

Интегрированные схемы управления усилителями мощности в базовых станциях

и схемы управления на дискретных
компонентах Analog Devices

В этой статье обсуждаются составные части схемы управления и мониторинга усилителя мощности на базе дискретных компонентов, а также решение в виде интегрированной микросхемы.

Лайам Райордан (Liam Riordan)
liam.riordan@analog.com
Перевод: Александр Сотников

Введение

Усилитель мощности (УМ) вносит доминирующий вклад в такие показатели сигнального тракта базовых станций беспроводных систем связи, как рассеиваемая мощность, линейность, КПД и стоимость. Мониторинг и управление характеристиками УМ базовых станций делает возможной максимизацию выходной мощности при достижении оптимальных значений линейности и КПД. Компания Analog Devices выпускает широкий спектр компонентов, которые идеально подходят для решения подобных задач. Многоканальные цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), аналого-цифровые преобразователи (АЦП), датчики температуры и тока, а также однокристальные интегрированные решения применяются в базовых станциях для мониторинга и управления

разнообразными аналоговыми сигналами. Дискретные датчики и преобразователи данных обеспечивают наилучшие характеристики и максимальную гибкость конфигурации, в то время как интегрированные решения обладают меньшей стоимостью, меньшими размерами и большей надежностью. Оптимизация КПД базовых станций по мощности является ключевым вопросом с точки зрения защиты окружающей среды для компаний, работающих в сфере телекоммуникационной промышленности. Прилагаются значительные усилия, направленные на снижение суммарного энергопотребления базовых станций и, как следствие, уменьшения их воздействия на окружающую среду. Электроэнергия является основным источником повседневных расходов на эксплуатацию базовых станций, и УМ может быть ответственен более чем за половину потребляемой мощности. Таким образом, оптимизация КПД УМ по мощности улучшает его рабочие характеристики, снижает вред, наносимый окружающей среде, и приносит экономическую выгоду.

Управление УМ при помощи дискретных компонентов

На рис. 1 показана базовая схема каскада усиления мощности на основе транзистора, выполненного по технологии металл-оксид-полупроводник с поперечной диффузией (lateral-diffused metal-oxide semiconductor — LDMOS). Оптимальные условия смещения транзистора УМ определяются путем поиска компромиссного варианта между линейностью, КПД и усилением. Поддержание тока смещения стока на оптимальном уровне в диапазоне температур и во времени может значительно улучшить суммарные показатели качества УМ, что гарантирует его работу

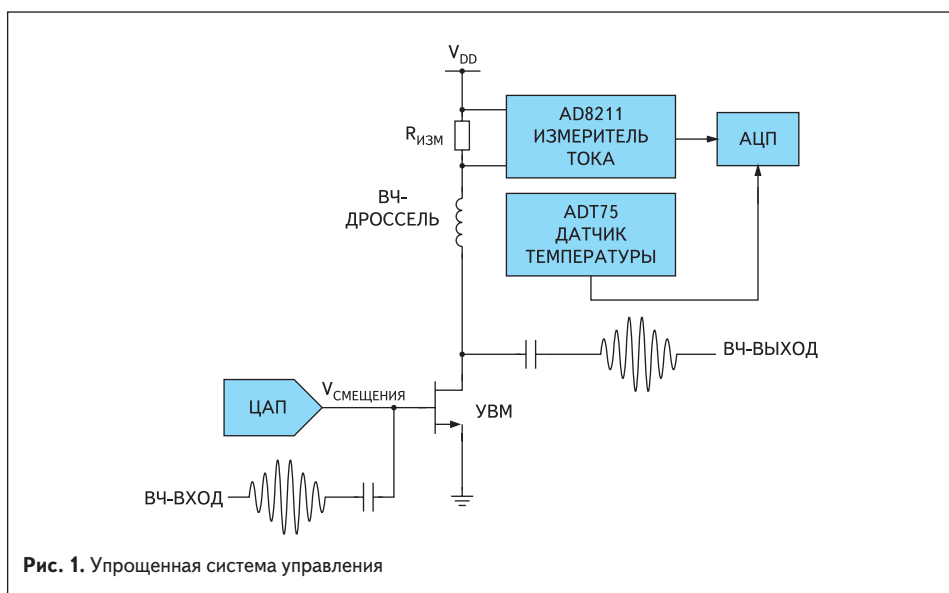


Рис. 1. Упрощенная система управления

в пределах регулируемых уровней выходной мощности. Один из способов управления током смещения затвора заключается в применении резистивного делителя, устанавливающего напряжение на затворе на фиксированном оптимальном уровне, определенном на этапе отладки схемы.

