

Механические вычислительные системы, использующие только звенья и поворотные устройства

Суставы

РАЛЬФ К. МЕРКЛ РОБЕРТ А. ФРЕЙТАС МЛАДШИЙ. ТЭД ХОГГ ТОМАС Э. МУР МЭТЬЮ С. МОЗЕЗ
ДЖЕЙМС РАЙЛИ

12 января 2018 г.

Абстрактный

Демонстрируется новая парадигма механических вычислений, для которой требуются только две основные части: звенья и вращающиеся соединения. Эти базовые части объединяются в две основные структуры более высокого уровня, блокировки и балансы, и их достаточно для создания всей необходимой комбинаторной и последовательной логики, необходимой для полной по Тьюрингу вычислительной системы. Хотя рабочие системы еще предстоит реализовать с использованием этой новой парадигмы, механическая простота описанных систем может лучше подходить, например, для микропроизводства, чем предыдущие конструкции механических вычислений. Кроме того, моделирование показывает, что если бы можно было реализовать реализации на молекулярном уровне, они были бы гораздо более энергоэффективными, чем обычные электронные компьютеры.

1. Введение

Методы механических вычислений хорошо известны. Простые примеры включают генераторы функций и другие устройства, которые не способны выполнять вычисления общего назначения (полные по Тьюрингу) (обзор см. в [22]), тогда как самым ранним примером конструкции механического компьютера общего назначения, вероятно, является аналитическая машина Бэббиджа, описан в 1837 г. [23]. Один из самых первых современных цифровых компьютеров был чисто механическим устройством: Zuse Z1, созданный в 1938 году [28].

Хотя предыдущие конструкции механических вычислений сильно различаются, немногие конструкции, способные выполнять вычисления общего назначения, требуют значительного количества основных деталей, таких как различные типы скользящих пластин, шестерен, валов и подшипников линейного перемещения, пружин (или других средств накопления энергии), фиксаторы, храповики, собачки и сцепления.

Использование множества деталей влечет за собой ряд потенциальных проблем, таких как повышенное трение, более высокая масса и повышенная сложность устройства. Такие проблемы могут снизить производительность и увеличить сложность производства. Однако уменьшение количества, сложности и массы деталей механического компьютера — непростая задача из-за необходимости обеспечения как универсальной комбинаторной логики (например, И, И-НЕ, ИЛИ и т. д.), так и последовательной логики (памяти).

В частности, последовательная логика, являющаяся основой памяти, требует возможности условно отделять логические элементы от текущих входов. Это связано с тем, что память не может быть только детерминированным результатом только текущих входных данных, иначе предыдущие состояния не могут быть сохранены. Хранение информации, которое легко осуществить в электронных системах с использованием защелок или триггеров, не так легко осуществить в механической системе, где, возможно, придется фактически соединять и отключать части системы друг от друга (например, с помощью механизма, подобного муфте).) в подходящее время.

В этой статье показано, что механические компьютеры можно значительно упростить, используя только две части: звенья и поворотные соединения.

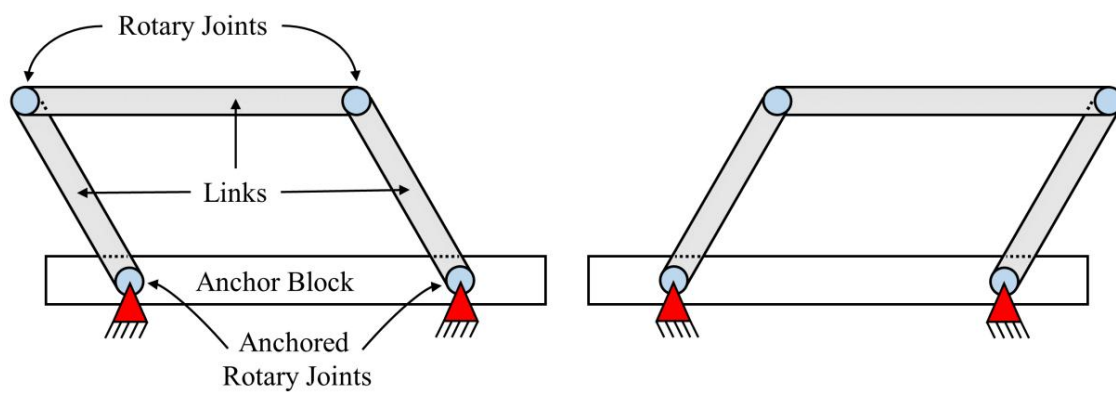


Рисунок 1. 4-звенная рычажная система в двух конфигурациях: с наклоном влево (слева) и с наклоном вправо (справа).

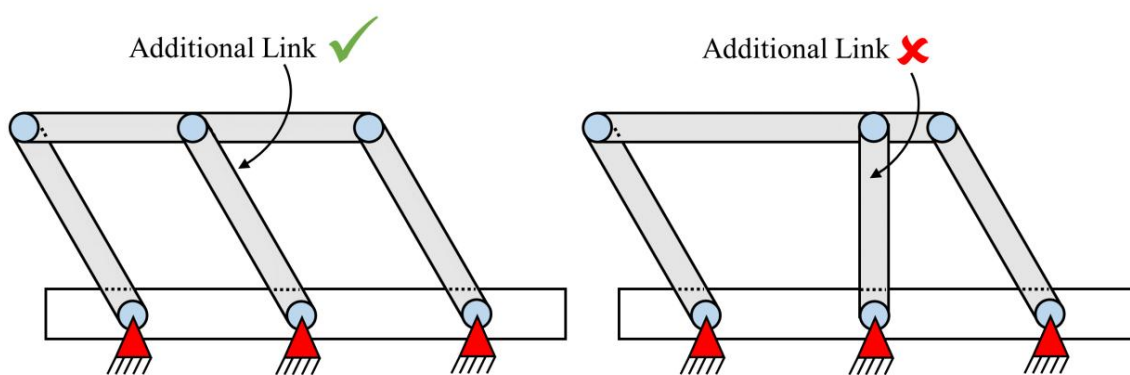


Рисунок 2. Мобильная связь (слева) может свободно перемещаться, а немобильная связь (справа) является неподвижной.

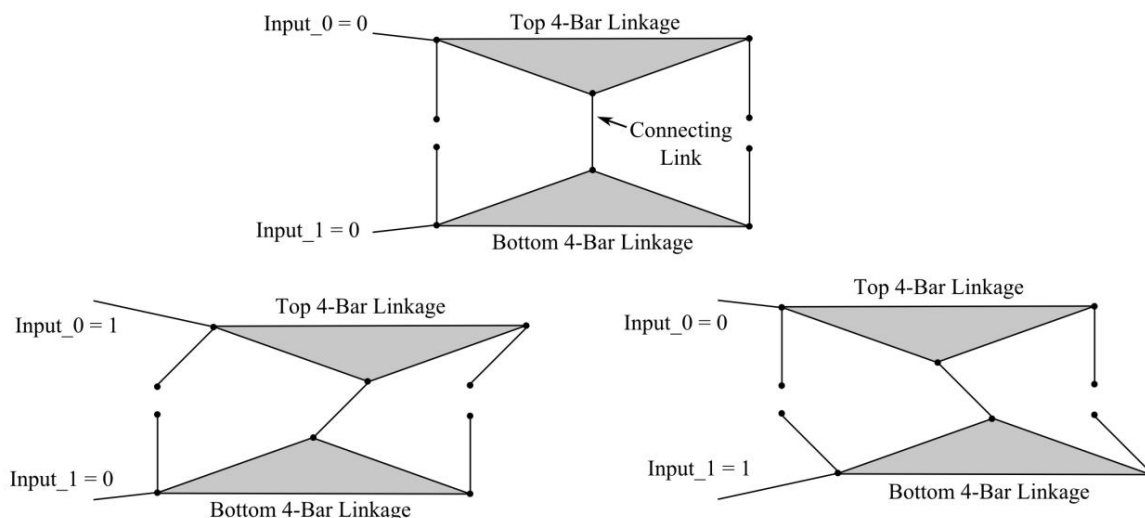


Рисунок 3: Замок в положении (0, 0) (вверху), замок в положении (1, 0) (внизу слева) и замок в положении (0, 1) (внизу справа). Положение (1, 1) запрещено геометрией рычага.

2. Вычисление только с двумя частями

Звенья представляют собой жесткие балочные конструкции. Поворотные соединения используются для соединения звеньев таким образом, чтобы обеспечить вращательное движение только в одной плоскости. Возможно, это противоречит здравому смыслу, но никакой механизм, подобный сцеплению, не требуется. Все части системы могут оставаться постоянно связанными и при этом обеспечивать всю необходимую комбинаторную и последовательную логику.

2.1 4-звенные соединения

Чтобы продемонстрировать, как этого можно достичь, мы начнем с простого, хорошо известного механизма — 4-стержневого механизма (также называемого 3-стержневым механизмом — 4-й стержень обеспечивается анкерным блоком или основанием и иногда игнорируется). 4-звенная рычажная система опирается только на звенья и поворотные соединения. 4-звенная рычажная связь может вращаться вокруг закрепленных поворотных соединений (обозначенных кружком с треугольником, тогда как незакрепленные поворотные соединения представляют собой просто круги), позволяя, например, конфигурации с «наклоном влево» поворачиваться в конфигурацию с «наклоном вправо». конфигурации (см. рисунок 1).

Обратите внимание: хотя рычажный механизм из 4 стержней может принимать множество положений, мы ориентируемся на использование двух различных положений. Это связано с тем, что две позиции могут использоваться для обозначения 0 и 1, что удобно при создании системы для двоичных вычислений. Фактический угол, пересекаемый звеньями при переходе, например, от левого наклона к правому, не является критическим. Как показано на диаграмме, он составляет примерно 45 градусов, но может быть больше или меньше, если конструкция обеспечивает надежное различие между двумя положениями; один представляет 0, а другой представляет 1.

Важно отметить, что в 4-звенной рычажной системе параллелограммного типа (то есть два боковых звена должны быть одинаковой длины), если к центру рычажной системы добавляется дополнительное звено, при условии, что длина и угол равны так же, как и боковые звенья, рычажный механизм по-прежнему будет вращаться вокруг закрепленных поворотных соединений. Однако если дополнительное звено не имеет такой же длины или не находится под тем же углом, что и другие звенья, механизм не будет двигаться (см. Рисунок 2). Это связано с тем, что дополнительное звено будет пытаться поворачиваться по другой дуге, чем боковые звенья. В результате боковые и центральные звенья пытаются переместить верхнее звено одновременно в двух разных направлениях.

Это приводит к застреванию или «блокировке» механизма. Такое поведение блокировки важно для создания «замков», одного из двух основных механизмов более высокого уровня, используемых описываемой нами системой (второй — «баланс»).

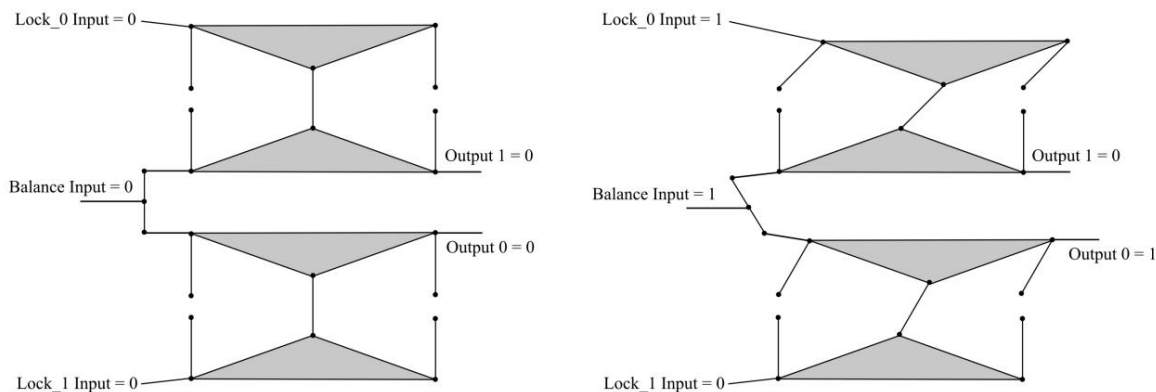


Рисунок 4: Весы, соединенные с двумя замками. Неактивная конфигурация показана слева. Справа был активирован вход 0, за которым последовала активация входа баланса, который, в свою очередь, активирует выход 0.

