протекания тока импеданс, определяемый резистивной составляющей, падает. С повышением частоты определяющим становится влияние реактивной составляющей и минимальной индуктивностью обладает траектория, проходящая под сигнальной дорожкой, так как площадь петли при этом минимальна (рис. 2Б, см. первую статью). Аналитическую оценку плотности распределения возвратного тока тонкой (ширина $w \leq h$) микрополосковой линии даёт следующая формула (x — расстояние от геометрического центра линии, h — высота над опорным слоем):

$$J(x) = \frac{J(0)}{1 + \left(\frac{x}{h}\right)^2}.$$

Такое распределение обеспечивает минимальное значение индуктивности, то есть для всех частот, для которых омическое сопротивление пренебрежимо мало по сравнению с реактивным, оно будет описываться данной формулой. Анализ распределения показывает, что в полосе $\pm h$ сосредоточено 50% тока, а в полосе $\pm 3h$ — 80% тока.

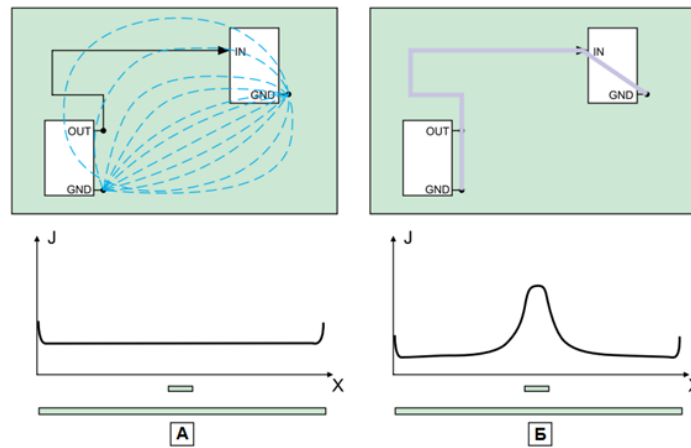


Рис. 2. Распределение плотности возвратного тока в сплошном слое земли для низкочастотной (А) и высокочастотной (Б) составляющих сигнала.

Важно понимать, что реальные сигналы состоят из набора частот, имеющих некоторое спектральное распределение, при этом они чаще всего имеют шумовую часть, спектр которой может значительно отличаться от спектра самого сигнала. Например, в «низкочастотной» линии питания могут возникать значительные высокочастотные импульсные помехи при переключении цифровых микросхем. Таким образом, для низкочастотных составляющих сигнала возвратный ток распределён равномерно в широкой области вдоль кратчайшего пути, а для высокочастотных ($f \geq 100$ кГц) – сосредоточен в узкой области в максимальной близости от прямого тока.

Избегаем вырезов в опорном слое

Любое отклонение в распределении тока от оптимального приводит к увеличению индуктивности контура тока. Отклонение возникает в случае наличия вырезов (англ. split, slot, gap) в опорном слое, причиной которых могут стать сквозные механические и переходные отверстия, ряд переходных отверстий или выводов разъёма, сигнальная дорожка в опорном слое (рис. 3). Говард Джонсон в [2, раздел 5.3] приводит оценку индуктивности, вносимой узким разрывом длиной D :

$$\Delta L \text{ [нГн]} \approx 2 \cdot D \text{ [см]} \cdot \ln \frac{D \text{ [см]}}{w \text{ [см]}},$$

где w – ширина дорожки, влияние ширины самого разрыва мало. Для сигнальной дорожки шириной $w = 0,2$ мм при разрыве длиной $D = 1$ см увеличение индуктивности составит $\Delta L_1 \approx 8$ нГн. Для сравнения, если бы сигнальная дорожка была проведена вокруг разрыва, то её длина увеличилась бы в среднем на D , что в свою очередь при высоте дорожки над опорным слоем $h = 0,25$ мм привело бы к вдвое меньшему увеличению индуктивности:

$$\Delta L_2 \approx 2 \cdot D \text{ [см]} \cdot \ln \frac{2\pi h \text{ [мм]}}{w \text{ [мм]}} \approx 4 \text{ нГн.}$$

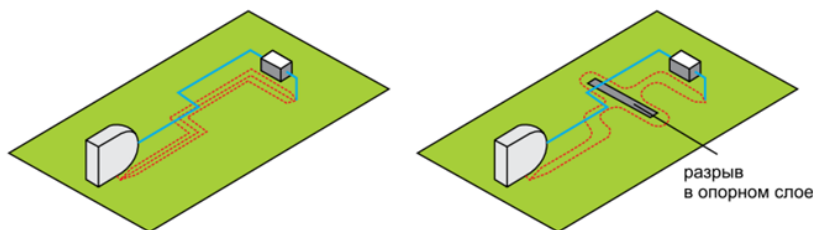


Рис. 3. Вырез в опорном слое приводит к нарушению в распределении возвратного тока.