К сожалению, подобное решение с фиксации напряжения на затворе, которое может быть достаточно эффективным с точки зрения стоимости, обладает серьезным недостатком: оно не учитывает изменения условий окружающей среды, разброс технологических параметров при производстве и флуктуации напряжения питания. Два основных фактора, воздействующих на ток смещения стока УМ, — это изменения напряжения в цепи положительного питания и температуры на кристалле.

Лучшим подходом является динамическое управление напряжением на затворе транзистора УМ, которое можно обеспечить применением алгоритма цифрового управления, измеряющего ток стока, оцифровывающего его с помощью АЦП и устанавливающего требуемое смещение с помощью ЦАП или, при некотором ухудшении разрешения, с помощью цифрового потенциометра. Подобная система управления позволяет поддерживать необходимое для достижения оптимальных характеристик смещение УМ, невзирая на изменения напряжения, температуры и других параметров среды, при помощи задаваемых пользователем программируемых контрольных точек.

Ключевым моментом в этом подходе является точное измерение тока, подаваемого на LDMOS-транзистор по цепи положительного питания, которое обеспечивается при помощи резистора, включаемого в эту цепь, и усилителя AD8211. При диапазоне синфазного входного напряжения до +65 В AD8211 обеспечивает фиксированное усиление 20 В/В. Внешний резистор задает значение тока полной шкалы. Выходной сигнал усилителя может быть мультиплексирован на вход АЦП для формирования цифрового сигнала, подаваемого затем на схему мониторинга и управления. Выходное напряжение усилителя, используемого для измерения тока, следует задать таким, чтобы оно было как можно ближе к значению напряжения полной шкалы АЦП. Постоянный мониторинг цепи положительного питания позволяет непрерывно подстраивать напряжение на затворе усилителя мощности даже при появлении импульсных выбросов, обеспечивая оптимальные условия смещения.

Зависимость тока сток-исток LDMOS-транзистора (I_{DS}) от напряжения затвор-исток (V_{gs}) имеет два компонента, зависящих от температуры: средняя подвижность электронов (μ) и пороговое напряжение (V_{th}):

$$I_{DS} = \frac{\mu(T)C_{OX}W}{2L} (V_{gs} - V_{th}(T))^2.$$

С ростом температуры V_{th} и μ уменьшаются, и, следовательно, изменения температуры будут приводить к изменениям выходной мощности. Для мониторинга температур-

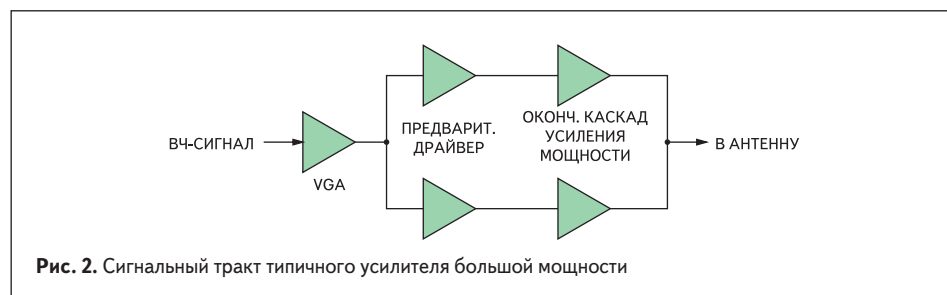


Рис. 2. Сигнальный тракт типичного усилителя большой мощности

ных изменений на плате можно измерять температуру окружающей среды и внутреннюю температуру УМ при помощи одного или нескольких 12-разрядных температурных датчиков ADT75. ИС ADT75 представляет собой полнофункциональную систему мониторинга температуры в 8-выводном корпусе MSOP, которая обладает погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$ в диапазоне температур от 0 до 70°C .