2.2 « Замок»

Замок представляет собой механизм, состоящий из двух 4-рычажных рычажков, соединенных в центре соединительным звеном (см. рисунок 3). Соединительное звено имеет ту же длину, что и два боковых звена каждой четырехзвенной рычажной системы, и в исходном положении параллельно всем четырем боковым звеньям.

В изображенной реализации соединительное звено прикреплено к двум дополнительным звеньям сверху и двум снизу, каждая пара которых образует жесткий треугольник с остальной частью соответствующего 4-звенного звена. Этот треугольный выступ позволяет соединительному звену иметь ту же длину, что и боковые звенья.

Если бы треугольный выступ отсутствовал и соединительное звено должно было соединяться непосредственно с горизонтальными звеньями четырехзвенных рычажных механизмов, оно не было бы такой же длины, как боковые звенья. Как уже упоминалось, это приведет к заклиниванию или блокировке 4-звеньевых рычагов. Чтобы функционировать по назначению, все вертикальные звенья должны иметь одинаковую длину и, по крайней мере, на начальном этапе, быть параллельными друг другу.

Очевидно, что связи не обязательно должны иметь две позиции: левую и правую. Скорее, для целей двоичных вычислений им просто нужно иметь две разные позиции, которые могут представлять 0 и 1. На рисунке 3 используется соглашение, согласно которому ввод 0 приводит к тому, что боковые ссылки становятся вертикальными, а ввод 1 заставляет их наклоняться. Направо.

Репрезентативные входы в виде линейных слайдов Вход0 и Вход1 были добавлены на рис. 3, чтобы показать направление срабатывания и место подключения входа. Предполагается, что имеется по одному входу на каждую 4-х рычажную тягу или по одному входу на верхнюю и нижнюю часть замка. В реальной системе входы блокировки будут подключены к другим частям системы (например, данным из памяти или тактовым сигналам). Линейные слайды не требуются.

Положение блокировки, изображенное слева на рисунке 3, будет называться положением (0,0), что относится к состоянию входов. В правой части рисунка 3 показано изображение состояния (1,0), где вход 0 был установлен в 1 и тем самым переместил соответствующую 4-стержневую связь в конфигурацию с наклоном вправо. Переворачивание фигуры вверх ногами будет представлять состояние (0,1).

Состояние (1,1) невозможно, и это ключевой аспект блокировки. Как только один из входов установлен на 1, одна сторона замка вращается вокруг обоих закрепленных вращающихся шарниров и соединительного звена. Важно отметить, что хотя соединительное звено никогда не меняет длину, оно меняет угол. Как показано на рисунке 3, как только замок перемещается в положение (1,0), соединительное звено все еще параллельно боковым звеньям верхнего 4-звенного рычага, но больше не параллельно боковым звеньям нижнего 4-звенного рычага.

В связи с требованием, чтобы при наличии третьего звена оно было той же длины и под тем же углом, что и боковые звенья, как только верхняя или нижняя 4-звенная тяга перемещается, другая не может; Закрыто. Именно по этой причине положение (1,1) невозможно. Как только замок переместился из (0,0) в (1,0) или (0,1), единственное возможное движение — вернуться в положение (0,0). Однажды вернувшись в

(0,0), любой вход может быть установлен на 1, но оба входа никогда не могут быть установлены на 1 одновременно.

Обратите внимание, что изгибы [13, 14] могут заменить вращающиеся соединения, позволяя замку (и другим конструкциям) быть монолитными, что потенциально упрощает производство с использованием, например, методов MEMS или NEMS [3, 4, 6, 7, 18]. , 20, 25]. Можно даже утверждать, что, используя изгибы, вся вычислительная система может быть в значительной степени монолитной, но поскольку это поднимает вопрос о том, что такое часть, для ясности мы будем использовать связи и вращающиеся соединения. Обратите внимание, что как изгибные, так и вращающиеся соединения могут быть весьма энергоэффективными, поскольку они в значительной степени избегают трения скольжения (что может иметь дополнительное преимущество в виде снижения износа [26]).

2.3 « Баланс»

Весы, названные так потому, что внешне они похожи на классические панорамные весы, подключают вход к звену, имеющему три вращающихся шарнира: по одному на каждом конце и один в центре. Вход подключен к центральному поворотному шарниру. Два концевых поворотных соединения соединены с другими конструкциями.

Чаше всего этими структурами являются замки. В результате при изменении входного сигнала баланса одно из боковых поворотных соединений остается неподвижным, а другое перемещается. Какая сторона неподвижна, а какая движется, можно определить путем ввода данных. Как это работает на практике, лучше всего проиллюстрировать на примере. На рисунке 4 изображены весы (зеленые), соединенные с двумя замками (синими и серыми). Хотя схематические изображения немного упрощены, будет очевидно, что каждый замок соответствует механизму замка, изображенному на рисунке 3.

Единственная разница между замками на рис. 4 и блокировкой на рис. 3 заключается в том, что на рис. 4 вместо двух отдельных входов каждая блокировка имеет один вход, специфичный для данной блокировки, а другой вход предоставляется косвенно блокировкой. баланс, который также имеет вход. Обратите внимание, что входные данные для балансов часто предоставляются системой часов. Как и в случае с обычными компьютерами, для описываемой вычислительной системы требуется многофазная система синхронизации. Предполагается, что такая система синхронизации присутствует; описание того, как реализовать такую систему, выходит за рамки данного документа, хотя при желании этого также можно достичь, используя только звенья и вращающиеся соединения.

Предполагается, что существуют два основных правила, управляющих механизмом, показанным на рисунке 4, и эти правила будут обеспечиваться всей системой; они не присущи изображенному механизму:

1. Либо вход Lock0 , либо вход Lock1 , но не оба, должны быть установлены на 1.
2. Входы блокировки и вход баланса должны устанавливаться последовательно, а не одновременно.

С учетом этих правил работа механизма происходит следующим образом. Каждый шаг можно рассматривать как отдельную фазу тактирования (что неявно обеспечивает соблюдение второго правила выше):

1. Механизм запускается со всеми входами, установленными на 0.
 - Это означает, что ни один замок не заперт.
2. Либо для входа Lock0 установлено значение 1, либо для входа Lock1 будет установлено значение 1.
 - Это приводит к блокировке одного из замков. •

Блокировка одного из замков ограничивает возможность перемещения стороны весов.
3. Вход весов установлен на 1.
 - Поскольку только одна сторона весов может свободно двигаться, входной сигнал баланса передается вниз. путь, по которому можно свободно двигаться.
 - Это создает выходной сигнал 1 либо на Выходе 0, либо на Выходе 1, в зависимости от того, какой замок вход был установлен на 1.

Это один из примеров реализации простой логики, которую можно использовать, например, для маршрутизации. данных, перенаправляя входные данные по тому или иному пути в зависимости от состояний Lock0 и Lock1.

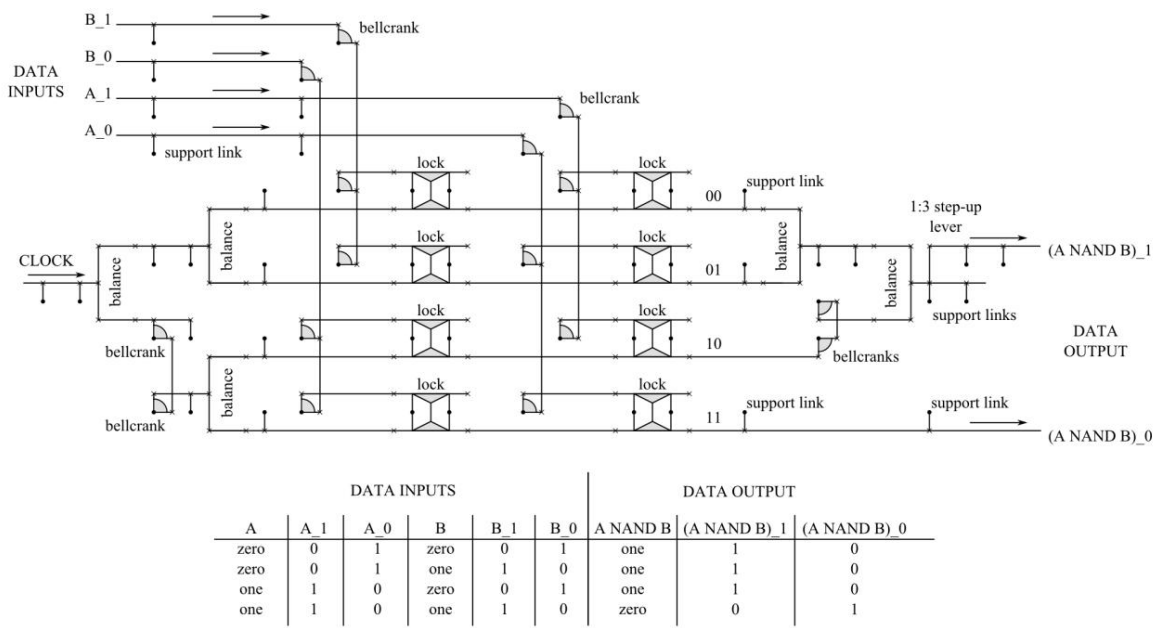


Рис. 5. Логический элемент NAND на основе баланса и блокировки, использующий схему ввода/вывода с двумя каналами на каждый бит.

Обратите внимание, что эта простая логика и условная маршрутизация были реализованы с использованием только звеньев и вращающихся соединений, которые всегда прочно соединены. Никакие шестерни, муфты, переключатели, пружины или какие-либо другие механизмы не требуются (имейте в виду, что показанные входные механизмы являются репрезентативными; реальная система не требует линейных направляющих).

3 Универсальная комбинаторная логика

Хотя предыдущий пример можно рассматривать как выполнение простой логики, он, возможно, более полезен для маршрутизации данных. Механизм на рисунке 4 не может обеспечить всю логику, необходимую для полноценной вычислительной системы. Однако можно создать всю необходимую логику, используя только блокировки и противовесы (а также несколько дополнительных связей и вращающихся соединений для маршрутизации и/или копирования данных).

Любой традиционный логический элемент с двумя входами, включая И, НЕ-И, ИЛИ, НЕ, ИЛИ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ и ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, может быть создан непосредственно из соответствующей комбинации блокировок и балансов. Хотя большинство этих вентилей проиллюстрировано в Приложении, нет необходимости подробно рассматривать каждый из них, чтобы доказать, что универсальную логику можно создать с помощью связей и вращающихся соединений. Это связано с тем, что хорошо известно, что одного И-И достаточно для создания всей необходимой комбинаторной логики (т.е. вся остальная логика может быть создана из комбинаций вентилей И-НЕ [8]). Таким образом, в качестве доказательства того факта, что звеньев и вращающихся соединений достаточно для создания комбинаторной логики, необходимой для полной по Тьюрингу вычислительной системы, на рисунке 5 показано, как можно реализовать вентиль И-НЕ. (Обратите внимание, что реверсивные ворота также могут быть созданы с использованием только звеньев и поворотных соединений, а в Приложении также показан вентиль Фредкина).