Минимизируем индуктивность

Паразитная индуктивность есть у каждого элемента печатной платы – дорожки, переходного отверстия, сплошных слоёв, у паяных соединений, выводов микросхем, микропроволочной разварки. Почему важно минимизировать паразитную индуктивность критических (агрессивные источники высокочастотных помех и чувствительные слаботочные аналоговые цепи) линий? Достаточно вспомнить несколько формул, в которые индуктивность входит как параметр: формулу, связывающую поток магнитного поля и силу тока в проводнике

$$\Phi_B = \oint \vec{B} d\vec{S} = LI,$$

формулу, связывающую ЭДС индукции при изменении тока в проводнике

$$V = -L \frac{dI}{dt},$$

формулы частоты резонанса

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

и добротности LC-контура

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Таким образом, чем выше индуктивность, тем выше излучение, тем выше импульсные помехи, в том числе перекрёстные, тем ниже частоты возбуждения паразитных осцилляций и больше время их затухания. Все эти эффекты, естественно, нежелательны, и связанные с ними проблемы далеко не всегда можно решить доработками печатной платы, таких как установка дополнительных фильтрующих компонентов, экранирование.

Р.1.

Критически важно выполнять разводку высокочастотных сигнальных линий, минимизируя индуктивность контура, что достигается за счёт:

- минимизации длины печатной дорожки,
- исключения переходов между сигнальными слоями,
- близкого расположения дорожки к опорному слою,
- отсутствия разрывов в опорном слое на пути возвратного тока.

В случае отсутствия возможности устранить протяжённый разрыв в опорном слое под сигнальной линией, рекомендуется в максимальной близости с сигнальной линией расположить хотя бы один керамический конденсатор (англ. stitching capacitor), обеспечивающий путь возвратного тока через разрез. Однако с ростом частоты паразитная индуктивность конденсатора и его соединений с опорным слоем эффективность решения падает.

Оптимизируем переходы между слоями

Отдельного рассмотрения требует важный вопрос перехода дорожки между сигнальными слоями, потому что не всегда возможно исключить перекрестия для всех критических сигналов. На рис. 4 показываются пути прямых и возвратных токов для различных вариантов перехода между слоями. На рисунке условно показано влияние скин-эффекта: возвратные токи текут в поверхностном слое проводника. По увеличению количества красных стрелок можно судить об увеличении общей индуктивности пути, к которой прибавляется индуктивность переходных отверстий, а в случае различающихся опорных слоёв и индуктивность паяных соединений и последовательная индуктивность конденсатора (англ. equivalent series inductance, ESL). Кроме того, в случае опорных слоёв разного потенциала высокочастотная часть возвратного тока течёт в виде токов смещения (красные пунктирные стрелки). Помимо проблем с целостностью сигнала это приводит к возникновению шумов в данной цепи питания и повышению уровня ЭМИ [3].

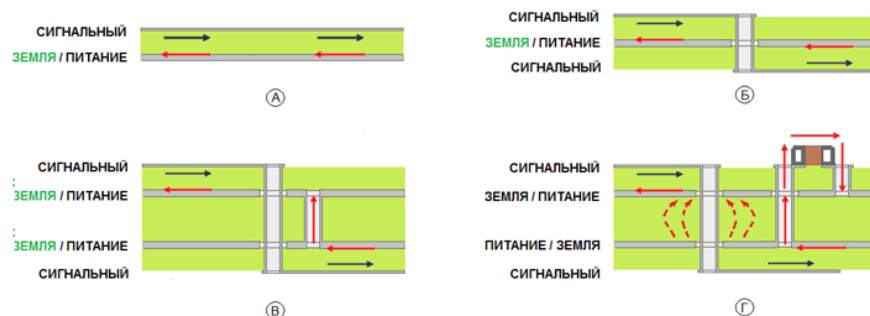


Рис. 4. Путь возвратного тока (красные стрелки) при смене сигнального слоя при различных вариантах расположения опорных слоёв.

