

Использование внешних мониторов питания для AVR

В этой статье рассматриваются методы, позволяющие избежать нарушения функционирования системы при падении напряжения питания. Рассмотренное устройство с помощью внешней схемы монитора питания запрещает процессору исполнять команды в то время, когда напряжение питания недостаточно. В статье подробно рассмотрены две реализации монитора питания на дискретных элементах, которые пользователь может выбирать под потребности системы. Рассмотрены также примеры интегральной реализации.

Событие, когда напряжение питания падает ниже минимально допустимого уровня, часто называют «Brown-Out», а когда напряжение питания полностью исчезает на некоторый период — «Black-Out».

При использовании данного устройства в ситуациях, описанных выше, можно избежать следующих неприятностей:

- искажения содержимого регистров процессора;
- искажения содержимого регистров ввода/вывода;
- случайного изменения состояния выводов;
- искажения содержимого SRAM;
- искажения содержимого EEPROM;
- искажения содержимого внешней энергонезависимой памяти.

Принцип действия

Для того чтобы процессор безошибочно декодировал и выполнял команды, необходимо чтобы напряжение питания всегда оставалось выше минимально допустимого уровня, который определяется, в том числе, и выбранной тактовой частотой. Когда напряжение питания падает ниже этого уровня, процессор может начать выполнять какие-то команды неправильно. В результате возможно непредвиденное изменение внутренних данных и состояния линий управления. Это может касаться регистров процессора, регистров ввода/вывода, памяти данных и вызывать искажения их содержимого.

Для предотвращения этих проблем нужно запретить процессору выполнять команды в то время, когда напряжение питания недостаточно. Наилучшим образом это обеспечивается с помощью использования внешнего монитора напряжения питания. Ниже определенного порогового напряжения V_T монитор устанавливает низкий (активный) уровень на входе RESET. Это немедленно вызывает прекращение выполнения процессором программы. Когда напряжение питания становится выше этого порога, сигнал сброса снимается, и МК начинает выполнение программы с вектора сброса (0x0000).

Рекомендуется устанавливать пороговое напряжение на 5–15% ниже типового V_{CC} , чтобы сделать допустимыми небольшие флуктуации напряжения питания. Пороговое напряжение всегда должно выбираться так, чтобы монитор питания удерживал сброс активным в то время, когда напряжение питания ниже критического для процессора значения. Необходимо убедиться, что пороговое напряжение монитора питания является достаточно высоким даже для наихудшего случая.

Когда монитор питания удерживает активным сигнал сброса, любая работа процессора останавливается. Когда сигнал сброса снимается, регистры будут находиться в состоянии по умолчанию. Во время действия сигнала сброса содержимое регистров сохраняется. Без монитора питания случайные действия процессора могут исказить содержимое регистров.

Когда монитор питания удерживает МК в состоянии сброса, все регистры ввода/вывода сохраняют свое состояние по умолчанию. Следовательно, вся встроенная периферия будет оставаться в состоянии сброса.

Без монитора питания случайные действия процессора могут стать причиной записи неопределенного значения в любой из регистров ввода/вывода. Это может вызвать непредвиденное поведение встроенной периферии.

Когда монитор питания удерживает активным сброс МК, все выводы портов сохраняют свое состояние по умолча-

нию. Без монитора питания случайные действия процессора могут стать причиной записи неопределенного значения в любой из регистров ввода/вывода. Это может вызвать случайное изменение состояния выводов.

Когда монитор питания удерживает активным сброс МК, не происходит никаких обращений к внутренней SRAM. Содержимое памяти во время действия сигнала сброса сохраняется¹.

Энергонезависимая память, такая как EPROM, EEPROM сохраняет свое содержимое даже тогда, когда питание системы полностью выключено. Когда монитор питания удерживает активным сброс МК, всякая активность на линиях управления прекращается. Таким образом содержимое памяти защищается от непреднамеренной записи со стороны процессора.

Поскольку МК семейства AVR не имеют возможности самопрограммирования², содержимое внутренней Flash-памяти программ при сбоях питания не повреждается.

В процессе записи нового значения в энергонезависимую память, требуется некоторое минимальное значение напряжения питания. Если напряжение питания в какой-то момент процесса записи падает ниже этого значения, происходит сброс процесса записи, что приводит к повреждению содержимого данной ячейки.