Хотя вентиль И-НЕ существенно сложнее предыдущего примера, он функционирует по тому же принципу использования блокировок и противовесов для реализации логики. В этом примере набор входов подключен к набору замков. Входы определяют, какая сторона каждого замка заперта. Другой вход (в данном примере тактовый сигнал) затем используется для приведения в действие основного баланса, движение которого каскадно осуществляется через ряд дополнительных балансов и замков. Каждый баланс перемещает либо свою верхнюю, либо нижнюю сторону в зависимости от состояния замков, к которым он подключен. Это приводит к тому, что при окончательной блокировке вывода верхняя или нижняя половина перемещается вперед.

На рисунке 5 концептуально имеются два двоичных входа, A и B, и один двоичный выход, X. Физическая модель, используемая для входов и выходов, заключается в том, что один 1-битный вход или выход разбивается на

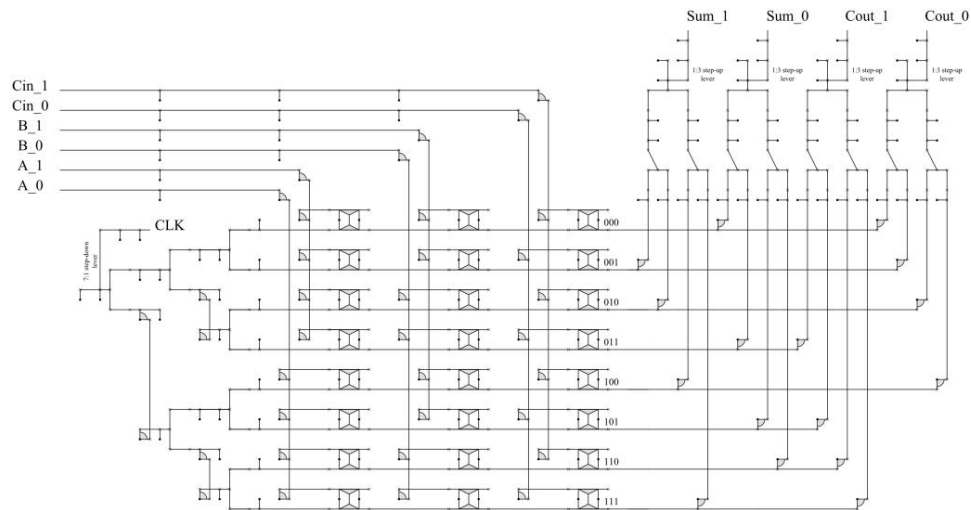


Рисунок 6: 1-битный полный сумматор, выполняющий логическую операцию, описанную на рисунке 7. Таблица схематических символов, используемых на этом рисунке, представлена в Приложении (рисунок 25).

| INPUTS | | | OUTPUTS | |
|--------|---|----------|---------|-----------|
| A | B | Carry In | Sum | Carry Out |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Рисунок 7: Логическая таблица для 1-битного полного сумматора, показанного на рисунке 6.

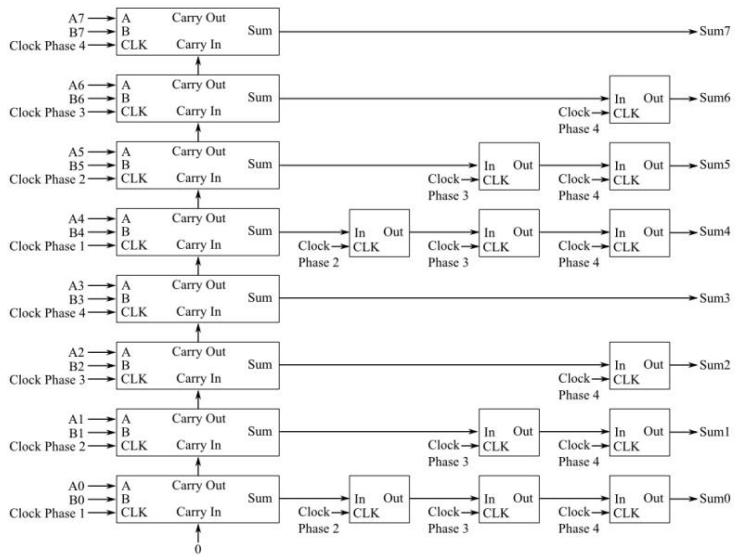


Рисунок 8: Восемь 1-битных полных сумматоров (широкие блоки) каскадно соединены с использованием пульсирующего переноса. Как описано в разделе 4.2, несколько блоков могут быть объединены в каскад с использованием многофазного тактового сигнала. На этом рисунке используются четырехфазные часы. Узкие блоки содержат ячейки регистра сдвига, которые используются для формирования линии задержки, в которой сохраняются части результатов во время вычислений. Окончательный результат появляется на выходах (справа) после двух полных тактов.

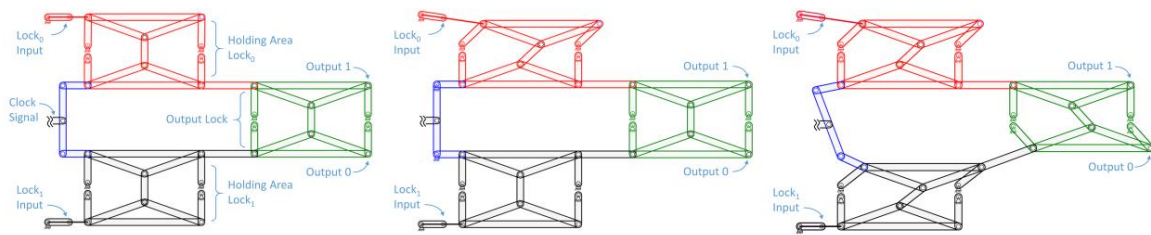


Рисунок 9: Слева: ячейка сдвигового регистра в пустом состоянии (0,0); В центре: ячейка регистра сдвига со входом (1,0) до срабатывания часов; Справа: ячейка сдвигового регистра со входом (1,0) после срабатывания тактового сигнала.

два отдельных входных или выходных канала (мы будем называть это « системой с двумя входами»). Например, вход А состоит из входов A0 и A1. Если значение А должно быть установлено на 0, вход A0 перемещается. Если значение А должно быть установлено равным 1, вход A1 перемещается. A0 и A1 не могут перемещаться одновременно (что логически очевидно, поскольку значение не может быть установлено в 0 и 1 одновременно).

То же самое относится к входу В и выходу Х.

Обратите внимание, что каждый вход используется дважды для реализации желаемой логики, поэтому каждый вход представлен на диаграмме дважды. Хотя дублирование входных данных таким способом удобно для создания диаграмм, в реальной системе достаточно просто использовать структуру соединения и вращающегося соединения, которая разветвляет входную линию, эффективно копируя данные в несколько мест по мере необходимости. Не должно быть фактических дублирующих входных данных. Пример см. в Приложении, где клапан Фредкина иллюстрирует один из способов разветвления данных с использованием 4-стержневых связей. Кроме того, для наглядности схемы геометрия звеньев, соединяющих замки и противовесы, не является оптимальной в реальной системе, а скорее используется прямые, непересекающиеся линии. Хотя это и сложно, выходные данные, которые будут получены в результате любого допустимого набора входных данных, можно получить, отслеживая, какая сторона каждого замка блокируется, а какая сторона балансов перемещается. Видно, что таблица истинности на рисунке 5 повторяет то, что ожидалось от клапана И-НЕ.

Обратите внимание, что рисунок 5 — это всего лишь один пример, используемый в качестве доказательства из-за хорошо известной универсальной природы NAND. Использование нескольких клапанов И-НЕ для создания других логических функций не всегда может быть эффективным, и, как упоминалось ранее, мы также показали, что любой из стандартных логических клапанов с двумя входами может быть реализован непосредственно с использованием блокировок и противовесов (см. Приложение).

Пример более сложной логической функции показан на рисунке 6. Это устройство выполняет сложение с переносом одного бита (рисунок 7). Эти устройства могут быть объединены каскадом для выполнения сложения более чем одного бита, как показано на рисунке 8.

4 Последовательная логика

Показав, что всю необходимую комбинаторную логику можно создать, используя только звенья и поворотные соединения (собранные в замки и противовесы), мы переходим к последовательной логике. Выходы клапана И-НЕ, изображенного на рисунке 5, зависят исключительно от токовых входов. Такой механизм не обеспечивает возможности сохранения предыдущих входных данных или результатов предыдущих логических операций, поскольку выходные данные возвращаются в ноль, когда входные данные и тактовый сигнал возвращаются к нулю; он не предоставляет никаких средств для создания памяти. Чтобы продемонстрировать создание простого механизма памяти, мы опишем конструкцию небольшого сдвигового регистра, снова используя только звенья и поворотные соединения.

Сдвиговый регистр можно построить путем объединения блокировок и противовесов для создания ячеек, которые являются логическим эквивалентом электронных триггеров. Каждая ячейка сдвигового регистра связана со своим соседом, полагаясь на предыдущую или последующую фазу тактового сигнала, в зависимости от ситуации. Это позволяет копировать и сдвигать данные через сдвиговый регистр, а не детерминированно устанавливать содержимое всего сдвигового регистра одновременно.

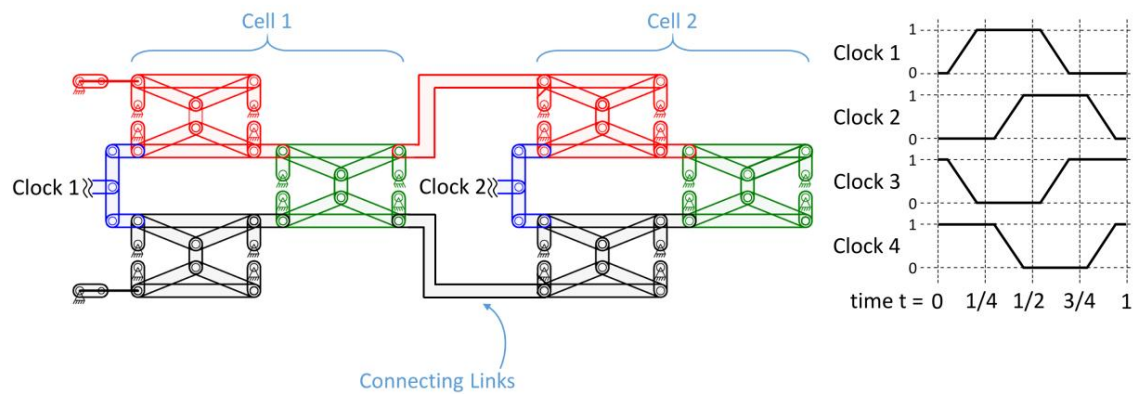


Рисунок 10: Двухъячеечный сдвиговый регистр (слева) с графиком четырехфазного тактового цикла (справа). В этом примере тактовый сигнал ячейки 1 управляется тактовым сигналом 1, а тактовый сигнал ячейки 2 управляется тактовым сигналом 2.