Генри Отт в [4, раздел 16.3.3] приводит данные эксперимента, в котором исследовалось изменение уровня ЭМИ для четырёхслойной печатной платы в случае перехода одной высокочастотной линии с верхнего слоя на нижний с опорными земляными. Опорные слои не были соединены между собой переходным отверстием, а только за счёт емкостной связи. За исходный был принят уровень излучения для той же платы, где сигнальная линия была разведена в одном слое. Увеличение составило около 30 дБ на частоте ~250 МГц, и только после 2 ГГц распределённая ёмкость печатной платы обеспечивала достаточно низкий импеданс перехода между опорными слоями, чтобы уровень ЭМИ отличался мало. Эксперимент показывает важность исключения переходов между сигнальными слоями для высокочастотных линий.

Р.2.

В случаях, когда избежать перехода невозможно, рекомендуются следующие варианты в порядке приоритета:

- между двумя слоями, примыкающими к одному и тому же опорному слою (рис. 4Б),
- между двумя слоями, примыкающими к опорным слоям одного потенциала (питание/земля), при этом в максимальной близости от места смены слоя (рис. 4В) и, желательно, вдоль сигнальной линии опорные слои соединены переходными отверстиями,
- между двумя слоями, примыкающими к соседним опорным слоям разного потенциала, при этом в максимальной близости от места смены слоя опорные слои соединены как минимум двумя керамическими конденсаторами с низкой индуктивностью соединения (рис. 4Г),
- между двумя слоями, примыкающими к разнесённым опорным слоям разного потенциала, при этом в максимальной близости от места смены слоя опорные слои соединены керамическими конденсаторами с низкой индуктивностью соединения – не рекомендуется для критических сигналов с фронтами порядка 1 нс.

Смена между более, чем двумя слоями для критических сигналов не рекомендуется. Предпочитаемый опорный слой в первых двух вариантах – слой земли. Если опорным слоем является слой питания, то необходимо обеспечить низкий импеданс подсистемы питания в полосе спектра сигнала. Заметим, что чаще всего около микросхем расположено достаточно большое количество керамических конденсаторов, поэтому смена слоя сигнальной дорожкой вблизи от приёмника/передатчика наиболее оптимальна и в лучшем случае не потребует размещения дополнительных компонентов.

В сложных печатных платах множество сигнальных линий и выполнить указанные в данной статье рекомендации для всех сигналов не представляется возможным, особенно учитывая высокие требования к габаритам конечных изделий. Именно поэтому необходимо выделить группу критических высокочастотных и чувствительных сигналов и начать трассировку именно с них. При этом расположение компонентов, связанных с этой группой, должно обеспечивать возможность оптимальной разводки критических сигналов. Задача минимизации индуктивности контура тока – это лишь один из аспектов трассировки сигнальных линий, в следующих статьях цикла будут рассмотрены техники разводки и схемы согласования, снижающие отражения и перекрёстные помехи в линиях.

Литература

- [1] Holloway C.L., Kuester E.F. «Closed-Form Expressions for the Current Density on the Ground Plane of a Microstrip Line, with Applications to Ground Plane Loss». IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 43, no. 5, May 1995.
- [2] Johnson H. «High Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic», Prentice Hall, 1993.
- [3] Cui W., Ye X., Archambeault B., etc. «EMI Resulting from Signal Via Transitions through the DC Power Bus», IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2000.
- [4] Ott, H.W. «Electromagnetic Compatibility Engineering», Wiley, 2009.

Статья была впервые опубликована в журнале «Компоненты и технологии» 2018, №2. Публикация на «Geektimes» согласована с редакцией журнала.

Теги: samspcbguide, печатные платы, радиотехника и электроника, трассировка, split plane, stitching

↑ +26 ↓ 102 9k 16

**44,2**

Карма

0,0

Рейтинг

69

Подписчики

Семен Тютюков @iamsam

Инженер-конструктор

Сайт

Поделиться публикацией

ПОХОЖИЕ ПУБЛИКАЦИИ

2 июня 2018 в 12:55

SamsPcbGuide, часть 5: Трассировка сигнальных линий. Искажения в линии и согласование импедансов

↑ +26 6,5k 78 3

1 апреля 2018 в 10:53

SamsPcbGuide, часть 3: Предельный ток печатной дорожки

↑ +36 11,6k 103 11

21 марта 2018 в 08:34

«Росатом» будет добывать драгоценные металлы из печатных плат

↑ +13

👁 12,4k

📄 12

💬 53

Комментарии 16



hardegorg 1 мая 2018 в 07:12

↑ 0 ↓

Что вы имели ввиду на рис. 4 обозначая «земля/питание», да еще и разным цветом? Серый цвет — это изолятор, а на нём два слоя — земля и питание? А почему разным цветом? И вообще на рис.4 у вас четыре рисунка — к какому какую часть текста «прикрутить» — не очень понятно.



hardegorg 1 мая 2018 в 08:28

↑ +1 ↓

Сам спросил, сам ответил.