В некоторых представителях семейства AVR при активации сброса во время записи во внутреннюю EEPROM регистр адреса принимает нулевое значение (0x000). В результате может быть повреждено как содержимое той ячейки, куда производилась запись, так и нулевой ячейки.

Если даже внешний монитор питания остановил процессор, ОЗУ или регистры в конечном счете потеряют свои данные, если напряжение питания упадет ниже минимального значения, требуемого для каждой ячейки памяти для хранения своего содержимого. Когда процессор остановлен, минимальное напряжение для внутреннего ОЗУ AVR, которое гарантирует сохранность данных, составляет порядка 2 В. Тесты в процессе производства показывают, что AVR способны хранить содержимое ОЗУ даже при напряжении питания 0,5–1 В.

Реализация

В настоящее время доступен целый ряд интегральных микросхем мониторов питания от разных производителей. Предлагаются приборы высокой точности при малой стоимости, гарантирующие пороговое напряжение с точностью 1%. Несмотря на то, что доступны простейшие трехвыводные мониторы питания с фиксированным пороговым напряжением, существует диапазон приборов, предоставляющих дополнительные возможности, такие как расширение импульса сброса, задержка для сброса по включению, сторожевые таймеры, стабилизаторы напряжения, устройства переключения двух источников питания для бесперебойной работы и т. д. В этой статье рассматриваются интегральные реализации. Как альтернатива, приводятся также описания двух дискретных реализаций мониторов питания.

Вариант 1: минимальное потребление

Характеристики:

- очень низкое потребление, типовое — 0,5 мкА на 3 В, 1 мкА на 5 В;
- низкая стоимость;
- большой гистерезис — типично 0,3 В;
- быстрые переходы выходного напряжения;
- точность — ± 5–10%;

- большое количество компонентов;

Схема, показанная на рис. 1, имеет очень низкое потребление, что делает ее пригодной для приложений с батарейным питанием. Стандартные дискретные компоненты обеспечивают низкую стоимость схемы.

Переход напряжения на выводе RESET является очень резким. Благодаря большому гистерезису точность является высокой. С другой стороны, время отклика довольно большое, что не подходит для резко меняющегося напряжения питания.

Принцип функционирования

Этот монитор питания имеет два каскада: детектор и усилитель. В каскаде детектора пороговое напряжение установлено с помощью резисторов R1 и R2 относительно напряжения открывания транзистора VT1. В режиме нормальной работы этот транзистор открыт. Когда напряжение питания падает ниже порогового напряжения, транзистор закрывается.

Выход этого детектора подключен к входу усилителя с ультранизким потреблением. В нормальном режиме работы низкое напряжение на базе транзистора VT2 обеспечивает его закрытое состояние, что позволяет резистору R5 установить на входе RESET высокий уровень. Усилительный каскад также имеет петлю обратной связи для получения гистерезиса, для чего служит транзистор VT3, шунтирующий резистор R3 усилителя, когда на входе RESET низкий уровень.

Выбор компонентов

Разброс коэффициента передачи тока h_{FE} для VT1 приводит к изменению порогового напряжения V_T (на $\pm 0,2$ В). Можно использовать большинство маломощных транзисторов, хотя рекомендуются транзисторы с низким разбросом параметров.

Нужно быть внимательным при замене VT1 на транзистор другого типа. Пороговое напряжение база-эмиттер VT1 влияет на константу 0,4 в выражении для порогового напряжения (приведено ниже). Как следствие, замена транзистора приведет к изменению порогового напряжения монитора питания, что потребует пересчета делителя R1, R2.

R1 и R2 образуют делитель напряжения, который определяет пороговое напряжение V_T . Так как пороговое напряжение зависит от этих резисторов, рекомендуется выбирать резисторы с допуском 1% или лучше.

R1 обычно выбирается равным 10 МОм для получения наименьшего возможного потребления. R2 находится с помощью выражения, приведенного ниже. Константа 0,4 в выражении может немного меняться при замене транзистора VT1:

$$V_T = (R1 + R2) \cdot \left(\frac{0,4}{R2} \right), \text{ или } R2 = \frac{0,4 \cdot R1}{V_T - 0,4}.$$

R3 является некритичным подтягивающим резистором, который на пороговое напряжение влияет очень слабо. Он должен выбираться как можно большим для уменьшения потребления, но не более 10 МОм.