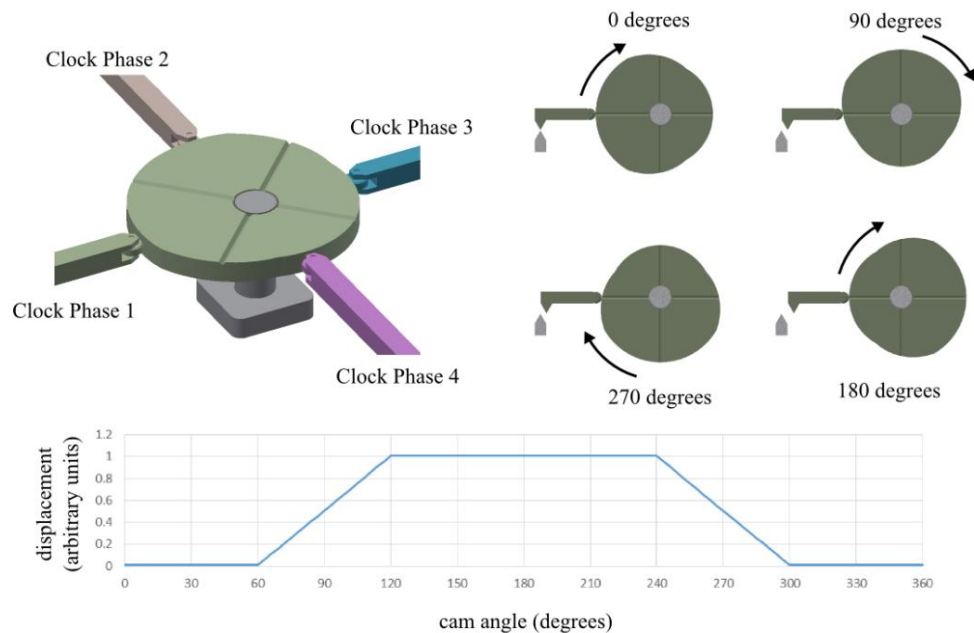


Рис. 11. Подходящий многофазный тактовый сигнал можно сгенерировать механически с помощью кулачков и толкателей. Здесь четырехфазный тактовый сигнал генерируется с использованием четырех одинаковых кулачков, расположенных со сдвигом по фазе на 90 градусов. Четыре диаграммы в правом верхнем углу показывают кулачок при четырех оборотах только с одним из четырех звеньев. Совокупность всех четырех сигналов показана в правой части рисунка 10.

4.1 Ячейка сдвигового регистра

В левой части рисунка 9 изображена одна ячейка сдвигового регистра со входом (0,0), или то, что можно назвать пустым состоянием. При использовании системы с двумя входами два других возможных входа состоят из нуля, представленного как (1,0), и одного, представленного как (0,1). Состояние (1,1) обычно не используется, поскольку оно не позволяет ни одной из сторон весов двигаться. Обратите внимание, что пустое состояние имеет противоположную проблему: обе стороны весов могут двигаться. Однако тактовый сигнал не будет переведен в 1, пока замки находятся в пустом состоянии, так что это не является практической проблемой.

Прежде чем углубляться в фактическое использование ячеек сдвигового регистра, необходимо дать краткое описание основных частей ячейки. Во-первых, примечательно, что левая часть ячейки идентична рис. 4 и состоит из весов, соединенных с верхним замком (блокировка зоны ожидания0) и нижним замком (блокировка зоны ожидания1). Баланс приводится в действие тактовым сигналом, опять же, как на рисунке 4. Единственным отличием является добавление дополнительного замка, Output Lock, который подключается к выходам левой стороны механизма и, в свою очередь, обеспечивает окончательное выход для ячейки. Самый простой способ визуализировать, как работает клетка, — пошагово выполнить ее движения.

Начиная с пустого состояния, устанавливается вход. Поскольку этот механизм использует систему с двумя входами, либо вход Lock0 устанавливается на 1, либо вход Lock1 устанавливается на один, но не то и другое. Если предположить, что Lock0 установлен в 1, движение приведет к тому, что механизм окажется в состоянии, изображенном в центре рисунка 9.

В центре рисунка 9 у элемента Hold Area Lock0 сдвинута верхняя часть. В результате нижняя часть замка запирается. Однако, поскольку сдвиговые регистры зависят от многофазной синхронизации, обратите внимание, что входной сигнал Lock0 еще не оказал никакого влияния на блокировку выхода. Чтобы это произошло, необходимо активировать баланс, чего не происходит до следующей фазы тактирования.

Во время следующей тактовой фазы активируется баланс (в данном случае устанавливается от 0 до 1). Поскольку Lock0 заблокировал свою нижнюю половину, которая соединена с верхней стороной весов, при срабатывании весы могут сдвинуть только свою нижнюю сторону. Это движение распространяется на выходную блокировку, что приводит к состоянию, изображенному в правой части рисунка 9.

Причина, по которой две левые блокировки называются блокировками области хранения, теперь может быть очевидна: они временно удерживают входные данные до срабатывания часов. Ввод в эти блокировки не приводит мгновенно к выводу в Выходной замок. Вместо этого сначала должны сработать часы, что приводит к копированию значения, будь то 0 или 1, из блокировок области хранения в блокировку выхода. Обратите внимание, что мы принимаем соглашение, согласно которому в отношении входных блокировок верхняя блокировка связана с входным значением 0, тогда как для выходной блокировки верхняя половина связана с выходным значением 1. Это связано с тем, что из-за того, как механизм показан на схеме: когда вход 1 установлен в верхней входной блокировке, выход 1 оказывается в нижней половине выходной блокировки, и наоборот. Механизм можно легко изменить, чтобы изменить это, но, как он представлен в настоящее время, с точки зрения именования проще всего иметь входной результат 0 в выходном 0, а результат входного сигнала 1 в выходном 1.

До сих пор нам нужны были только две фазы тактирования: на первой фазе устанавливаются входы, а на второй фазе срабатывает баланс и входы копируются из удерживающих замков в выходную блокировку. Однако в реальной системе будут использоваться дополнительные фазы. В последующих примерах предполагается четырехфазная синхронизация.

4.2 Соединение ячеек

На рисунке 10 изображен сдвиговый регистр с двумя ячейками, чтобы проиллюстрировать, как две ячейки будут соединены, и объяснить, как данные будут перемещаться из одной ячейки в другую. На этом рисунке ячейка 1 и ячейка 2 эквивалентны механизму, изображенному на рисунке 9. Обе ячейки имеют соединение с тактовым сигналом (изображенным как частичная связь, указывающая на соединение с системой синхронизации, которая не показана). Соединительные звенья соединяют выход ячейки 1 с входами ячейки 2.

Работа одной ячейки уже была описана. Теперь демонстрация того, как ячейка 1 передает данные в ячейку 2, проиллюстрирует функцию минимального сдвигового регистра. Последовательность событий следующая:

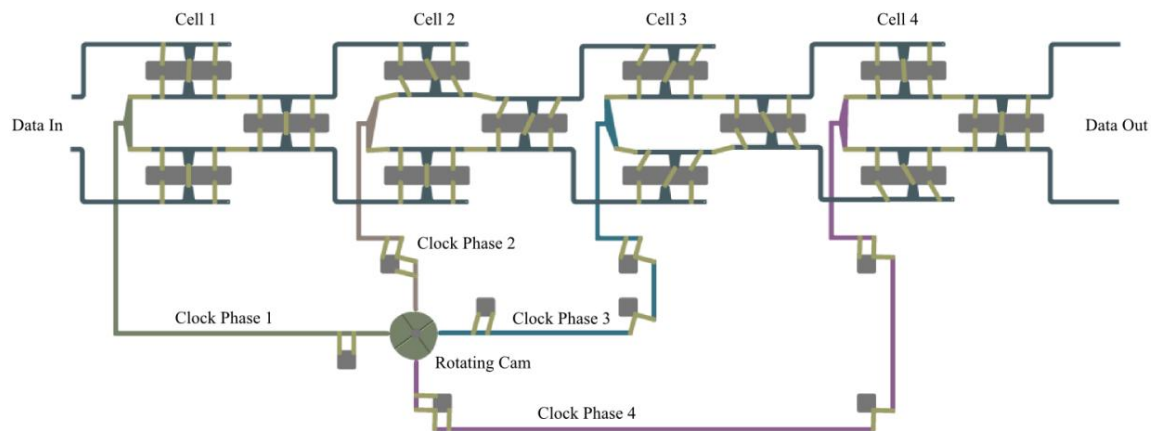


Рисунок 12: 4-ячеечный сдвиговый регистр, управляемый четырехфазным тактовым сигналом, показанный в момент времени $t = 3/4$. Последние три ячейки установлены в состояние 1, а первая ячейка — в пустое состояние. Анимация этого механизма доступна на [http://www.merkle.com/images/4 регистре фазового сдвига v4.gif](http://www.merkle.com/images/4%20регистре%20фазового%20сдвига%20v4.gif) и [http://www.merkle.com/images/4 регистре фазового сдвига v4verse.gif](http://www.merkle.com/images/4%20регистре%20фазового%20сдвига%20v4verse.gif).

1. В момент времени $t = 0$ тактовый вход для ячейки 1 был установлен на 0, а входы данных были установлены для ячейки 1.
 - Блокируется либо верхняя, либо нижняя блокировка ячейки 1, в зависимости от того, какой вход установлен на 1.
2. Во время перехода от $t = 0$ к $t = 1/4$ тактовый сигнал для ячейки 1 устанавливается на 1.
 - Это приводит к перемещению разблокированной стороны баланса Ячейки 1, что, в свою очередь, перемещает верхнюю (если входное значение было 1) или нижнюю (если входное значение было 0) половину выходной блокировки. • Замок выхода ячейки 1, в свою очередь, перемещает соответствующее соединительное звено, блокируя один из замков зоны ожидания ячейки 2. Это фактически скопировало данные из выходного замка ячейки 1 в один из замков зоны хранения ячейки 2.
 - Обратите внимание, что блокировка выхода ячейки 2 все еще не сдвинулась.
3. Во время перехода от $t = 1/4$ к $t = 1/2$ тактовый сигнал для ячейки 2 устанавливается на 1.
 - При этом данные из замков области хранения Ячейки 2 копируются в замки вывода Ячейки 2.
4. При переходе от $t = 1/2$ к $t = 3/4$ часы для Ячейки 1 сбрасываются в 0.
 - В результате блокировка выхода Ячейки 1 и, следовательно, соединительные звенья с Ячейкой 2 возвращаются в положение 0 (независимо от значений, все еще хранящихся в ячейках области хранения Ячейки 1).
5. При переходе от $t = 3/4$ к $t = 1$ часы для Ячейки 2 сбрасываются в 0.

Затем этот цикл повторяется по мере ввода новых данных в ячейку 1. На шаге 2 выше отмечается, что выходная блокировка ячейки 2 все еще не сдвинулась. Такое поведение позволяет ячейкам сдвигового регистра хранить предыдущие данные. В этом ключевое различие между комбинаторной и последовательной логикой. Состояние вентиля И-НЕ, описанное ранее, полностью определяется текущими данными и тактовыми входами. Однако это не относится к регистрам сдвига. Например, сдвиговый регистр с четырьмя ячейками, управляемый четырехфазным тактовым сигналом, способен хранить один бит. Одна из четырех фаз тактирования всегда будет активна для одной из четырех ячеек, и, таким образом, одна из четырех ячеек будет содержать информацию. В сочетании с логикой переходов для обработки ввода и разрешения записи это позволяет механизму действовать как механический аналог электронного триггера, тем самым формируя основу для хранения данных в памяти (см. также рисунок 14).

Чтобы наглядно представить, как работает этот механизм, на рисунке 12 изображен сдвиговый регистр с 4 ячейками, а анимированная версия доступна в Интернете.

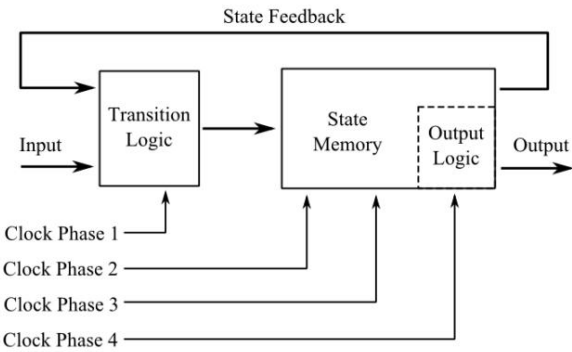


Рисунок 13: Блок-схема типовой машины Мура, адаптированной для четырехфазных часов. Память состояний реализована в виде цепочки ячеек сдвигового регистра, аналогичной показанной на рисунке 12 и рисунке 8.

