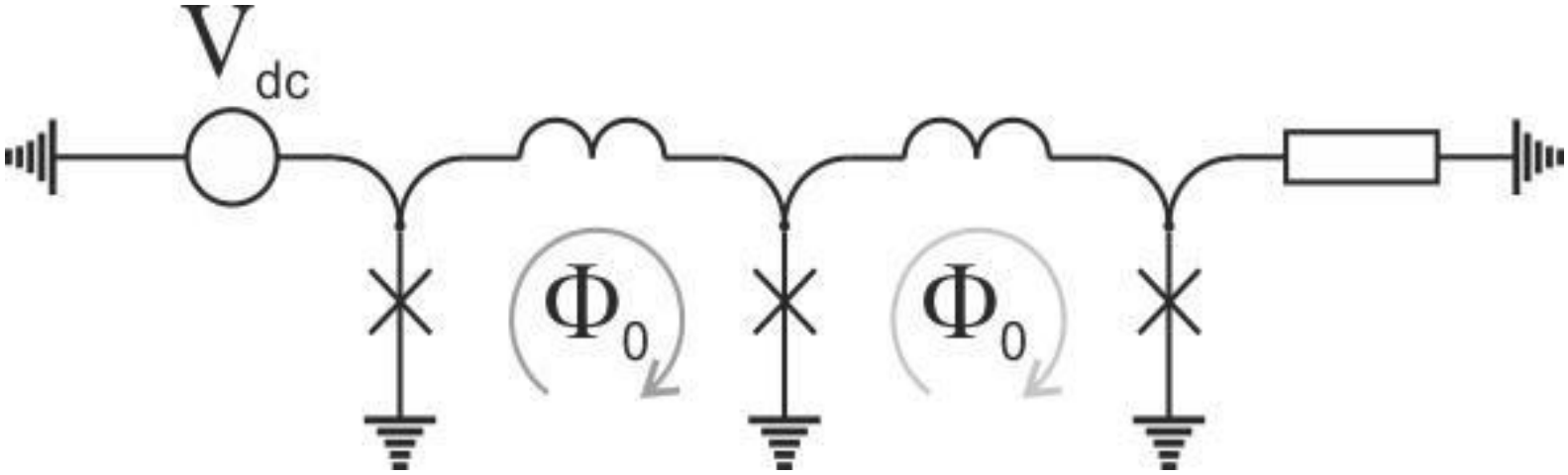
Логическое семейство RSFQ

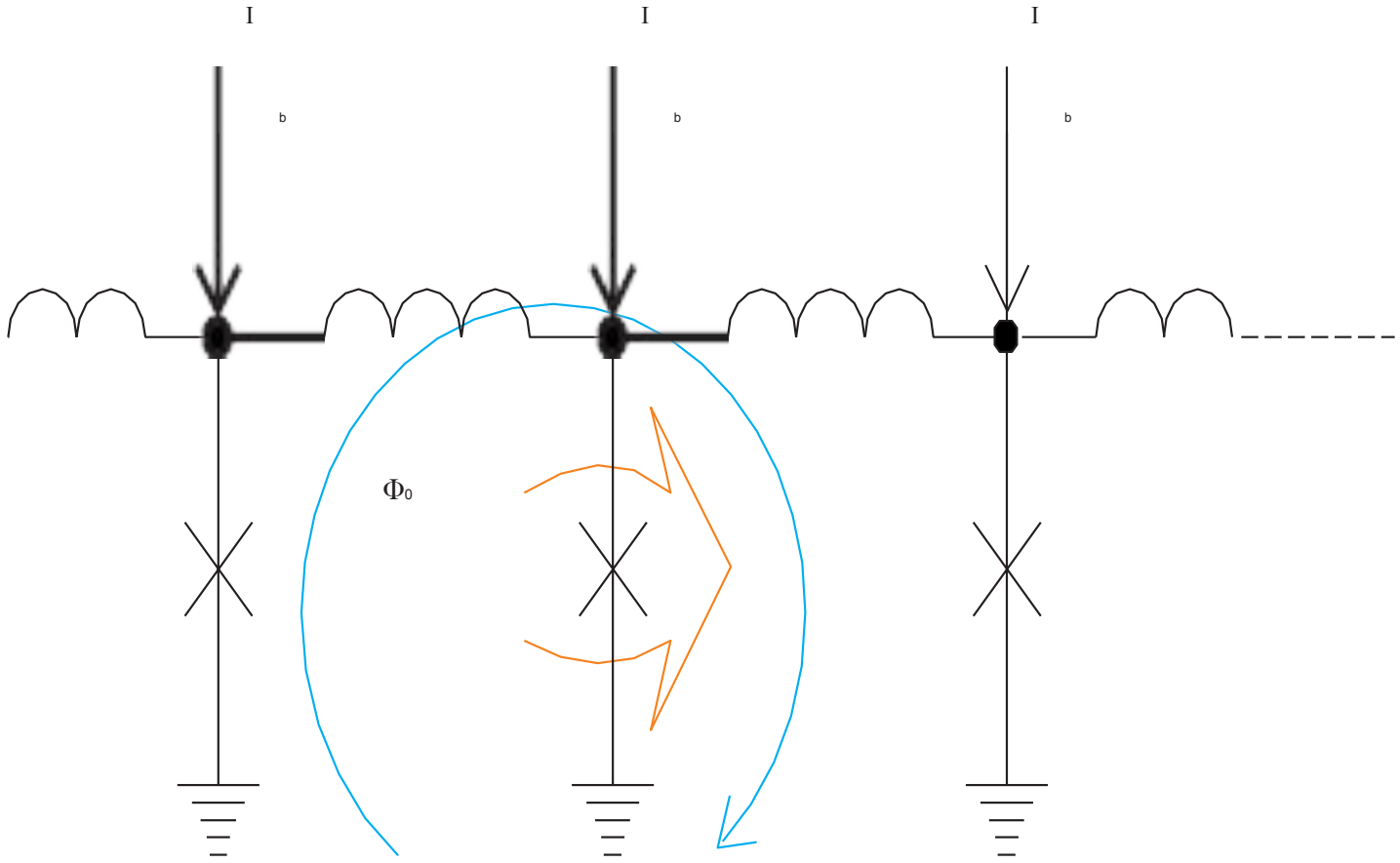
Основные принципы работы схемы SFQ

Обработка данных в схемах SFQ может быть представлена на примере работы ячеек RSFQ. Шина данных RSFQ показана на рисунке. Это параллельный массив сверхпроводящих петель, состоящий из джозефсоновских переходов (показаны крестиками) и сверхпроводящих индуктивностей, широко известных как **сверхпроводящие устройства квантовой интерференции - СКВИДы.**



Джозефсоновская передающая линия

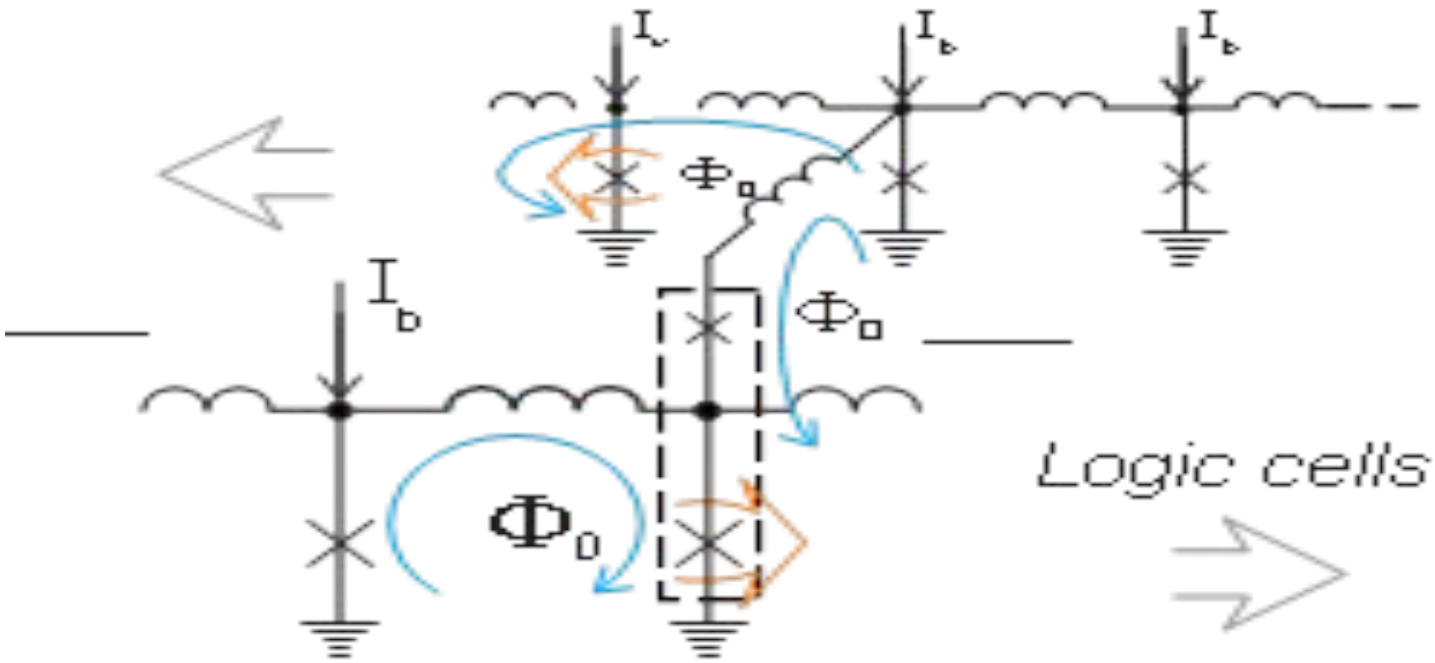
Эта структура называется линией передачи Джозефсона (JTL). SFQ можно переносить вдоль этой JTL путем последовательного переключения джозефсоновских контактов. Основной принцип работы логических ячеек SFQ сводится к суммированию токов, которые являются токами SFQ, и токов смещения. Это суммирование приводит (или не приводит) к последовательному переключению джозефсоновского перехода, приводящему к воспроизведению (или не воспроизведению) SFQ. Поступление импульса SFQ в течение тактового периода в логическую ячейку имеет двоичное значение “1”, а отсутствие означает “0”.