Резистор R4 определяет гистерезис. Если взять R4 равным 3,3 МОм, то результирующий гистерезис будет приблизительно 0,3 В. Меньший номинал R4 даст больший гистерезис, а больший номинал — меньший гистерезис. Больший номинал R4 также приведет к несколько менее резким переходам выходного напряжения. Большое отклонение от рекомендованного значения приведет к отклонению константы 0,4 в выражении для порогового напряжения. Так как при изменении номинала R4 гистерезис меняется слабо, точность резистора R4 не критична.

Резистор R5 обеспечивает на входе RESET высокий уровень в нормальном режиме работы. Рекомендуется выбирать резистор номиналом не больше 50 кОм. Так как в нормальном режиме работы ток через этот резистор не протекает, его номинал и точность не очень важны. Когда на входе RESET устанавливается низкий уровень, через этот

резистор начинает протекать относительно большой ток.

Конденсаторы C1 и C2 закорачивают высокочастотные шумы, воспринимаемые схемой и усиливаемые транзисторами. Оба конденсатора, в принципе, могут быть исключены, хотя рекомендуется номинал 1 нФ. Для максимальной устойчивости к шумам номинал должен быть порядка 100 нФ. Точность номиналов не критична, но для уверенности в эффективной развязке необходимо применять высокочастотные конденсаторы.

Конденсатор C3 развязывает цепи питания. Он может быть исключен, если где-то рядом на печатной плате уже есть развязывающие конденсаторы, в противном случае его рекомендуется выбрать номиналом 1 нФ. Для максимальной устойчивости к шумам рекомендован номинал 100 нФ.

Если требуется кнопка сброса и/или возможность внутрисхемного программирования, то ее подключают параллельно, как показано на рис. 1. Когда кнопка или программатор установят на входе RESET низкий уровень, потребляемая мощность станет относительно большой из-за резистора R5.

Выбор больших номиналов конденсаторов C1 и C2 увеличивает время отклика схемы. Это не является проблемой для приложений с батарейным питанием, где напряжение питания уменьшается медленно. Заметьте, что время отклика относится также к процессу включения питания. Это может иметь значение, когда батареи разряжены. Если напряжение питания может падать быстро, время отклика нужно учитывать.

Чувствительность к шумам

Выбор номиналов резисторов R1 и R3 больше 10 МОм не рекомендуется, так как это сделает схему чувствительной к тепловым шумам, генерируемым резисторами. Когда шумы не критичны, номиналы R1 и R3 могут быть увеличены до 20 МОм. Выбор еще больших номиналов может привести к тому, что ток через резисторы станет недостаточным, что влечет за собой неработоспособность детектора. Если требуется большая устойчивость к шумам номиналы этих резисторов должны быть выбраны меньшими, пусть даже ценой повышенного потребления мощности.

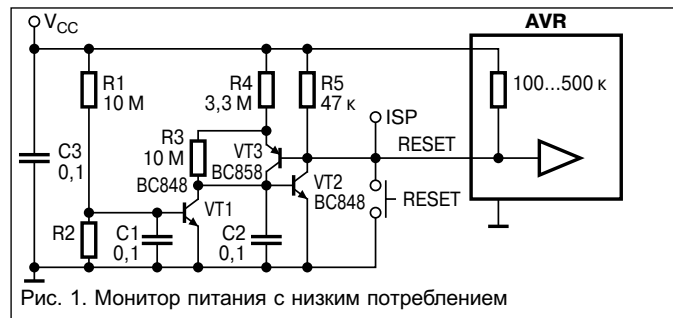


Рис. 1. Монитор питания с низким потреблением

Конденсаторы C1, C2 и C3 являются развязывающими конденсаторами для минимизации чувствительности к ВЧ и сетевым наводкам. Все они могут быть исключены, но устойчивость к шумам напрямую зависит от выбранных номиналов.

Так как пороговое напряжение определяется в основном резисторами R1 и R2, погрешность этих резисторов напрямую влияет на точность порогового напряжения. Рекомендуется выбирать резисторы с допуском $\pm 1\%$.