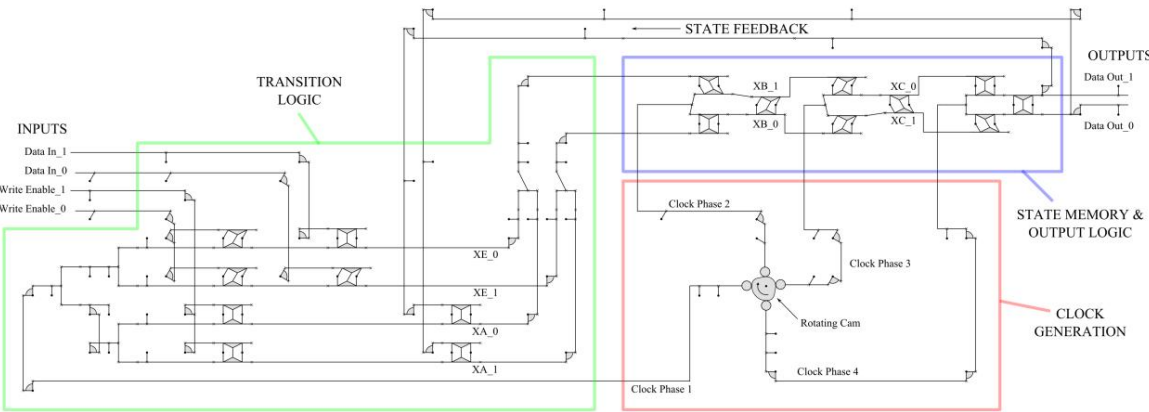


Рисунок 14: Простой конечный автомат. Основные компоненты выделены для сравнения с рисунком 13. Этот конечный автомат реализует таблицу переходов, показанную на рисунке 15. Таблица схематических символов, используемых на этом рисунке, приведена в Приложении (рис. 25).

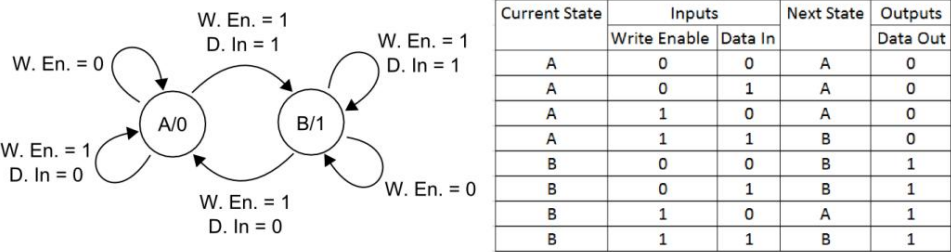


Рисунок 15: Диаграмма перехода состояний и таблица для простого конечного автомата, показанного на рисунке 14.

4.3 Источник питания и тактовая генерация

Тактовый сигнал по существу функционирует как синхронизированный источник питания, мало чем отличающийся от трехфазной электроэнергии, используемой в электрических сетях. Пример многофазного тактового сигнала показан на рисунке 10. Амплитуда и форма тактового сигнала в некоторой степени произвольны при условии, что

1. Между соседними тактовыми фазами имеется достаточное перекрытие, когда они активны: должно быть время, когда две соседние фазы тактирования активны.
2. Время выдержки достаточное: должен пройти период времени, в течение которого фаза тактирования полностью отключается. инактивирован.

Существует множество способов генерации подходящего многофазного тактового сигнала, как чисто механически, так и другими способами. Примеры включают, помимо прочего, кулачки и толкатели (см. Рисунок 11, Рисунок 12 и Рисунок 14); механизмы пребывания на основе связей; устройства на основе коленчатых валов, пружин и механических упоров; и гребенчатые приводы MEMS с электроприводом.

4.4. Конечные автоматы

Комбинаторную и последовательную логику можно комбинировать для создания конечных автоматов. Блок-схема типовой машины Мура, адаптированной для четырехфазных часов, показана на рисунке 13. Логика перехода реализуется с использованием метода, описанного в разделе 3. Память состояний реализуется с использованием цепочки ячеек сдвигового регистра, как описано в разделе 4.2. Подробный пример конечного автомата показан на рисунке 14. Этот автомат функционирует по существу как однобитовая память, как описано в таблице переходов состояний на рисунке 15.

4.5 Память высокой плотности

Конечный автомат на рисунке 14 во многом эквивалентен D-триггеру — он сохраняет один бит информации за каждый такт. Эта схема подходит для использования в конечных автоматах, но она не является эффективным использованием вентиля для приложений с памятью высокой плотности. Несмотря на то, что механизм, показанный на рисунке 16, отличается от схемы «только ссылки и опорные точки», он использует гораздо меньше вентиля для хранения небольшого количества информации. Компромисс заключается в том, что процесс чтения/записи несколько медленнее и сложнее.

4.6 Обратимость

Внимательное рассмотрение цепочки сдвиговых регистров на рисунке 12 показывает, что если механизм генерации тактовых импульсов работает в обратном направлении, информация будет распространяться по цепочке в обратном направлении, от выходов ко входам. Это характерная и намеренная особенность логической архитектуры механической связи. Хорошо известно, что обратимые компьютеры могут быть построены на основе обратимых логических элементов, таких как элемент Фредкина [1]. На рисунке 17 показано, как физически обратимые вентили Фредкина могут быть построены из звеньев и вращающихся соединений (логическая таблица на рисунке 18). Обратимость можно использовать для создания компьютеров с чрезвычайно низким энергопотреблением. Это потенциальное применение обсуждается далее в разделе 5.4.

5 Реализации и приложения

Механические компьютеры имеют потенциальные применения на мезо-, микро- и нано-масштабах. Приложения на мезо- и микромасштабе включают такие разрозненные области, как мягкая робототехника [14,21] и отказоустойчивые устройства, устойчивые к радиации и электромагнитным помехам [19]. Механические компьютеры, построенные из наноконструкций, потенциально могут рассеивать гораздо меньше энергии, чем обычные устройства CMOS, обеспечивая при этом сопоставимую вычислительную производительность. Производство в таких небольших масштабах является сложной задачей. Архитектура, описанная в этой статье, состоящая в основном из звеньев и вращающихся соединений,

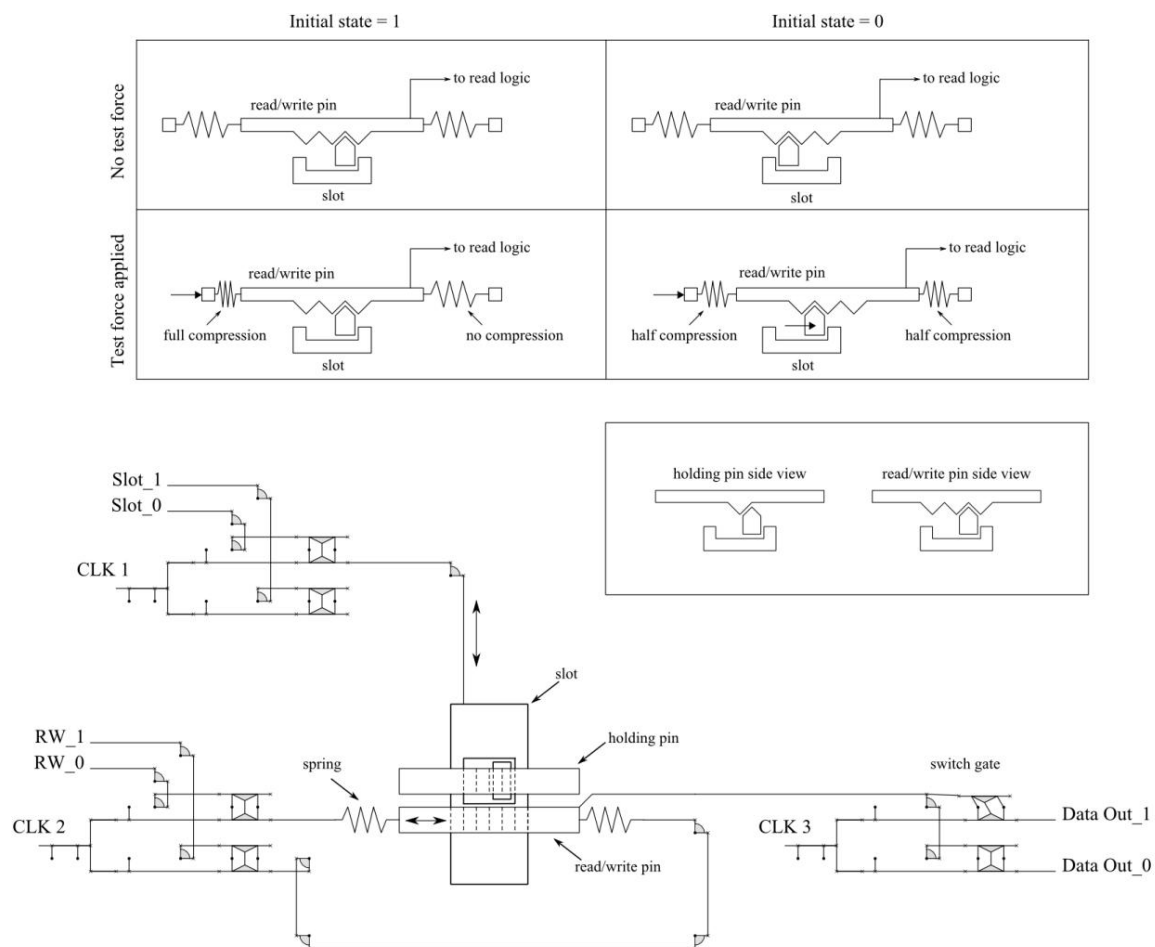


Рис. 16. Логическая схема для операций чтения и записи в ячейке памяти высокой плотности.