Джозефсоновская передающая линия (JTL).

I_b - ток смещения. Синяя стрелка представляет собой циркулирующий ток SFQ. Оранжевой стрелкой выделен переход Джозефсона, перешедший в резистивное состояние.

Пример тактового считывания информации из логической ячейки RSFQ показан на следующем слайде. Синхронизация осуществляется путем приложения SFQ's к ячейке. Верхняя JTL служит для распространения тактовых SFQ. SFQ ответвляются в ячейку через дополнительную ветвь, связанную с JTL, как показано на рисунке. I_b - приложенный ток смещения. Синие стрелки показывают циркулирующие токи SFQ. Оранжевыми стрелками выделены джозефсоновские переходы, включенные в резистивное состояние. Пунктирным прямоугольником обозначена пара, принимающая решение.

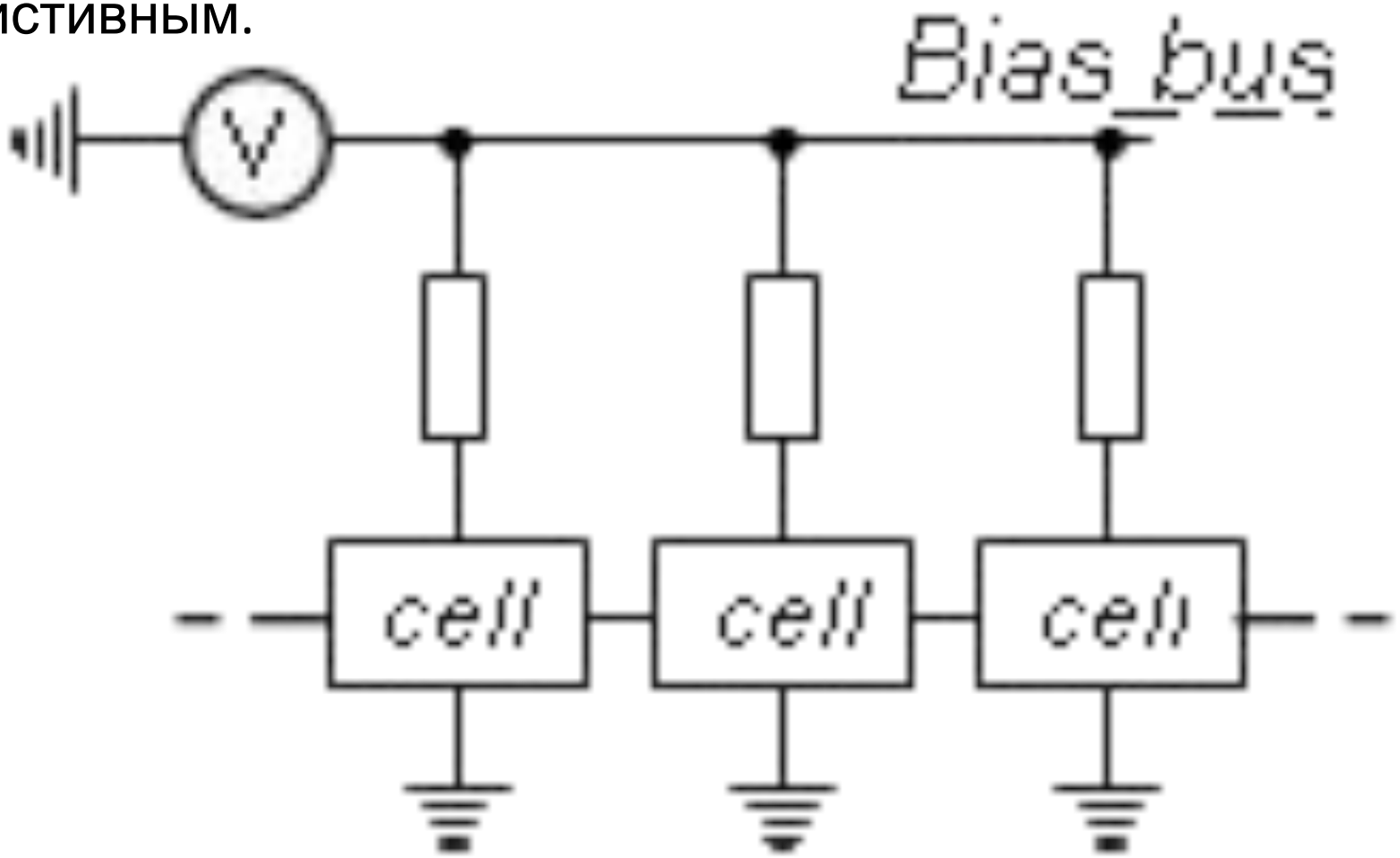


Операция считывания выполняется парой переходов, отмеченных пунктирным прямоугольником. Эта пара обычно называется парами принятия решений. Наличие (или отсутствие) циркулирующего тока SFQ в контуре логической ячейки приводит к тому, что нижний переход находится ближе (или дальше) к своему критическому току по сравнению с верхним переходом. Тактовая частота SFQ переключает нижний (или верхний) переход соответственно. Воспроизведение SFQ нижним переходом означает логическую «1» на выходе, а отсутствие SFQ означает