Мультиплексирование выходного напряжения температурного датчика вместе с напряжением, соответствующим измеренному значению тока стока, и другими данными в АЦП позволяет преобразовать замеры температуры в цифровой вид для последующего мониторинга. В зависимости от конфигурации системы может возникнуть необходимость разместить на плате несколько температурных датчиков. Например, если используется два и более УМ или несколько предварительных драйверов во входном каскаде, то применение отдельных датчиков на каждый усилитель повысит эффективность управления системой. Для преобразования аналоговых измерений в цифровые данные при проведении одновременного мониторинга и датчиков тока, и датчиков температуры можно воспользоваться многоканальными 12-разрядными АЦП AD7992, AD7994 и AD7998.

Цифровую информацию, собираемую с датчиков тока и температурных датчиков, можно отслеживать в непрерывном режиме дискретной логикой управления или микроконтроллером. Динамическое управление напряжением на затворе УМ при помощи цифрового потенциометра или ЦАП по результатам мониторинга позволяет поддерживать условия смещения на оптимальном уровне. Разрешение ЦАП будет определяться требуемой степенью точности регулировки напряжения на затворе. Телекоммуникационные компании в проектах базовых станций обычно используют сразу несколько УМ, как показано на рис. 2. Делается это исходя из соображений увеличения гибкости при выборе УМ для каждой ВЧ несущей и возможности оптимизации каждого УМ под конкретный формат модуляции. Кроме того, объединение выходов нескольких параллельно включенных УМ улучшает линейность и общий КПД. В таких случаях для обеспечения требований к усилению и КПД УМ может потребоваться несколько каскадов усиления, состоящих из усилителя с переменным коэффициентом усиления (VGA, variable gain amplifier) и предварительного драйвера. Для управления их усилением и задания

различных настроечных уровней можно применить многоканальный ЦАП.

Для обеспечения точного управления затвором УМ могут применяться 12-разрядные одиночный, сдвоенный и четырехканальный ЦАП — AD5622, AD5627 и AD5625 соответственно. Они имеют внутренние буферы с превосходной нагрузочной способностью, что позволяет в большинстве приложений избежать применения внешних буферов. Комбинация низкого энергопотребления, гарантированной монотонности и быстрого времени установления делает эти компоненты идеальным выбором для точной настройки рабочих уровней.

Для задач, в которых точность не является ключевым параметром и достаточно 8-битного разрешения, можно применить менее дорогие цифровые потенциометры. Такие резисторы с цифровым управлением выполняют те же функции регулировки, что и механические потенциометры или переменные резисторы, но обладают при этом более высокой точностью, надежностью, характерной для полупроводниковых компонентов, и превосходными температурными характеристиками. Энергонезависимые и однократно программируемые (OTP, one-time-programmable) цифровые потенциометры идеально подходят для ВЧ-систем с организацией дуплексной передачи по принципу разделения во времени (TDD, time-division duplexing), где УМ отключается на период приема и включается фиксированным напряжением, подаваемым на затвор, на период передачи. Заранее запрограммированное значение напряжения запуска сокращает задержку включения и улучшает КПД при включении транзистора УМ в фазе передачи сигнала. Возможность отключения транзистора УМ в фазе приема предотвращает искажение принимаемого сигнала шумом цепи передатчика и улучшает общий КПД УМ. Для решения этой задачи существует большое количество разнообразных потенциометров, и выбор конкретного устройства определяется количеством каналов, типом интерфейса, разрешением и требованиями к энергонезависимой памяти. Например, для задания рабочих уровней в ВЧ-усилителях хорошо подходит 256-позиционный однократно программируемый двухканальный потенциометр с интерфейсом I²C — AD5172.

Для поддержания оптимальных значений линейности и КПД при мониторинге и управлении коэффициентом усиления требуется обеспечить точное измерение уровней мощности ВЧ-сигналов сложной формы на выходе УМ. Детектор среднеквадратической мощности TruePowr AD8362 обладает