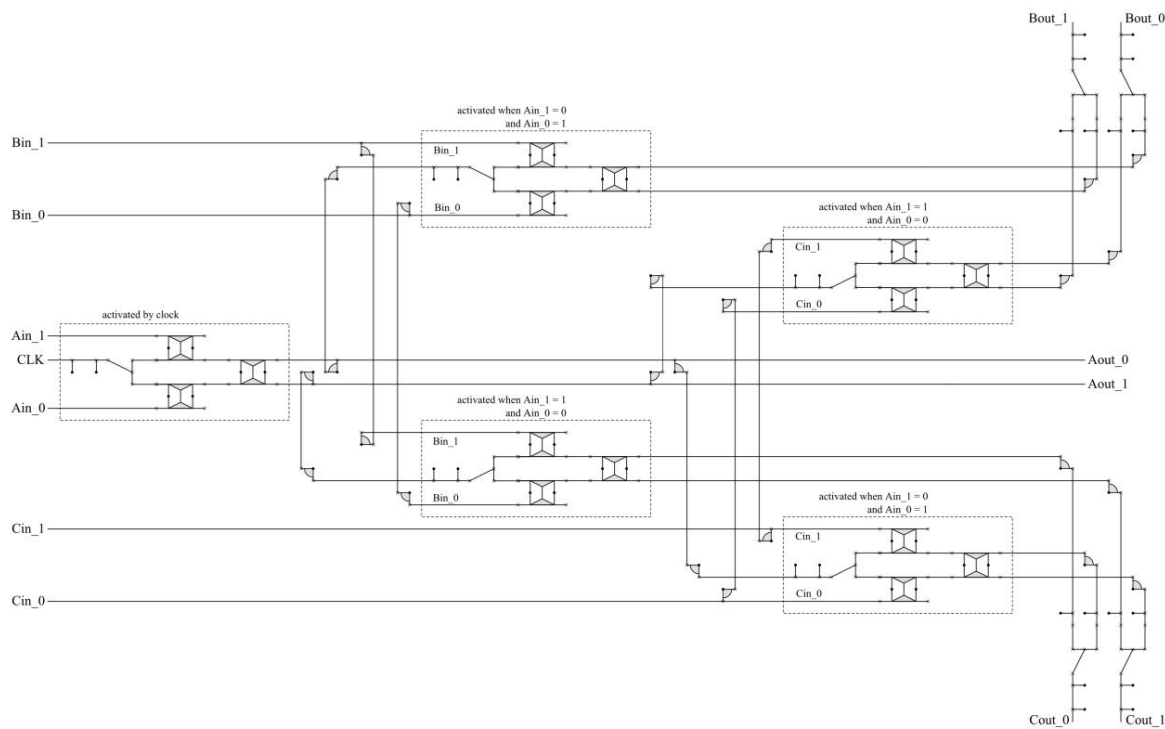


Рис. 17. Гейт Фредкина (CSWAP) на основе баланса и блокировки, использующий схему ввода/вывода с двумя каналами на каждый бит и дублированные входы для наглядности. Этот механический логический элемент логически и физически обратим. Реализованная логическая таблица показана на рисунке 18.

| INPUTS | | | | | | OUTPUTS | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ain_1 | Ain_0 | Bin_1 | Bin_0 | Cin_1 | Cin_0 | Aout_1 | Aout_0 | Bout_1 | Bout_0 | Cout_1 | Cout_0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |

Рисунок 18: Логическая таблица для обратимого вентиля Фредкина (CSWAP) (см. Рисунок 17). Одинаковые части таблицы выделены тем же цветом, что и ориентир для глаз.

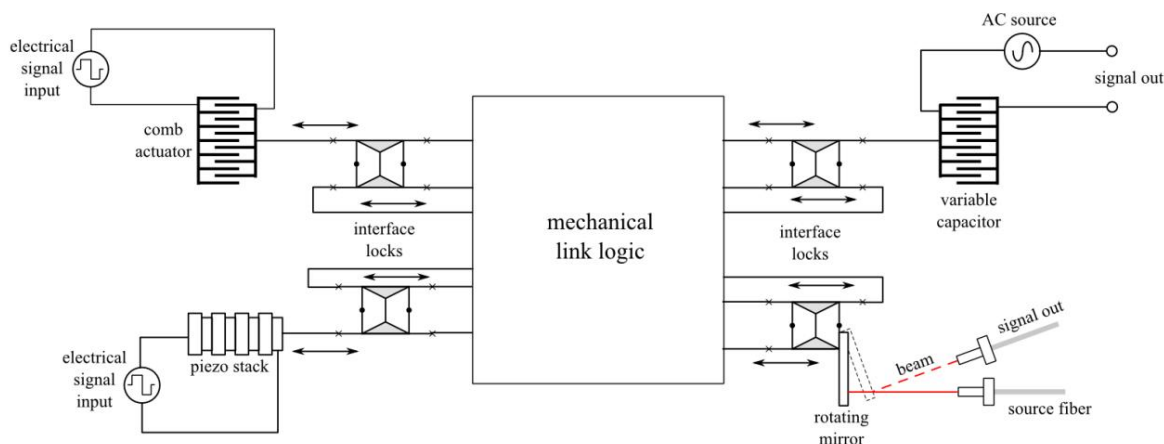


Рисунок 19: Слева показаны две концепции ввода сигналов в механический компьютер; две концепции вывода сигналов показаны справа.

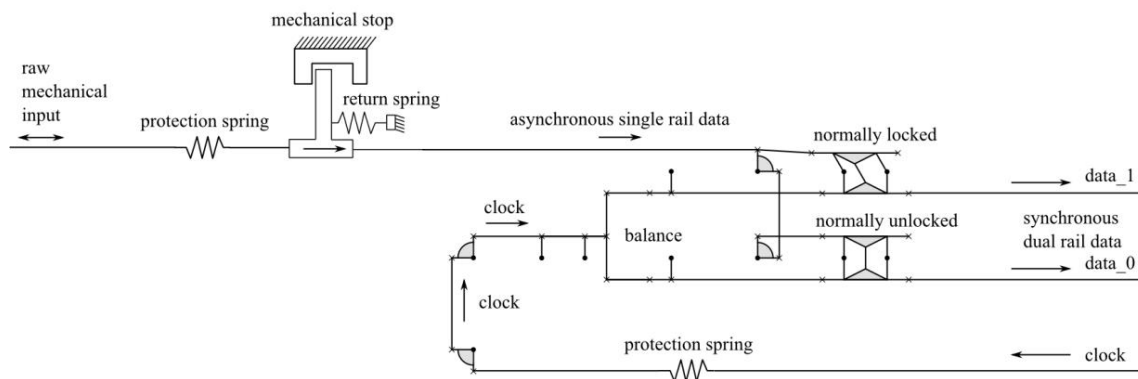


Рис. 20. Асинхронные, зашумленные сигналы (например, от механического датчика) можно подготовить так, чтобы их могли обрабатывать синхронные двухрельсовые механические логические элементы.

может хорошо подойти для таких размеров, поскольку не требует изготовления большого набора сложных компонентов. В частности, молекулярная версия этой архитектуры может использовать жесткие нанотрубки с ковалентными связями для связей и одинарные связи для соединений.

5.1 Ввод и вывод

Во многих потенциальных приложениях, где механический компьютер сконструирован с учетом его особых преимуществ (низкое рассеяние энергии, радиационная стойкость и т. д.), все же может потребоваться сопряжение механических элементов с обычными электронными устройствами. Рисунок 19 иллюстрирует ряд концепций передачи информации в механическое вычислительное устройство и из него. Вверху слева обычный электростатический гребенчатый привод MEMS используется для перемещения (предположительно очень маленьких) механических входных звеньев. В левом нижнем углу входные звенья перемещаются с помощью пьезоэлектрического привода. В правом верхнем углу механические звенья используются для перемещения переменного конденсатора MEMS, значение которого считывается обычной электроникой. В левом нижнем углу показана оптико-механическая схема, в которой выходные звенья перемещают зеркало для модуляции оптического сигнала, подключенного к стандартным оптоэлектронным компонентам.

Типичные входные сигналы будут шумными и асинхронными, с амплитудой, превышающей допустимый диапазон движения логических элементов. Эти сигналы можно обусловить с помощью механизмов, подобных показанному на рисунке 20.

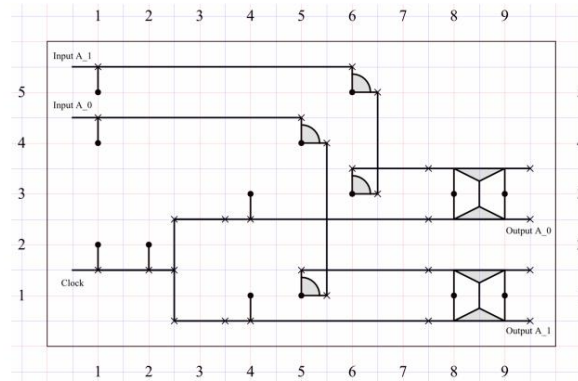


Рис. 21. Схематичное расположение простого тестового механизма, содержащего баланс, два замка и механизмы маршрутизации сигналов.

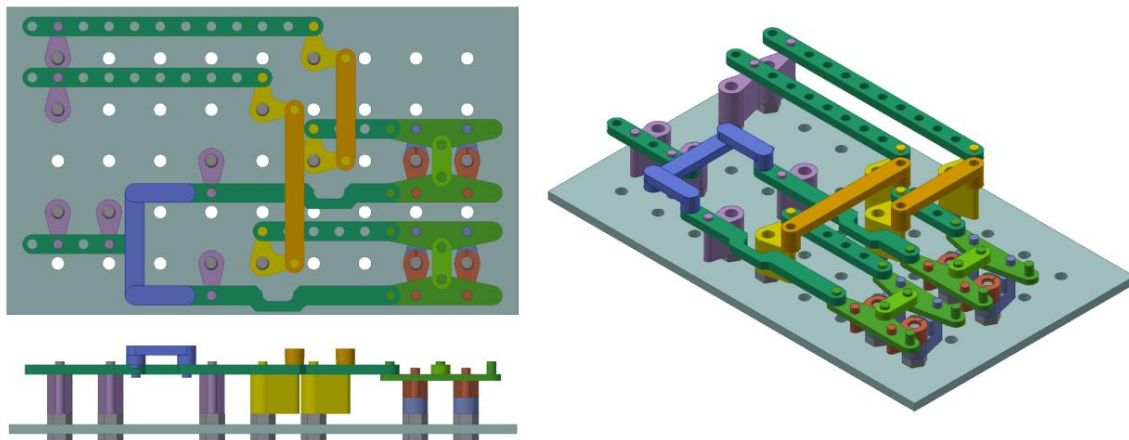


Рисунок 22: CAD-модель тестовой системы, показанной на рисунке 21, реализованная с помощью 3D-печатных компонентов, собранных на болтах толщиной четверть дюйма, установленных в стандартной перфорированной панели. Это простой и недорогой метод тестирования и демонстрации логических устройств с механической связью.

5.2 Макроскопические компоненты

Простой вариант создания макромасштабных логических устройств с механической связью показан на рисунках 21 и 22. В качестве основы используется стандартный материал перфорированной панели с центрами 0,25 дюйма на 1,0 дюйма. В качестве шарниров служат стандартные болты 1/4-20, а остальные звенья и замки изготовлены с помощью 3D-печати. Хотя это эффективный метод для быстрой демонстрации и образовательных целей, он вряд ли найдет практическое применение за пределами этих нишевых приложений.

5.3 Проекты на основе изгибов

Гибкие соединения представляют собой альтернативную реализацию с общими характеристиками, аналогичными шарнирам. Преимущество изгибов заключается в том, что во многих случаях, особенно при использовании МЭМС, их легче изготовить и зачастую они более надежны, чем полностью функциональные шарнирные соединения. Концептуальный проект логической системы механических звеньев на основе изгиба показан на рисунке 23. Систематический метод проектирования позволяет реализовать все необходимые замки, противовесы, коленчатые рычаги, опорные звенья и звенья передачи всего в двух слоях материала. Эти слои показаны оранжевым и синим цветом на рисунке 23. Точечная сварка или жесткое соединение между слоями, часто используемое в микросхемах MEMS, удерживает слои вместе в точках сетки. Каждый слой представляет собой монолитный чистый 2D-шаблон, что делает этот подход хорошо подходящим для

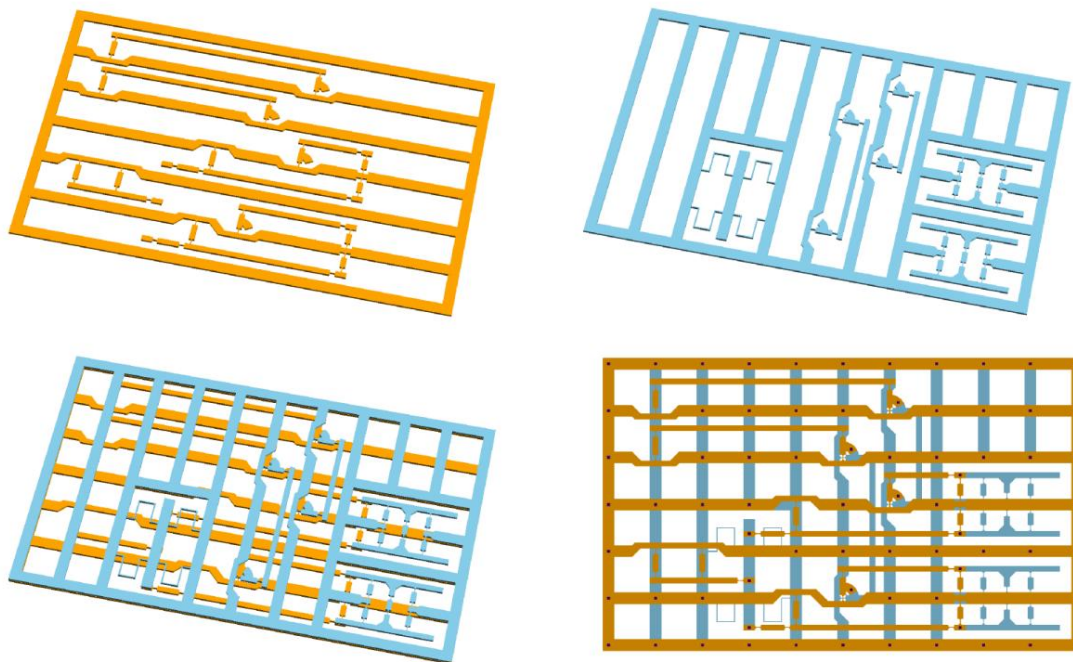


Рисунок 23: Реализация системы, основанная на изгибе, показанная на рисунке 21, состоящая из двух или трех сложенных друг на друга слоев (можно добавить второй оранжевый слой, чтобы создать оранжево-синие-оранжевый узел для повышения жесткости). Межслойные связи показаны темно-синими точками на нижнем правом изображении.