Потребляемый ток в режиме нормальной работы (при достаточно высоком напряжении V_{CC}) может быть найден следующим образом:

$$I \approx \left(\frac{V_{CC}}{(R1 + R2) \parallel (R3 + R4)} \right) = V_{CC} \left(\frac{1}{R1 + R2} + \frac{1}{R3 + R4} \right).$$

Когда кнопка сброса или программатор удерживает низкий уровень на входе RESET, то потребляемый ток возрастает до величины, рассчитываемой по формуле:

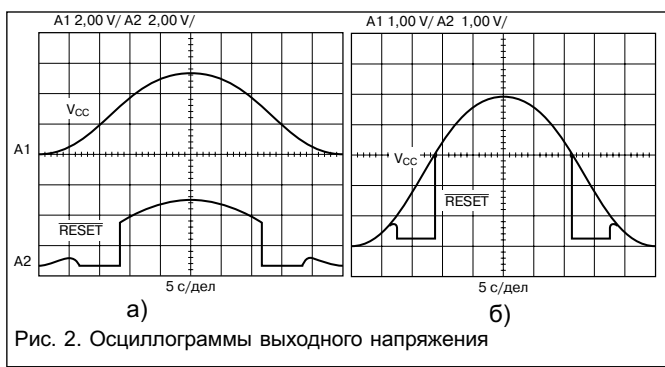


Рис. 2. Осциллограммы выходного напряжения

$$I \approx \frac{V_{CC}}{(R1+R2) \parallel (R3+R4) \parallel R5 \parallel R_{RESET}}$$

При падении напряжения питания до того уровня, когда срабатывает детектор, транзистор VT1 закрывается, VT2 открывается, а ток становится равным

$$I \approx \frac{V_{CC}}{(R1+R2) \parallel R5 \parallel R_{RESET}}$$

Так как номинал резистора R5 обычно выбирается намного меньшим, чем номиналы остальных резисторов R1-R4, два последних выражения упрощаются:

$$I \approx \frac{V_{CC}}{R5 \parallel R_{RESET}}$$

Вариант 2: минимальная стоимость

Это наиболее дешевая реализация для приложений, где стоимость является ключевым параметром, а потребление не является критичным.

Характеристики:

- малое количество компонентов;
- очень низкая стоимость;
- малая занимаемая площадь платы;
- малое время отклика;
- маленький гистерезис;
- малая скорость изменения выходного напряжения;
- низкая точность ($\pm 4 - 8\%$)³;
- высокий потребляемый ток;
- чувствительность к отклонениям параметров компонентов.

На рис. 3, а показана схема, которая имеет малые габариты и низкую стоимость. Однако высокое потребление делает ее непригодной для приложений с батарейным питанием. Так как во время понижения напряжения питания выходное напряжение падает довольно медленно, схема чувствительна к отклонениям номиналов компонентов. Учитывая погрешность номиналов резисторов R1 и R2, разброс параметров транзистора VT1 и отклонение порога входа RESET МК, значение порога V_T должно выбираться как минимум на 15% меньше номинального V_{CC} .

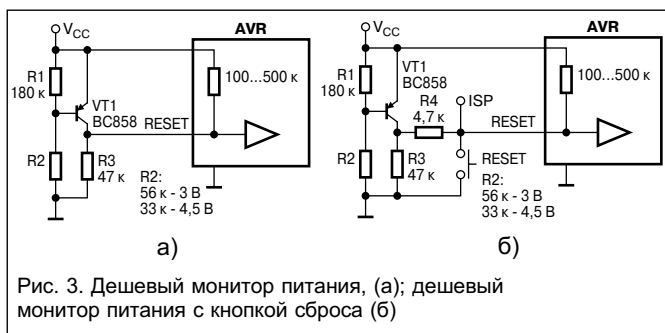


Рис. 3. Дешевый монитор питания, (а); дешевый монитор питания с кнопкой сброса (б)

Принцип функционирования

В режиме нормальной работы транзистор VT1 открыт, он удерживает на входе RESET высокий уровень. Когда напряжение питания V_{CC} падает ниже порогового напряжения V_T , транзистор VT1 закрывается. Это позволяет резистору R3 установить на входе RESET низкий (активный) уровень. Транзистор VT1 закрывается тогда, когда напряжение база-эмиттер падает ниже определенной величины (обычно 0,7 В для маломощных кремниевых транзисторов).