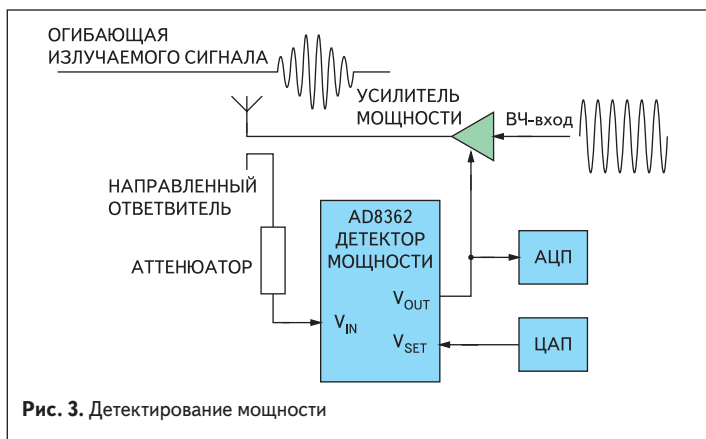


Рис. 3. Детектирование мощности

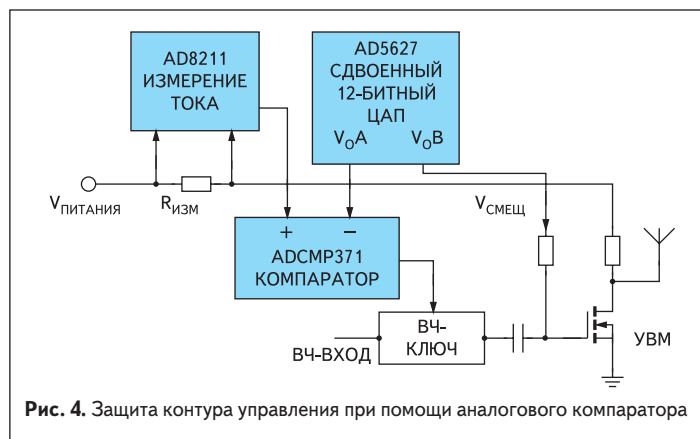


Рис. 4. Защита контура управления при помощи аналогового компаратора

динамическим диапазоном 65 дБ на частотах от 50 Гц до 3,8 ГГц, что позволяет очень точно измерять среднеквадратическую мощность ВЧ-сигналов, характерных для базовых станций сотовых систем связи W-CDMA, EDGE и UMTS.

На рис. 3 выход детектора мощности V_{OUT} подключен к выводу управления усилением УМ. Сигнал с выхода УМ поступает на антенну. Часть выходного сигнала снимается при помощи направленного ответвителя, ослабляется на заданное значение и подается на детектор мощности. Выходной сигнал детектора мощности, являющийся мерой среднеквадратического уровня выходного сигнала передатчика, сравнивается со значением V_{SET} , запрограммированным при помощи ЦАП, и коэффициент усиления УМ подстраивается таким образом, чтобы разность между двумя напряжениями стала равна нулю. Таким образом, V_{SET} точно задает величину коэффициента усиления по мощности. Оцифрованное значение сигнала V_{OUT} поступает в цепь обратной связи, которая может, отслеживая уровень излучаемой мощности на основании измерений AD8362 с выхода АЦП, управлять значением V_{SET} и коэффициентом усиления системы. Подобный метод регулировки усиления можно использовать также для усилителей с переменным усилением, которые при-

меняются в предшествующих усилителю мощности каскадах сигнального тракта. Для одновременного измерения мощностей передаваемого и принимаемого сигналов можно воспользоваться двохканальным детектором AD8364, одновременно измеряющим уровни двух входных сигналов сложной формы. В системах, где усилителю мощности предшествует VGA или предварительный драйвер и допускается применение только одного детектора мощности, усиление одного из устройств фиксируется, а V_{OUT} подается на управляющий вход второго устройства. Если в процессе работы контура управления обнаруживается, что ток в цепи питания слишком велик, то контур посылает в ЦАП команду для уменьшения напряжения на затворе или отключения УМ. Однако в некоторых приложениях при появлении в цепи положительного питания бросков напряжения или неприемлемо высоких токов время, затрачиваемое цифровым контуром управления на считывание значения тока, преобразование его в цифровую форму и обработку оцифрованных данных, может быть слишком велико для предотвращения повреждения устройства.

Для управления ВЧ-сигналом на УМ может быть применена аналоговая схема на базе компаратора ADCMP371 и ВЧ-ключа, которая показана на рис. 4. Выходное напряжение

усилителя, считывающего ток, сравнивается непосредственно с фиксированным напряжением, которое задается при помощи ЦАП. Если на выходе измерителя тока из-за броска тока или напряжения появляется напряжение, превышающее заданную фиксированную величину, то компаратор может переключить сигнал на управляющем выводе ВЧ-ключа для прекращения подачи ВЧ-сигнала на затвор УМ практически мгновенно, предотвратив повреждение УМ. Такое непосредственное управление без применения цифровой обработки намного быстрее и обеспечивает лучшую защиту, чем цифровой контур управления.