традиционные методы микрообработки, такие как LIGA, микрообработка кремния или аддитивное производство с высоким разрешением.

5.4 Производство атомарной точности

В последнее время наблюдается некоторое возрождение интереса [9, 15, 24] к молекулярным машинам, созданным методом атомарно точного производства [5]. Помимо предельной миниатюризации, молекулярные машины будут обладать преимуществами очень низкого трения и нулевого износа. Механические компьютеры, построенные из компонентов атомарной точности молекулярного масштаба, были бы весьма желательны из-за их потенциала в сочетании высокой производительности и низкого рассеяния энергии.

5.4.1. Перетаскивание молекулярных вращающихся соединений

Ключевым показателем производительности компьютеров является их рассеивание энергии. Одним из факторов рассеяния является трение во вращающихся соединениях каждого логического элемента. Из-за небольшого сопротивления трения суставов построенные из них механические компьютеры в принципе могут рассеивать на порядки меньше энергии, чем обычные полупроводниковые компьютеры, при этом работая при этом на относительно высоких скоростях.

Например, на рисунке 24 показан замок, содержащий склеенные вращающиеся соединения [17]. При работе этого замка происходит вращение суставов на величину до $\theta = 1$ рад. Модельная система, проанализированная в [11], представляет собой фрагмент связей и соединений, показанных крупным планом справа на рисунке 24. Из [11, уравнение. 2], при этом вращении при работе на частоте $f = 100$ МГц рассеивается около $2,4 \times 10^{-27}$ Дж на одно вращающееся соединение. Работа полного замка, включающего несколько соединений, потребует примерно на порядок больше затрат. Эта диссипация на несколько порядков меньше, чем $kBT = 4,1 \times 10^{-21}$ Дж при $T = 300$ К. Таким образом, при этой рабочей скорости диссипация трения ротора на одну логическую операцию будет намного ниже kBT .

Чтобы полностью использовать низкую рассеиваемую мощность ротора для компьютера, необходимо избегать других источников рассеяния.

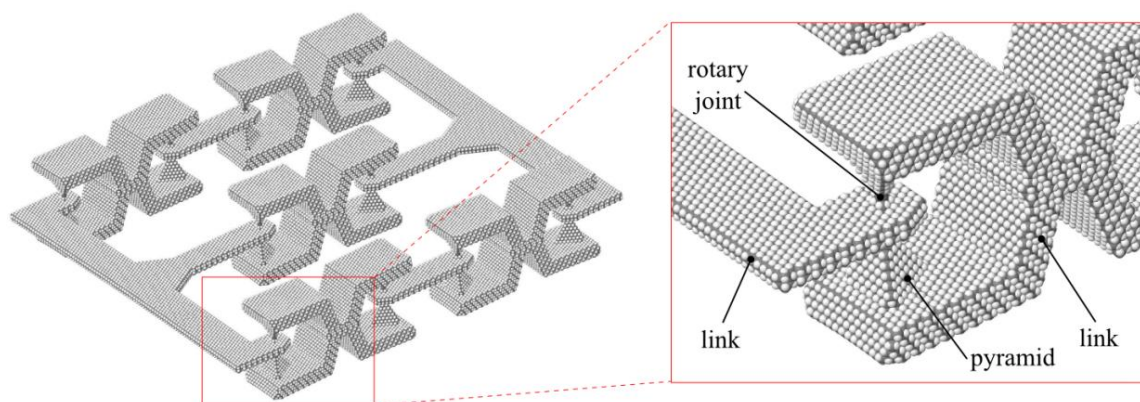


Рисунок 24: Часть молекулярно-механического логического элемента. Эта молекулярная машина состоит из 120695 атомов, 87595 углерода и 33100 водорода и занимает объем примерно 27 нм × 32 нм × 7 нм.

Девять жестких звеньев соединены друг с другом через пару поворотных шарниров.

глотание. Например, система часов, управляющая логическими вентилями, может хранить и высвобождать энергию в той степени, в которой это может потребоваться для перемещения вверх или преодоления любых потенциальных барьеров, с которыми можно столкнуться [11]. Более фундаментально, компьютер должен будет использовать обратимые логические элементы на основе этого вращающегося соединения, чтобы избежать минимального рассеяния $k_B T \log 2$ от каждой логически необратимой битовой операции, предсказанной теоретически [1,10,16] и наблюдаемой экспериментально [2,12]. Такая машина могла бы выполнять сколь угодно много вычислительных операций на рассеиваемый джоуль, работая на достаточно низкой тактовой частоте. Минимально возможному рассеянию энергии можно было бы способствовать за счет уменьшения или даже устранения потенциальных барьеров в тех механических степенях свободы, которые необходимы при нормальной работе устройства.

Обычный показатель производительности полупроводниковых устройств — это (энергия, рассеиваемая за операцию), умноженная на (время на операцию). Для рассеивания из-за трения, зависящего от скорости, как в случае с вращающимися соединениями, рассеивание пропорционально скорости, следовательно, $1/\text{время}$ для работы, требующей фиксированного количества движения, например, поворот на 60 градусов для операций с воротами, описанных в этой статье. .

Следовательно, показатель производительности энергия*время является константой. Из [11, уравнение. 2], эта константа равна $E_{\text{dissipated}} = k_B T \phi$ для поворота на угол ϕ . Предположим, что логическая операция соответствует повороту около 10 суставов примерно на радиан, это произведение энергии на время составляет около 10–34 Дж с, используя k_B из [11].

Для машины, использующей несколько вращающихся соединений, такой как компьютер, взаимодействие между соседними роторами может повлиять на рассеивание. Это может ограничить то, насколько близко роторы могут быть размещены, прежде чем взаимодействия значительно увеличат рассеивание энергии. Экспериментальное исследование массивов молекулярных роторов на поверхности [27] иллюстрирует эффект таких взаимодействий.

5.4.2 Влияние крупномасштабного проектирования на сопротивление

При оценке трения в [11] рассматривались полные обороты ротора, соединенного с корпусом исключительно через вращающиеся соединения. При использовании в механическом компьютере, обсуждаемом в этой статье (как показано на рисунке 24), ротор связан с другими частями ворот.

Эти связи увеличивают связь с окружающей средой и могут повлиять на сопротивление. Например, связь уменьшит наклон и смещение оси ротора по сравнению с моделированием изолированного ротора и корпуса. Соединение, по сути, придает жесткость ротору против наклона и является альтернативой локальным изменениям в конструкции, которые также могут повысить жесткость соединения, например, изменение размера корпуса, чтобы соединение подвергалось растяжению, а не сжатию. Эти альтернативы являются примером того, как цели проектирования молекулярных машин могут быть реализованы либо локально, либо в более крупных масштабах за счет выбора того, как молекулярная машина встроена в окружающую среду.

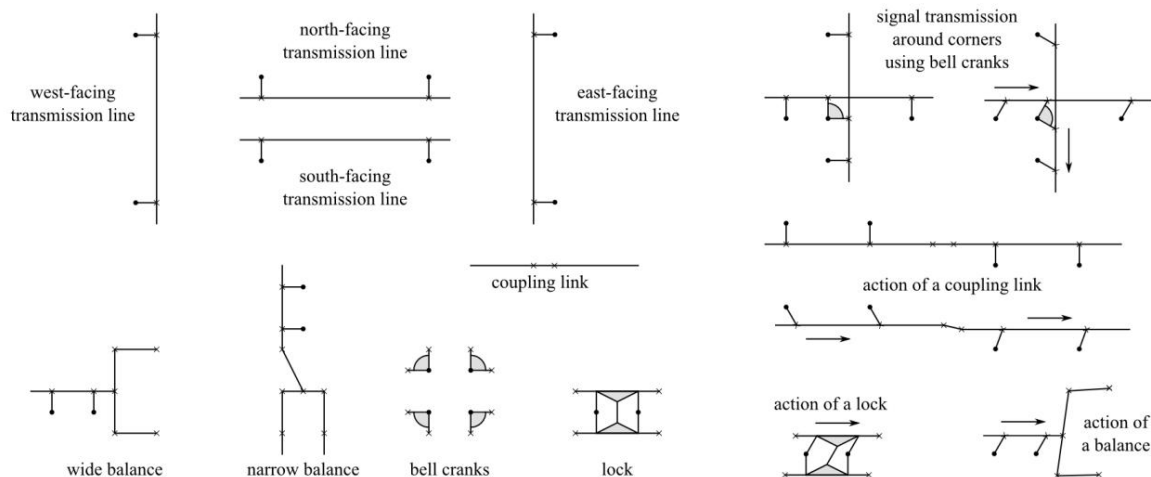


Рис. 25. Схематические обозначения логических компонентов механической связи, включая замок, две версии весов и механизмы маршрутизации сигналов.

Еще одним примером выбора конструкции более высокого уровня является расположение соседних вращающихся соединений, чтобы помочь уменьшить рассеивание. В частности, вращающееся соединение имеет небольшой потенциальный барьер вращения [11], который может вносить значительный вклад в диссипацию при низких температурах. То есть несовершенное восстановление накопления и выделения энергии при переходе за потенциал ротора приводит к диссипации. Это можно уменьшить, расположив роторы на каждом конце звена со смещением на 60 градусов. В этом случае, когда один ротор находится на потенциальном минимуме, другой - на максимуме. Это позволит хранить и высвобождать энергию ближе к роторам, чем, скажем, у накопительной пружины, расположенной рядом с тактовым входом, которая может быть менее эффективной при передаче энергии к ротору и от него из-за «резиновых» связей. Эта процедура аналогична использованию противовесов в лифтах.

6. Выводы

Известно, что универсальная комбинаторная логика и последовательная логика вместе достаточны для создания универсальной или полной по Тьюрингу вычислительной системы. С учетом практических ограничений времени и памяти (как и в любом компьютере), такая система может вычислить все, что можно вычислить.

Мы продемонстрировали, что, используя только звенья и вращающиеся соединения, можно создать полную по Тьюрингу вычислительную систему. Универсальная комбинаторная логика была продемонстрирована с помощью конструкции вентиля И-НЕ, а последовательная логика, имитирующая электронные триггеры и достаточная для создания памяти, была продемонстрирована с использованием ячеек, объединенных в сдвиговые регистры.