R1 и R2 образуют делитель напряжения, который формирует напряжение база-эмиттер. Пороговое напряжение V_T определяется следующим образом:

$$V_T \approx 0,7 \cdot \frac{R1+R2}{R2} \text{ или } \frac{R1}{R2} \approx \frac{V_T}{0,7} - 1.$$

Выбор компонентов

В качестве VT1 может быть использован практически любой маломощный р-п-р транзистор. Для получения быстрых переходов выходного напряжения при достижении напряжения порога переключения рекомендуется применять транзистор с большим коэффициентом передачи тока h_{FE} . Быстрые переходы делают схему менее чувствительной к разбросу компонентов, что исключает потребность в калибровке детектора.

Калибровка необходима в том случае, если V_T отличается от порогового напряжения транзистора. Это напряжение в формуле, приведенной выше, принимается равным 0,7 В. Данное напряжение не меняется для транзисторов одного типа, однако для другого типа может оказаться другим. Изменение этого параметра существенно влияет на пороговое напряжение детектора.

Как показывает формула, пороговое напряжение V_T зависит от R1 и R2. Номинал резистора R1 должен быть менее 200 кОм (для коэффициента передачи тока h_{FE} порядка 100). Это гарантирует, что ток базы VT1 не исказит напряжение делителя R1, R2.

У МК AVR вход RESET имеет внутренний подтягивающий резистор R5, номинал которого равен 100-500 кОм. Когда транзистор VT1 закрывается, внутренний подтягивающий резистор и резистор R3 образуют делитель. Результирующее напряжение на входе RESET должно быть достаточно низким, чтобы логический уровень воспринимался как низкий. Рекомендуется использовать резистор R3 номиналом 50 кОм и менее, что обеспечивает напряжение на входе RESET $1/3V_{CC}$ и менее.

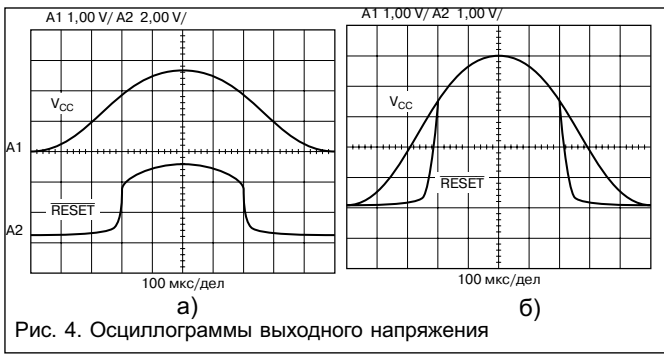
Если требуется кнопка сброса и/или возможность внутрисхемного программирования, последовательно с выходом должен быть включен резистор R4, как показано на рис. 3, б. Этот резистор позволяет программатору в противодействие VT1 установить на входе RESET низкий уровень. Для гарантии правильной работы монитора питания общее сопротивление последовательно соединенных резисторов R3 и R4 не должно превышать рекомендованные 50 кОм.

Так как пороговое напряжение определяется в основном резисторами R1 и R2, погрешность этих резисторов напрямую влияет на точность порогового напряжения. Рекомендуется выбирать резисторы с допуском $\pm 1\%$.

Из-за медленных переходов выходного напряжения детектора отклонение порога входа RESET AVR приведет к погрешности порогового напряжения. Это отклонение составляет $\pm 0,15$ В, что соответствует $\pm 3\%$ в 5-вольтовой системе ($\pm 5\%$ для 3 В). Связанная с этим погрешность может быть снижена выбором транзистора VT1 с большим h_{FE} , что приведет к увеличению скорости переходов выходного напряжения.

Потребляемый ток в режиме нормальной работы (при достаточно высоком напряжении V_{CC}) может быть найден следующим образом:

$$I \approx \left(\frac{V_{CC}}{(R1+R2) \parallel R3} \right) = V_{CC} \left(\frac{1}{R1+R2} + \frac{1}{R3} \right).$$



Когда кнопка сброса или программатор удерживает низкий уровень на входе RESET, то потребляемый ток возрастает до величины

$$I \approx \frac{V_{CC}}{(R1+R2) \parallel R3 \parallel R4 \parallel R_{RESET}}$$