Зря вы творчески доработали рисунки из оригинала. И текст не стоило сокращать, лучше бы сделали полный перевод.



iamsam 1 мая 2018 в 12:39

↑ 0 ↓

Рисунок 4 я сам рисовал — если дадите ссылку на «оригинал», который чем-то лучше, я доработаю. Мне он нравится, казалось понятно: серый — это металл, знак "I" означает «или», а зелёный цвет — предпочтительность потенциала. Расписывать это всё не видел смысла, потому что есть текст. Привязку к рисункам сделаю, пожалуй, так будет яснее.



hardegorg 1 мая 2018 в 18:59

↑ +2 ↓

Сами же дали ссылку: Генри Отт в [4, раздел 16.3.3]

Вот-же один в один.

16.3 RETURN PATH DISCONTINUITIES 631

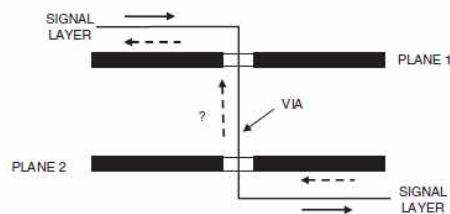


FIGURE 16-7. A signal trace routed on two layers adjacent to two different planes. How does the return current (dashed arrow) get from the bottom of plane 2 to the top of plane 1? The solid arrow shows the signal current path, and the dashed arrow shows the return current path.

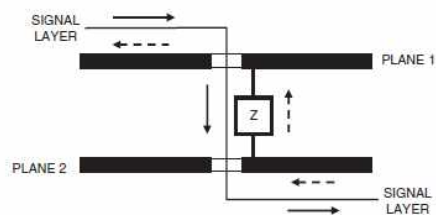


FIGURE 16-8. Return path impedance resulting from the signal trace changing layers. The solid arrow shows the signal current path, and the dashed arrow shows the return current path.

Я не с точки зрения чей рисунок, я про восприятие. Просто я знаю что товарищ Отт не первую книжку пишет, и у него всё четко отработано — и лишнего не напишет, именно столько, сколько надо для понимания, и непонятных мест минимум. И да, я всё это знаю и применяю, и ваши статьи я читаю, потому что интересны, но вот в разделе «Оптимизируем переходы между слоями» я реально пять раз перечитывал и пытался понять рисунки, пока не поднял оригинал.

Вот в оригинале plane — понятно, это «опорный слой», у вас появляется «земля/питание» уже не очень понятно — то ли два слоя, то ли один тот что маркирован зеленым, но на одном рисунке два черных... А по тексту везде «опорный слой», в одном месте приписка "(земля/питание)".

У оригинала под каждым рисунком подробный текст приписан, у вас все рисунки были в куче, сейчас понятна привязка.



iamsam 1 мая 2018 в 20:17

↑ 0 ↓

Да, обратная связь принята, спасибо. Когда сам пишешь, и потом перечитываешь даже не раз, кажется понятным. Доработал ссылки на рисунок и сам рисунок. По нему сходство — это шлейф от прочтения, а «В» и «Г» у Отта вообще нет ;). Просто я его сам в Paint :) отрисовывал старательно (некоторые-то копировал и редактировал), вот и странно было услышать про «зря» и «оригинал».


Как Вы тогда предложили бы разделить опорные слои разного или одного потенциала? Я только так придумал, у Отта не было такой задачи — вот и «plane».







QwertyOFF 1 мая 2018 в 09:48

↑ +1 ↓

Пожалуй стоит добавить рекомендацию по возможности использовать глухие переходные отверстия, если переход выполняется с внутренним слоем печатной платы.