Эта парадигма проектирования намного проще, чем любая другая известная нам механическая конструкция, полная по Тьюрингу. Кроме того, благодаря исключению значительного трения скольжения, парадигма «звенья и вращающиеся соединения» потенциально может быть более энергоэффективной, чем любая предыдущая конструкция, о которой мы знаем. Фактически, моделирование показывает, что реализация описанной системы на молекулярном уровне будет гораздо более энергоэффективной, чем традиционные электронные компьютеры.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В этом приложении содержатся диаграммы, показывающие, как можно сконструировать обычные логические элементы из блокировок и противовесов (рис. 25). Включенные элементы: NOR (рис. 26) и XOR (рис. 27). Элементы «ИЛИ», «И» и «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» можно реализовать путем инвертирования показанных элементов — инверсию легко выполнить, просто переключив «единицу» и «нулевую» линию.

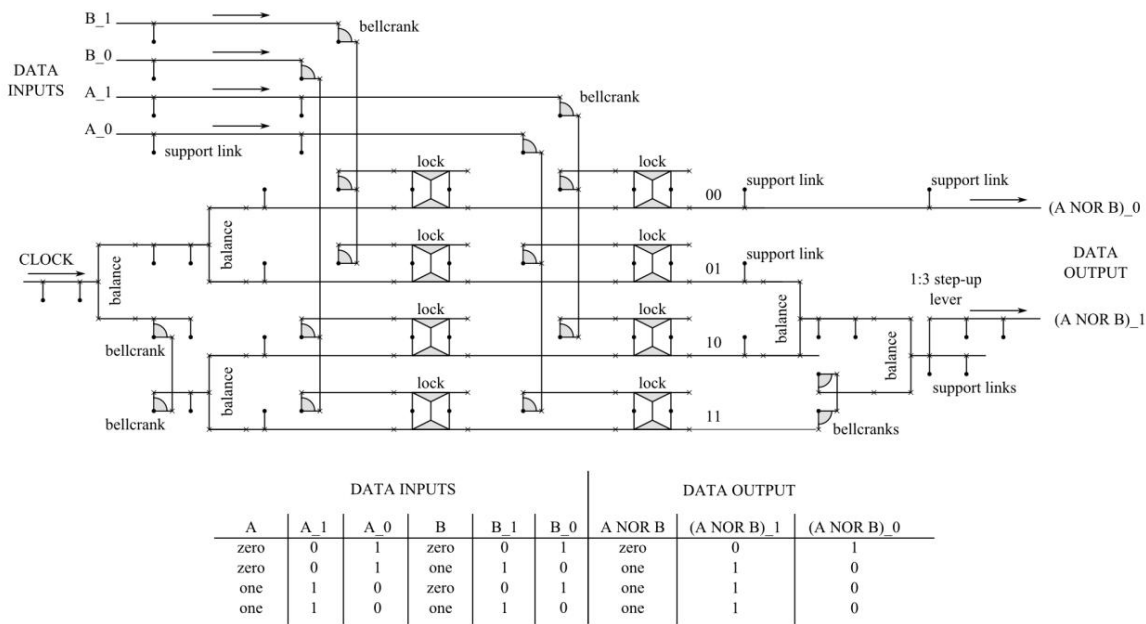


Рис. 26. Логический элемент NOR на основе баланса и блокировки, использующий схему ввода/вывода с двумя каналами на каждый бит.

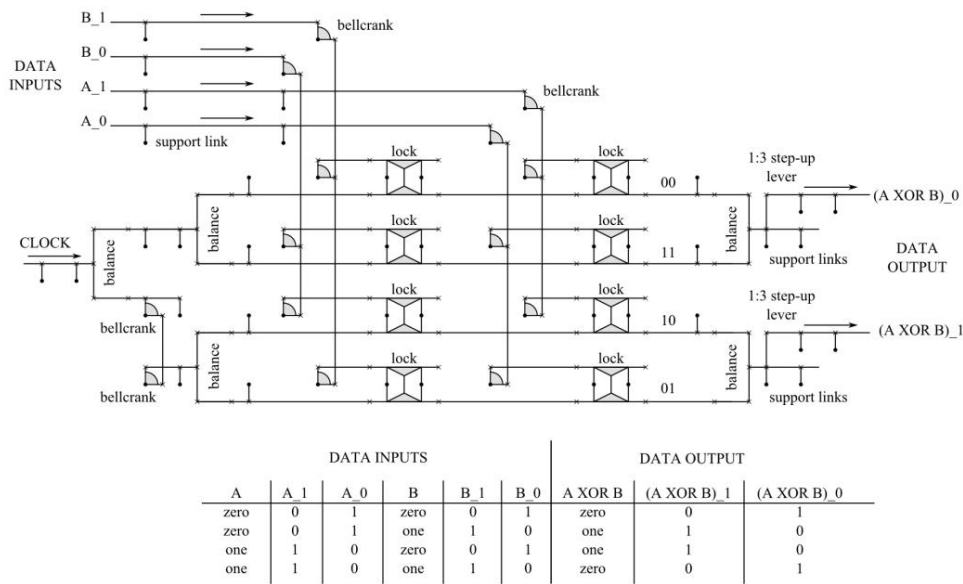


Рис. 27. Элемент XOR на основе баланса и блокировки, использующий схему ввода/вывода с двумя каналами на каждый бит.

Рекомендации

- [1] Чарльз Х. Беннетт. Термодинамика вычислений: обзор. Международный журнал теоретической физики, 21 (12): 905–940, 1982.
- [2] Антуан Берут, Артак Аракелян, Артём Петросян, Серджио Силиберто, Рауль Дилленшнайдер и Эрик Лутц. Экспериментальная проверка принципа Ландауэра, связывающего информацию и термодинамику. Природа, 483:187–189, 2012.
- [3] Кеннет С. Брэдли. Механические вычисления в микроэлектромеханических системах (мэмс). Магистерская диссертация, Технологический институт ВВС, 2003 г.
- [4] Фейсал Хайр Чоудхури. Цифровые логические вентили на базе микроэлектромеханических систем для применения в суровых условиях окружающей среды. Кандидатская диссертация, Университет Юты, 2013 г.
- [5] К. Эрик Дрекслер. Наносистемы: молекулярная техника, производство и вычисления. Джон Wiley & Sons, Inc., Нью-Йорк, 1992 г.
- [6] К.Л. Экинчи и М.Л. Рукс. Наноэлектромеханические системы. Обзор научных инструментов, 76(6):061101, 2005.
- [7] Хайко Феттиг, Джеймс Уайлд, Тед Хаббард и Марек Куят. Моделирование, динамические испытания и проектирование гибких соединений, обработанных микромеханической обработкой. Журнал микромеханики и микроинженерии, 11 (3): 209, 2001.
- [8] Ричард П. Фейнман. Квантово-механические компьютеры. Новости оптики, 11 (2): 11–20, 1985.
- [9] Дэвид Р. Форрест. Интегрированные наносистемы для производства с атомарной точностью. На семинаре по интегрированным наносистемам для атомно-точного производства (INFAPM), Беркли, Калифорния, август 2015 г. Офис передового производства Министерства энергетики США.
- [10] Майкл П. Франк. Введение в обратимые вычисления: мотивация, прогресс и проблемы. В материалах 2-й конференции по вычислительным технологиям, страницы 385–390. АКМ, 2005.
- [11] Тэд Хогг, Мэтью С. Мозес и Дамиан Г. Эллис. Оценка трения вращающихся соединений в молекулярных машинах. Проектирование и проектирование молекулярных систем, 2:235–252, 2017.
- [12] Чонмин Хон, Брайан Ламбсон, Скотт Дьюи и Джеффри Бокор. Экспериментальная проверка принципа Ландауэра в одноквитовых операциях с битами наномангнитной памяти. Достижения науки, 2:e1501492, 2016.
- [13] Ларри Л. Хауэлл. Совместимые механизмы. Джон Уайли и сыновья, 2001.
- [14] Александра Ион, Людвиг Уолл, Роберт Ковач и Патрик Баудиш. Цифровая механическая метаматериалы. В материалах CNI 2017. ACM, май 2017 г.
- [15] Сальма Кассем, Алан Т.Л. Ли, Дэвид А. Ли, Ванеса Маркос, Леони И. Палмер и Симона Пизано. Стереодивергентный синтез с помощью программируемой молекулярной машины. Природа, (549): 374–378, сентябрь 2017 г.
- [16] Рольф Ландауэр. Необратимость и тепловыделение в вычислительном процессе. IBM Дж. Исследования и развитие, 5:183–191, 1961.
- [17] Ральф К. Меркл, Роберт А. Фрейтас-младший, Тэд Хогг, Томас Э. Мур, Мэтью С. Мозес и Джеймс Райли. Молекулярно-механические вычислительные системы. techreport 46, Институт молекулярного производства, Пало-Альто, Калифорния, 2016 г.
- [18] А. Моды, Х. Шах, К. Амарнатх, П.С. Ганди, С.Г. Сингх и Р. Рашми. Проектирование, анализ и изготовление микроизгиба и ворот. На 13-й Национальной конференции по механизмам и машинам (NaCoMM-07), страницы 275–279, Бангалор, Индия, 2007 г. Индийский институт науки.

- [19] Дэвид Пламмер и Уильям Гринвуд. История устройств безопасности ядерного оружия. На 34-й совместной конференции и выставке AIAA/ASME/SAE/ASEE по двигательным установкам, стр. 3464, 1998 г.
- [20] Винсент Потт, Хей Кам, Реса Натанаэль, Джесок Чжон, Элад Алон и Цу-Дже Кинг Лю. Редукция механических вычислений: реле для интегральных схем. Труды IEEE, 98(12):2076–2094, 2010.
- [21] Джордан Р. Рэйни, Нил Надкарни, Кьяра Дарайо, Деннис М. Кохманн, Дженнифер А. Льюис и Катя Бертольди. Стабильное распространение механических сигналов в мягких средах с использованием запасенной упругой энергии. Труды Национальной академии наук, стр. 201604838, 2016.
- [22] Джон Х. Рейф. Механические вычисления: это вычислительная сложность и технологии. У Роберта А. Мейерса, редактора «Энциклопедии сложности и системных наук», страницы 5466–5482. Спрингер Верлаг, 2009.
- [23] М. Л. Рукс. Механические вычисления, редук? На встрече по электронным устройствам, 2004 г. IEDM. Технический дайджест. IEEE International, страницы 539–542. ИИЭР, 2004.
- [24] Роберт Ф. Сервис. Нобелевская премия по химии провозглашает эпоху молекулярных машин. Науки, 354(6309), Октябрь 2016 г.
- [25] А. Шарма, В.С. Рам и К. Амарнатх. Механические логические устройства и схемы. На 14-й Национальной конференции по машинам и механизмам (NaCoMM-09), стр. 235–239, Дургапур, Индия, 2009 г. Факультет машиностроения, Национальный технологический институт.
- [26] Джеймс Г. Скаун. Вот в чем загвоздка: в поисках механизма практически без трения были сделаны некоторые удивительные открытия. Машиностроение, 2009.
- [27] Ю. Чжан, Х. Керселл, Р. Стефак, Дж. Эчеверриа, В. Янку, УГЭ Перера, Ю. Ли, А. Дешпанде, К.-Ф. Браун, К. Иоахим, Г. Рапенн и С.-В. Хла. Одновременное и скоординированное переключение всех молекулярных роторов в сети. Природные нанотехнологии, 2016.
- [28] Конрад Цузе. Компьютер – моя жизнь. Спрингер Верлаг, 1993.