Когда напряжение питания падает до того уровня, когда срабатывает детектор, транзистор VT1 закрывается, а ток падает до значения

$$I \approx \frac{V_{CC}}{(R1+R2) \parallel (R3+R4+R_{RESET})}$$

Вариант 3: интегральная реализация

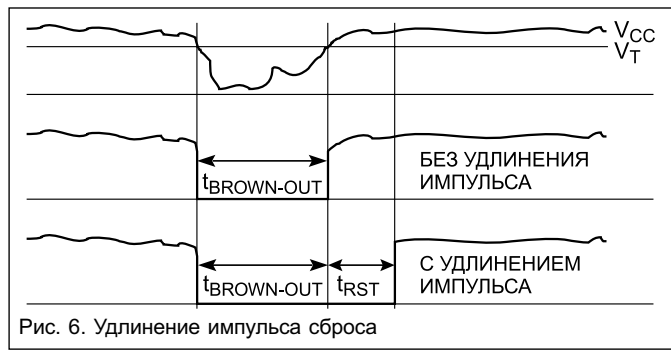
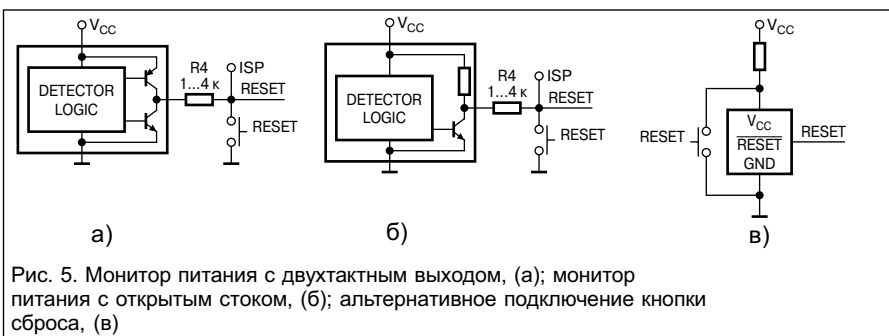
Характеристики:

- легкий монтаж;
- очень точное пороговое напряжение;
- низкая потребляемая мощность;
- маленькая занимаемая площадь на плате;
- малое количество компонентов;
- разнообразие дополнительных функций.

В настоящее время доступен большой выбор подобных микросхем от разных производителей, начиная от трехвыводных мониторов питания с фиксированным порогом, до совершенных схем, содержащих сторожевые таймеры и схемы задержки для сброса по включению питания (power on reset, POR). Поскольку МК семейства AVR имеют встроенный сторожевой таймер и схему POR, то эти функции внешних схем для них не требуются.

В большинстве интегральных схем точность порога лучше 1%. Потребление лежит в микроамперном диапазоне. Требуется только убедиться, что выбранная микросхема имеет низкий активный уровень сброса. Доступны разнообразные корпуса таких микросхем, начиная с миниатюрного SOT-23, заканчивая корпусами с большим количеством выводов.

Выходной каскад микросхемы монитора питания может быть двухтактным или с открытым стоком (открытым коллектором) для КМОП или ТТЛ выходных уровней. Открытый сток позволяет наиболее просто подключить кнопку сброса или внутрисхемный программатор. Эта возможность может быть реализована и с двухтактным каскадом, только



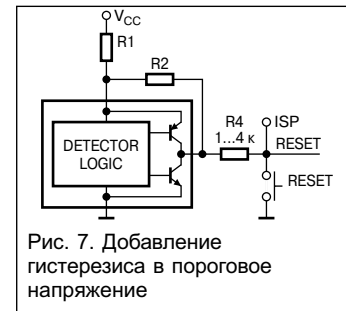
в этом случае потребуется дополнительный резистор последовательно с выходом. Кнопка сброса или внутрисхемный программатор подключается между резистором и входом RESET AVR (рис. 5, а и б).

Дополнительной функцией, которую имеют некоторые такие микросхемы, является удлинение импульса сброса (рис. 6). Сброс удерживается активным на протяжении некоторого промежутка времени после того, как было выполнено условие перехода в нормальный режим работы (сброс по включению питания, сброс по падению напряжения питания и т. д.). Некоторые из микросхем обеспечивают эту возможность и для ручного сброса. Для этого проверяется состояние выхода с целью определения замыкания и размыкания кнопки сброса. Когда кнопка отпускается, микросхема сохраняет уровень сброса активным на протяжении некоторого промежутка времени. Но, с другой стороны, эта возможность может оказаться помехой для внутрисхемного программатора, который активно пользуется входом RESET.

Некоторые интегральные стабилизаторы напряжения содержат детектор падения напряжения, сочетая две функции в одной микросхеме. Это уменьшает общее количество компонентов и увеличивает функциональность порой без увеличения стоимости.