логический «0». Рассматриваемая логическая ячейка действует как конечный автомат (его выход зависит от истории его входа). Она работает как широко используемый D-триггер («D» означает «данные» или «задержка») - основа регистров сдвига и поэтому RSFQ является последовательной логикой в отличие от полупроводниковой логики, которая является комбинационной (где выход логической ячейки является функцией только ее текущего входа).

Логика RSFQ

Логика RSFQ доминирует в сверхпроводниковой цифровой технологии с 1990-х годов. На ее основе были реализованы многие устройства с цифровыми и смешанными сигналами, такие как аналого-цифровые преобразователи, процессоры цифровых сигналов и данных. В начале развития RSFQ энергоэффективности не придавали значения и считалось, что высокая тактовая частота является основным преимуществом RSFQ. Так, был представлен чрезвычайно быстрый цифровой делитель частоты на основе RSFQ (T-триггер) с тактовой частотой до 770 ГГц и это одна из самых быстрых цифровых схем.

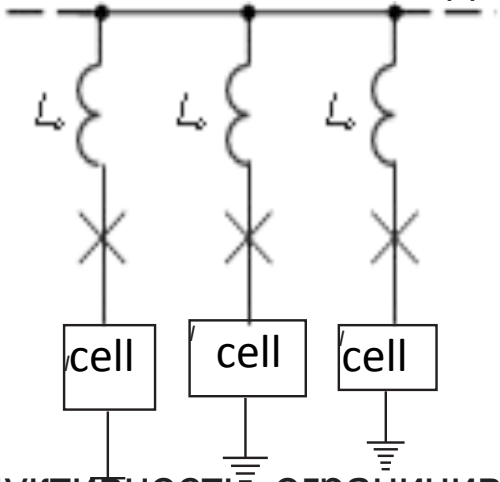
Первыми базовыми ячейками RSFQ на практике были сверхпроводящие петли с двумя джозефсоновскими переходами (т.е. ПТ-СКВИДы). Эти ячейки были соединены резисторами (так , что «R» в сокращении означает «резистивный»). Соединение шины питания также было резистивным.