Объединив обсуждавшиеся выше элементы, мы получим типовую систему мониторинга и управления УМ, составленную из дискретных компонентов, которая показана на рис. 5. В этом примере единственным объектом мониторинга и управления является УМ, однако схожий принцип будет распространяться и на любые другие усилители сигнального тракта. Всеми дискретными компонентами в схеме управляет единственный контроллер по одной шине I²S.

В зависимости от требований, предъявляемых к сигнальному тракту, для увеличения суммарного коэффициента усиления сигнала по мощности может потребоваться несколько усилителей в предварительных и основных каскадах усиления. К несчастью, эти дополнительные каскады усиления мощности оказывают негативный эффект на суммарный КПД УМ, поэтому для минимизации ухудшения КПД и оптимизации характеристик необходимо также отслеживать и управлять преддрайверами. Например, для мониторинга температуры, мощности и уровней напряжения VGA, двух преддрайверов и двух УМ, которые используются для усиления сигнала на рис. 2, пользователю потребуется достаточно большое количество дискретных компонентов.

Интегрированная схема мониторинга и управления

Для решения проблемы увеличения количества компонентов компания Analog Devices разработала микросхему AD7294 — интегрированную систему мониторинга и управления (рис. 6). Она содержит на одном кристалле все узлы, которые необходимы для типо-