-  iamsam


1 мая 2018 в 12:46







↑

0

↓

Да, хорошее замечание, согласен. Просто тут ведь одним простым тезисом не отделаться, и это имеет смысл для ГГц сигналов, где конструкцию переходного отверстия специально оптимизируют моделированием — убирают стабы (вот как по-русски заменить), отступы увеличивают и т.п. На частотах среднего диапазона это едва ли оправдано, только стоимость платы увеличит. Вы сами когда-нибудь применяли такой подход?
-  iamsam


1 мая 2018 в 17:19





↑

0

↓

Вот интересная статья на тему, кстати: blog.iamsimenterprises.com/2017/03/08/via-stubs-demystified.
-  32bit_me


1 мая 2018 в 10:15







↑

0

↓

Мне одному кажется, что это просто кусок из «Начального курса чёрной магии»?
-  iamsam


1 мая 2018 в 12:55







↑

0

↓

Эту книгу, наверное, все читали. И я тоже, она, кстати, в ссылках. Она неплоха, но старовата (2000 год) и помимо неё много другой прекрасной литературы, только вот на английском, поэтому я и сделал компиляцию. И набор ссылок на толковую литературу — отчасти цель статей. Так что рекомендую обратить внимание на ссылки в конце и почитать, они хороши. А то, что есть пересечения — это неудивительно, потому что базовые принципы и есть базовые принципы. У тех же Отта, Богатина и Аршамбу есть повторяющиеся «куски» с Джонсоном, не думаю, что это был повод для них не писать свои монографии. Сложные картинки могут вызывать воспоминания :) — я для них брал основу, дорабатывал, улучшая в моём понимании. Я не графический дизайнер, а разработчик печатных плат, полностью свои делать долго было бы.
-  32bit_me


1 мая 2018 в 16:06







↑

0

↓

Ну хорошо, вы можете выделить ту информацию, которая есть в вашей статье, но нет в «кратком курсе»?
-  iamsam


1 мая 2018 в 16:28







↑

0

↓

Если Вы всё это знаете — это прекрасно, если Вам неинтересно — тоже не задерживаю. Сверять источники у меня нет времени. Я обращался к книге, о которой Вы говорите, при работе над статьями, но её вклад максимум 20%. Честно говоря, у меня нет целей кому-то что-то доказать. Есть цели — поделиться информацией с теми, для кого она будет новой, и улучшать её через конструктивное общение сообщества специалистов, опыт и знания которых выше.
-  32bit_me

1 мая 2018 в 16:32




↑

0





↓

Извините, если я вас чем-то обидел, но я именно хотел бы конструктивного общения. Вы утверждаете, что книга 2000 года старовата, вот я и прошу указать, что именно нового вы добавили.

Мне кажется, в любой научной публикации важно именно выделять новизну.

А обижаться совершенно не на что.
-  iamsam


1 мая 2018 в 16:55







↑

0

↓

Обиды нет, что Вы. Просто на «Магию» у меня уже негативный рефлекс, её уже не в первом комментарии вспоминают. Да, это единственная толковая переведённая книга на русский язык, это всё прекрасно, но время идёт, отрасль развивается, 25 лет прошло с её издания Джонсоном (она вообще 1993 года, я ошибся). Я не позиционирую статьи как научные, я не исследователь, я практикующий инженер. Возможно, именно эта публикация с точки зрения ключевых моментов схожа с «Магией», однако новизна — в самом цикле статей, сжатом и систематизированном изложении информации, которая включает и новые подходы, возникшие с уходом спектра сигналов в ГГц-овый диапазон. Для тех, кто захочет углубляться самостоятельно, есть ссылки на качественные источники. Как-то так.
-  32bit_me


1 мая 2018 в 17:29







↑

0

↓

Ясно.
-  lelilk363

1 мая 2018 в 20:24



↑

0

↓

Чтобы не забыть...

Очень хорошо представлен материал вот на этом <http://www.elart.narod.ru/>

Все в переводе, если кому тяжело...

Только полноправные пользователи могут оставлять комментарии. Войдите, пожалуйста.

САМОЕ ЧИТАЕМОЕ

Сутки

Неделя

Месяц

Как мы купили дом с солнечными панелями, и что из этого вышло

↑ +51

👁 40,9k

📄 62

💬 127

Разработан метод шумоизоляции, гасящий до 94% шумов — рассказываем, как он работает

+20

30,8k

90

61

Ядро Linux 5.1 — что известно об изменениях

+30

28,7k

33

18

Что курил конструктор: необычное огнестрельное оружие

+96

178k

97

113

Программист на больничном

+72

150k

100

191

Аккаунт	Разделы	Информация	Услуги	Приложения
Войти	Публикации	Правила	Реклама	<div> Загрузите в App Store</div> <div> доступно в Google Play</div>
Регистрация	Хабы	Помощь	Тарифы	
	Компании	Документация	Контент	
	Пользователи	Соглашение	Семинары	
	Песочница	Конфиденциальность		