Резисторы, соединяющие ячейки, определили стационарное рассеивание энергии, $PS = I_b V_b$, где I_b и V_b - постоянный ток смещения и соответствующее напряжение. Типичное значение тока смещения,как правило, $I_b \approx 0{,}75\ I_c$. Напряжение смещения должно было быть порядка выше характеристического напряжения джозефсоновского перехода, V_b ~10 $I_c R_n$, чтобы предотвратить перераспределение тока смещения. Это требование определило номиналы резисторов смещения. В итоге типичная рассеиваемая мощность стационарной ячейки RSFQ составляет PS ~800 нВт, а динамическое рассеяние мощности, соответствующее полезному переключению джозефсоновского перехода, определяется как $PD = I_b \Phi_0 f$, где f - тактовая частота. Для типичной тактовой частоты 20 ГГц PD находится на уровне 13 нВт, т.е. примерно в 60 раз меньше стационарной. Для повышения энергоэффективности схем RSFQ необходимо уменьшение стационарного рассеивания энергии. Это было реализовано в энергоэффективных преемниках RSFQ, ERSFQ и eSFQ , где «E / e» означает «энергоэффективный», в которых PS полностью равен нулю.

ERSFQ

В ячейках ERSFQ резисторы в линиях питания заменены на джозефсоновский переходы, ограничивающие изменение тока смещения в этой логике. Это дает возможность схемам находиться в чистом сверхпроводящем состоянии. Основная трудность при устранении резисторов смещения - это образование сверхпроводящих контуров между логическими ячейками и возникновение токов, циркулирующих по соседним ячейкам которые препятствуют правильной работе цепей. Однако в ячейках ERSFQ паразитные набеги фазы автоматически компенсируется соответствующими переключениями джозефсоновских переходов и индуктивностями Lb в линии питания ERSFQ. Хотя большое значение этой индуктивности Lb минимизирует изменение тока смещения, ее большой геометрический размер увеличивает площадь цепи. Возможные решения этой проблемы - увеличение количества слоев разводки и использование сверхпроводящих материалов, имеющих высокую кинетическую индуктивность. Эти материалы также могут быть использованы для дальнейшей миниатюризации самих логических ячеек.



кема питания ERSFQ. Lb - индуктивность, ограничивающая изменение тока

eSFQ

Основная идея eSFQ - «синхронная фазовая балансировка». Ток смещения подводится к паре принятия решения, см. рис. Один джозефсоновский переход этой пары всегда переключается в течение тактового цикла, независимо от содержания данных. Следовательно, среднее напряжение и приращение фазы Джозефсона всегда одинаковы для любой такой пары. Это предотвращает появление паразитных циркулирующих токов. Джозефсоновский переход в линии питания требуется только для правильной регулировки фазового баланса во время процедуры включения и во время нормальной работы цепи его паразитного переключения не происходит. Достигнутый фазовый баланс позволяет устранить большие индуктивности в линиях питания ERSFQ, и поэтому схемы eSFQ занимают почти такую же площадь, как и схемы RSFQ, но работают лучше.