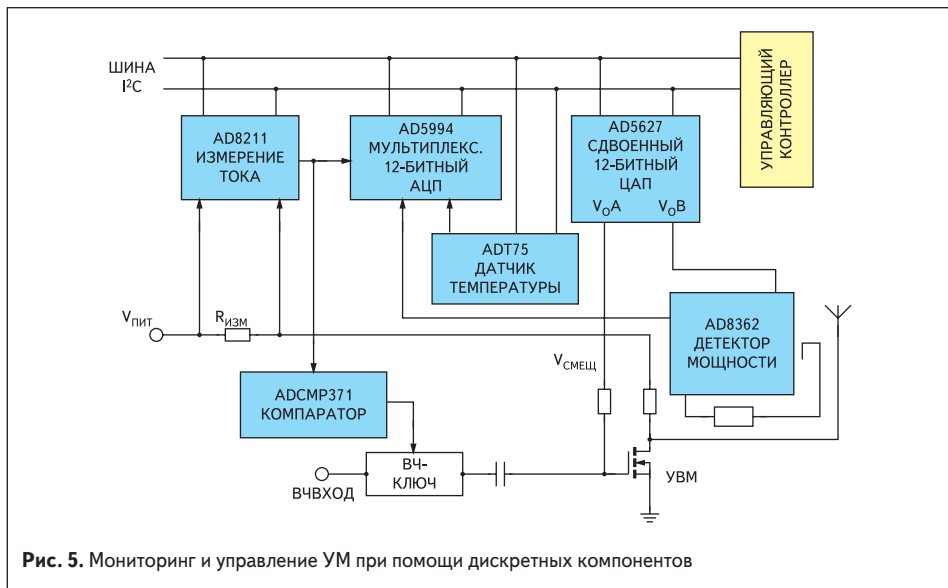


Рис. 5. Мониторинг и управление УМ при помощи дискретных компонентов

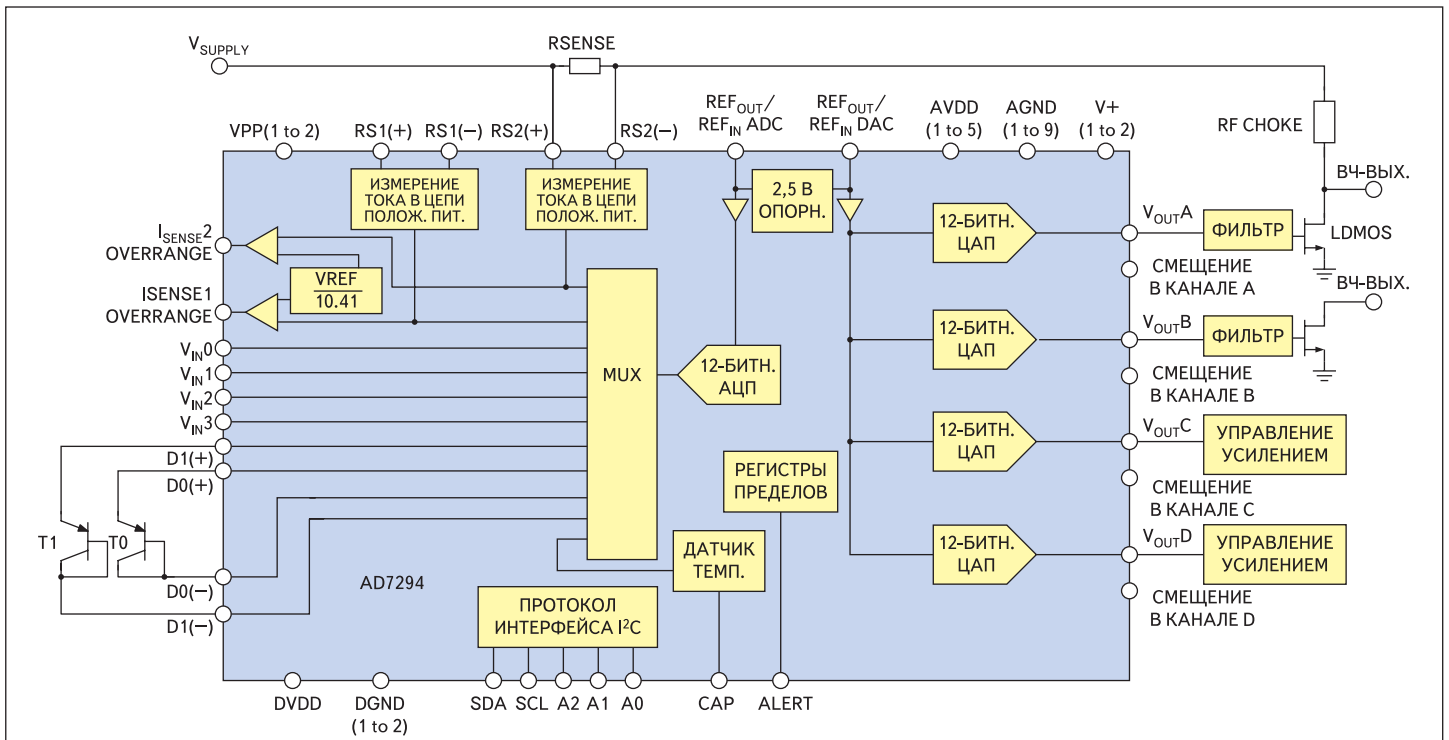


Рис. 6. Интегрированное решение для мониторинга и управления каскадами УМ

вых задач мониторинга тока, напряжения и температуры.

Микросхема AD7294 состоит из 9-канального 12-разрядного АЦП и 4-канального ЦАП с втекающим/вытекающим током 10 мА. Она производится по технологии DMOS 0,6 мкм, что позволяет датчику тока работать с синфазными уровнями вплоть до 59,4 В. АЦП имеет два выделенных канала измерения тока, два канала измерения температуры «внешняя среда–переход», один канал для измерения внутренней температуры кристалла и четыре неспециализированных входа.

Дополнительным плюсом каналов ЦАП в микросхеме AD7294 является наличие регистра гистерезиса и регистров верхнего и нижнего пределов сигнала (которые также имеются в микросхемах AD7992/AD7994/AD7998). Пользователь может запрограммировать верхний и нижний пределы для сигнала в канале АЦП, и при его выходе за эти пределы будет выдан флаг оповещения. Регистр гистерезиса дает пользователю дополнительную возможность определять точку сброса флага оповещения при нарушении границ диапазона входного сигнала. Гистерезис предотвращает непрерывное переключение флага оповещения при считывании температуры или тока в условиях высоких шумов.