Некоторые системы содержат батарею, которая обеспечивает питание при падениях напряжения основного источника питания. Стабилизатор напряжения такой системы часто вырабатывает сигнал состояния для МК, который сообщает, от какого источника производится в данный момент питание. Подключение этого сигнала на RESET будет останавливать AVR во время работы от батареи, прерывая выполнение программы, но сохраняя содержимое ОЗУ. С другой стороны, если подать этот сигнал на вход порта, AVR сможет протестировать событие перехода на резервный источник питания и выполнить процедуру безопасного выключения, обесточив устройства с высоким потреблением (электродвигатель, дисплей и т. д.) перед входом в режим power-down. Дело в том, что потребление при активном сигнале RESET такое же, как и в нормальном рабочем режиме, в то время как потребление в режиме power-down лежит в микроамперном диапазоне. Когда напряжение основного источника питания вернется к нормальному значению, AVR сможет продолжить выполнение программы.

Гистерезис может либо уже присутствовать в микросхемах мониторов питания, либо может быть добавлен с помощью внешней схемы (рис. 7). Это предотвращает дребезг на выходе микросхемы при



Гистерезис может либо уже присутствовать в микросхемах мониторов питания, либо может быть добавлен с помощью внешней схемы (рис. 7). Это предотвращает дребезг на выходе микросхемы при

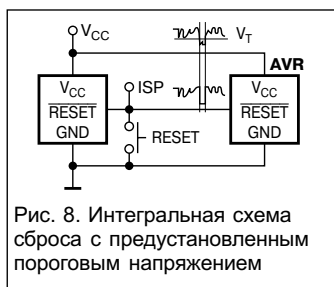


Рис. 8. Интегральная схема сброса с предустановленным пороговым напряжением

работе в приложениях с батарейным питанием.

Некоторые микросхемы позволяют задавать пороговое напряжение V_T с помощью внешних элементов⁴, в то время как другие микросхемы имеют фиксированный порог. Реализация микросхемы с фиксированным пороговым напряжением показано на рис. 8.

Типичное включение микросхемы, пороговое напряжение которой задается внешними элементами, показано на рис. 9. Эта микросхема имеет встроенный источник опорного напряжения и компаратор. Если напряжение на входном выводе становится меньше опорного напряжения, активизируется выход. Пороговое напряжение задается с помощью простого делителя на резисторах R1 и R2.

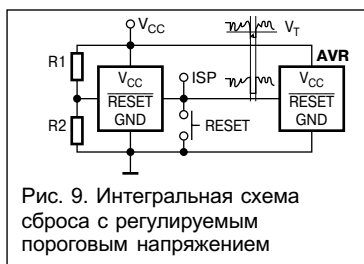


Рис. 9. Интегральная схема сброса с регулируемым пороговым напряжением

Примеры интегральных мониторов питания с фиксированным пороговым напряжением приведены в табл. 1.

По материалам фирмы Atmel
Перевод Леонида Ридико
wubblick@yahoo.com

¹ Несмотря на то, что во время действия сигнала сброса состояние SRAM сохраняется, после падения напряжения питания корректность содержимого памяти не гарантируется, т. к. она не является энергонезависимой (прим. переводчика).

² AVR Mega163 уже имеет такую возможность (прим. переводчика).

³ Есть возможность построить монитор питания с хорошей точностью порогового напряжения. Для этого можно применить микросхему стабилизатора TL431. Стоимость такого монитора тем не менее будет намного ниже, чем у интегрального (прим. переводчика).

⁴ Некоторые микросхемы мониторов позволяют выбирать порог из нескольких предустановленных значений с помощью логических входов (прим. переводчика).

Таблица 1

Тип	Производитель	Возможности	Поддержка ISP
MAX809	MAXIM	Фиксированное удлинение импульса	+
MAX811	MAXIM	Фиксированное удлинение импульса, низкое потребление, ручной сброс	+
MAX821	MAXIM	Регулируемое удлинение импульса, низкое потребление	+
DS1811	MAXIM	Фиксированное удлинение импульса	+
DS1813/18	MAXIM	Фиксированное удлинение импульса, монитор состояния выхода	-
V6301	EM-Marin	Фиксированное удлинение импульса, низкое потребление, низкая стоимость	+
V6340	EM-Marin	Нет удлинения импульса, низкая стоимость	+