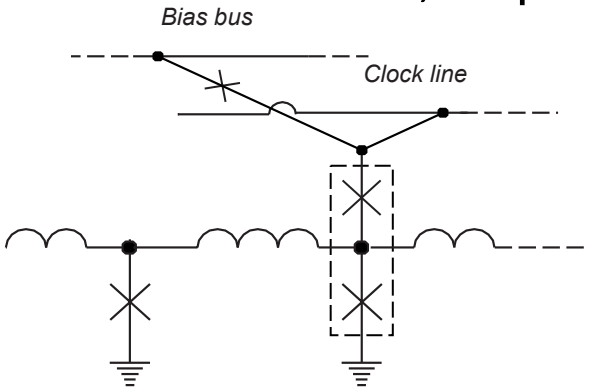
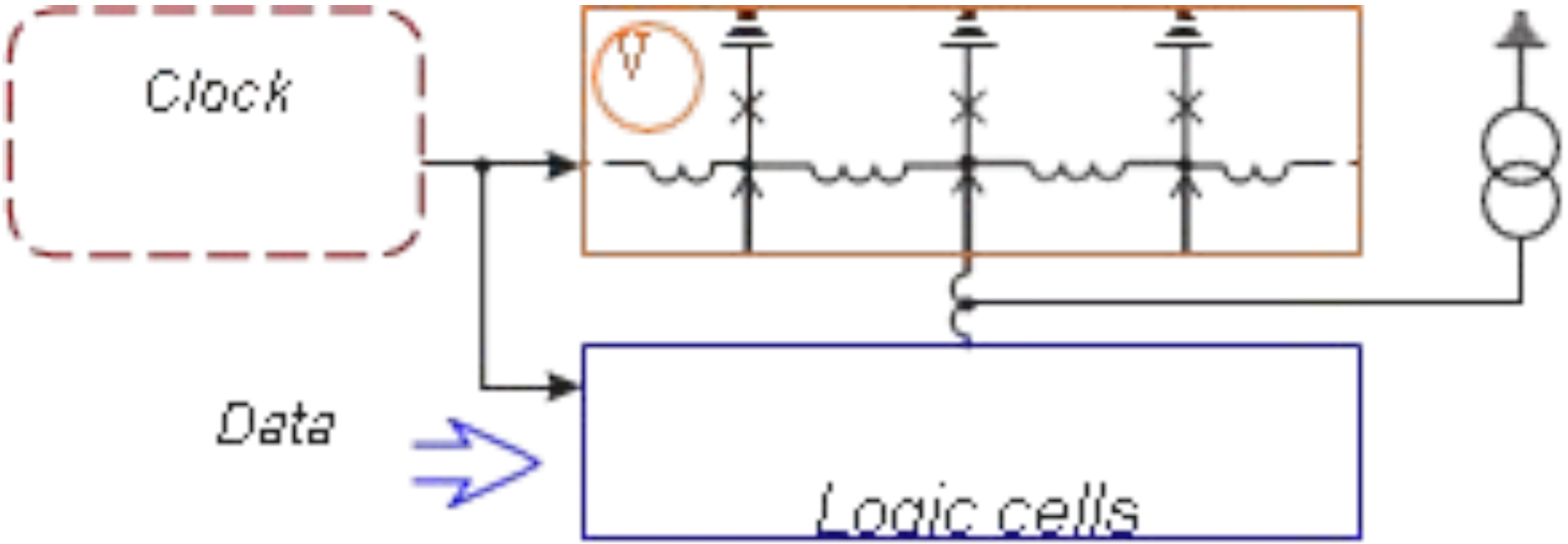


Схема питания eSFQ. Пунктирным прямоугольником обозначена пара, принимающая решение.

С другой стороны, эта синхронная фазовая балансировка делает eSFQ чистой синхронной логикой в отличие от ERSFQ и переход на eSFQ требует корректировки библиотеки RSFQ , что приводит к увеличению числа джозефсоновских контактов. Например, JTL должен быть заменен регистром сдвига (последовательный массив D-триггеров, рассмотренный выше). Сходство подходов ERSFQ и eSFQ позволяет сделать общую оценку общего увеличения числа джозефсоновских переходов до 33–40% по сравнению со схемами RSFQ.

Общие особенности логического семейства RSFQ

Источник тактирования фактически являются частью данных в схемах ERSFQ. Это означает, что они глобально асинхронны, а тактовую частоту (т.е . частоту повторения SFQ в синхронизирующем JTL) можно регулировать «в полете» логическими ячейками в соответствии с данными обработки, что увеличивает функциональные возможности. Источником напряжения смещения может быть JTL, питаемый постоянным током смещения и тактовыми сигналами SFQ, подаваемыми от встроенного тактового генератора SFQ, см. рис.



Среднее напряжение на этом JTL точно пропорционально тактовой частоте, $V_b = \Phi_0 f$, согласно AC эффекту Джозефсона. Управление часами с помощью логических ячеек позволяет регулировать это напряжение или даже отключать его. Последний вариант соответствует переходу цепей в «спящий режим», при котором рассеиваемая мощность полностью равна нулю. Реализация этого механизма энергосбережения на уровне отдельных цепей возможна при разделении цепей на последовательное соединение участков с одинаковым током смещения, но разным напряжением смещения.

Это очень ценно, поскольку в логическом семействе RSFQ логические ячейки запитываются параллельно, общий ток смещения увеличивается пропорционально количеству контактов Джозефсона. Для обычной практической системы с примерно 1 миллионом джозефсоновских переходов значение тока смещения может быть неоправданно высоким I_b ~100 A. Разделение цепей позволяет поддерживать его на приемлемом уровне ниже 3 A.

В итоге, улучшенные схемы ERSFQ и eSFQ существенно повысили энергоэффективность схем логического семейства RSFQ , но нет предела совершенству и в 2011 году была предложена обратимая квантовая логика (RQL),

как альтернатива традиционной RSFQ , представленная как «сверхмаломощная сверхпроводниковая логика».