Аналогово-цифровые преобразования могут быть инициированы двумя способами. Режим команд позволяет пользователю выполнять преобразование в канале или последовательности каналов по требованию. В режиме autoscale преобразование в последовательности заранее заданных каналов осуществляется автоматически, и выдаются только сигналы оповещения при нарушении верхней или ниж-

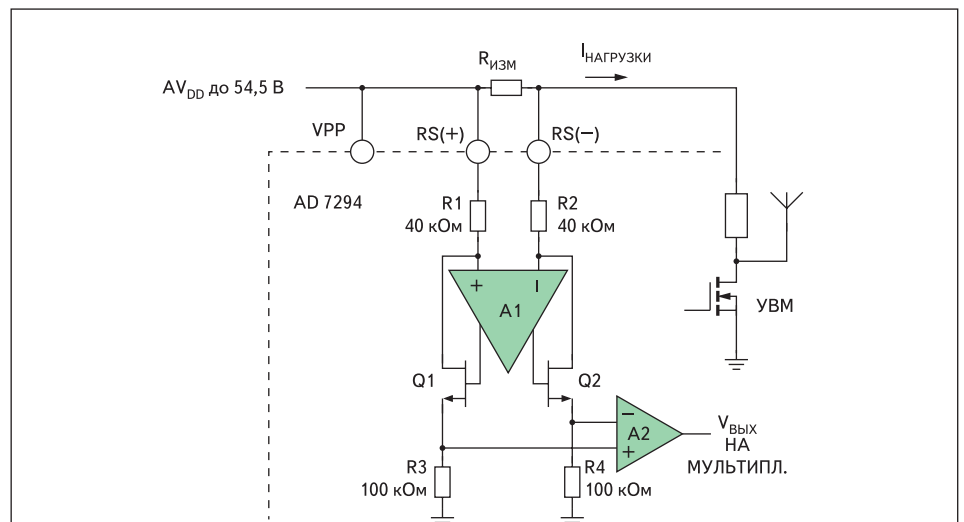


Рис. 7. Подробная схема измерения тока в положительном проводе в составе AD7294

ней границы диапазона. Этот режим отлично подходит для мониторинга реальных систем, и особенно для непрерывного мониторинга мощности сигнала или тока.

В микросхеме интегрированы два усилителя для считывания тока (рис. 7). При протекании тока стока УМ через шунтирующий резистор небольшое дифференциальное входное напряжение усиливается. Интегрированные усилители подавляют синфазные напряжения вплоть до 59,4 В и выдают усиленный аналоговый сигнал на один из мультиплексируемых каналов АЦП. Оба усилителя имеют фиксированный коэффициент усиления, равный 12,5, и работают от внутреннего опорного напряжения смещения выхода, равного 2,5 В. Каждый из усилителей сопровождается аналоговым компаратором,

который обнаруживает сбои при превышении порога, заданного по уровню 1,2×напряжение полной шкалы.

Четыре 12-разрядных АЦП вырабатывают напряжение, задаваемое цифровым кодом (с разрешением 1,2 мВ), для управления токами смещения транзисторов УМ. Они также могут использоваться в задаче формирования управляющих напряжений для усилителей с переменным коэффициентом усиления. Каждый из этих преобразователей представляет собой тонкопленочный монотонный по определению 12-разрядный ЦАП «цепочечного» типа (string DAC) с опорным напряжением 2,5 В и размахом выходного напряжения 5 В. Выходной буфер ЦАП подключен к выходному каскаду цепи положительного питания. Изменяя входное

смещение, выходной диапазон ЦАП можно сместить в любой интервал в пределах от 0 до 15 В. Это дает пользователю возможность обеспечить 12-разрядную точность при размахе сигнала 5 В и при этом подавать напряжение смещения до 15 В. Это актуально в связи с тенденцией к повышению значений управляющего напряжения на затворе транзисторов в каскадах УМ. Кроме того, буферы этих четырех ЦАП обеспечивают входные и выходные токи до 10 мА, и это позволяет отказаться от внешних буферов.

Заключение

Производители УМ разрабатывают устройства со все более сложными входными трактами, применяя различные сочетания каскадов усиления и методов управления. Выпускаемые компанией Analog Devices семейства многоканальных АЦП и ЦАП, а также аналоговых ВЧ-компонентов хорошо подходят для построения самых разнообразных архитектур, что дает возможность разработчикам реализовывать на их основе распределенные системы управления, эф-

фективные с финансовой точки зрения. В качестве альтернативы можно использовать однокристалльные решения, наподобие AD7294, которые обеспечивают значительный выигрыш по площади, занимаемой на печатной плате, надежности и стоимости системы. Наличие большого спектра дискретных компонентов и составных частей интегрированных систем также значительно увеличивает возможности разработчиков, создающих свои собственные нестандартные схемы усиления мощности. ■