

УДК 621.38

КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ ВЫХОДНЫМИ КАСКАДАМИ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Р. А. ЖЕРНОСЕКОВ, аспирант БГУИР
Д. Г. ГАРЕЛИК, ведущий инженер ОАО «БЕЛЛИС»

В статье авторы рассматривают важность работы выходных каскадов передающих устройств в современных системах связи. С появлением сложных и многоуровневых цифровых систем передачи данных возросли требования к коэффициенту полезного действия, рассеиваемой мощности, линейности и экономической эффективности этих устройств. Управление и мониторинг функционирования выходного каскада радиопередатчика позволяют достичь максимальной мощности при соблюдении требуемых качественных показателей. Приведены методы установки статического и динамического смещения в цепи стока LDMOS-транзисторов. Оценены преимущества и недостатки приведенных методов с точки зрения качества и доступности реализации.

Ключевые слова: АЦП, ЦАП, LDMOS, GaN.

ВВЕДЕНИЕ

В наше время в современных системах связи работа выходных каскадов передающих устройств имеет большое значение для передачи конечному адресату качественной информации. С приходом сложных и многоуровневых цифровых систем передачи данных эти требования драматично возросли. К таким требованиям обычно относят коэффициент полезного действия выходного каскада, рассеиваемую мощность, линейность и экономическую эффективность. Управление и мониторинг функционирования выходного каскада радиопередатчика позволяют сделать возможным достижение целевого максимального значения мощности при получении искомого качественного показателя линейности и КПД.

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БАЗА РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В цифровых системах связи наряду с датчиками тока, напряжения, температуры, коэффициента бегущей волны широкое применение находят многоканальные цифро-аналоговые преобразователи, аналого-цифровые преобразователи, а также однокристалльные интегрированные решения SoC (System-on-Chip – система на кристалле). Широко применяются в выходных каскадах передающих устройств транзисторы, выполненные по технологии LDMOS (Lateral-diffused metal-oxide semiconductor), т. е. по технологии «металл – оксид – полупроводник» с поперечной диффузией. Структура LDMOS-транзистора представлена на рисунке 1.

Современные технологии производства транзисторов для широкого перечня усилителей мощности создаются на основе не только устаревших и хоро-

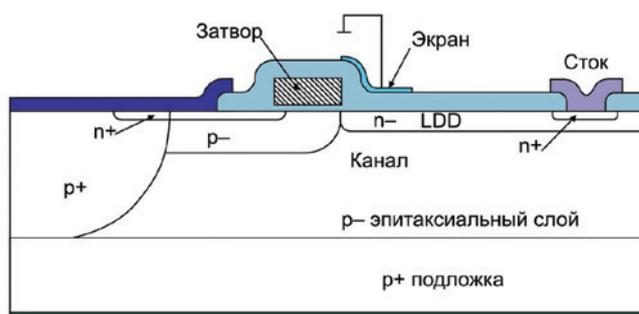


Рисунок 1. Структура LDMOS-транзистора

шо показавших себя технологий полупроводников Si-BJT, VDMOS, но и более современных технологиях, таких как GaN-on-SiC HEMT (нитрид-галлиевые ПВПЭ-транзисторы на подложках из карбида кремния). Структура данного типа полупроводникового прибора приведена на рисунке 2.

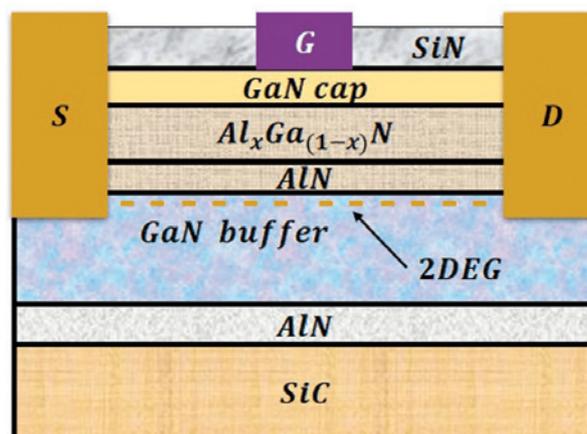


Рисунок 2. Структура GaN-on-SiC-транзистора

В зависимости от используемого диапазона рабочих частот, узкополосного или широкополосного усиления, коэффициента полезного действия, линейности, а также ряда других требований каждая из описанных выше транзисторных технологий обладает своими преимуществами, которые важны в зависимости от сферы применения. Появление данных технологий обуславливается необходимостью использования различных методов контроля и качества работы выходных каскадов усилителей мощности.

МЕТОДЫ УСТАНОВКИ СМЕЩЕНИЯ LDMOS-ТРАНЗИСТОРА

Для обеспечения надежной и долговременной работы выходного каскада передатчика независимо от сферы его применения необходимо уделять внимание не только проектированию самой усилительной ячейки, но и устройствам, которые обеспечивают такую работу усилительной ячейки/ячеек.

Установка необходимого для работы транзистора смещения напряжения определяется поиском оптимального/компромиссного решения между линейностью, коэффициентом полезного действия и его коэффициентом усиления. Поддержание необходимого смещения на оптимальном уровне в определенном диапазоне температур и в необходимом временном интервале может в значительной степени сказаться на всех качественных показателях работы всего выходного каскада усилителя мощности, что является гарантом его качественной и долговременной работы.

Одним из способов подбора компромиссного уровня смещения является использование в цепи стока резистивного делителя, позволяющего установить необходимую точку смещения на фиксированном

оптимальном уровне, определенном разработчиком на первичном этапе разработки схемы. Упрощенная схема установки напряжения смещения приведена на рисунке 3. Подобное решение не является самым оптимальным, т. к. не учитывает широкий ряд факторов, оказывающих влияние на качественную работу выходного каскада. В первую очередь – условия окружающей среды (радиопередающие устройства могут быть использованы в совершенно разных температурных условиях, что должно быть учтено при разработке), разброс технологических параметров при производстве LDMOS-транзисторов и, наконец, повышенные флуктуации напряжения питания.

ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ СМЕЩЕНИЕМ СТОКА LDMOS-ТРАНЗИСТОРА

Наиболее подходящим решением считается использование динамического управления смещением стока LDMOS-транзистора. Данный способ управления можно реализовать с помощью контроля за током стока транзистора с помощью значения, которое получается при использовании цифро-аналогового преобразователя, или (с ухудшением разрешения) с помощью цифрового потенциометра. Такой способ дает возможность обеспечивать стабильную и долговременную работу при сохранении качественных показателей тракта радиопередатчика. При этом влияние дестабилизирующих факторов сводится к минимуму: изменению температуры, нестабильности напряжения питания и остальным динамически изменяющимся факторам среды.

При данном подходе ключевым моментом является точное измерение тока, подаваемого в цепь стока LDMOS-транзистора. Для контроля за этим параметром

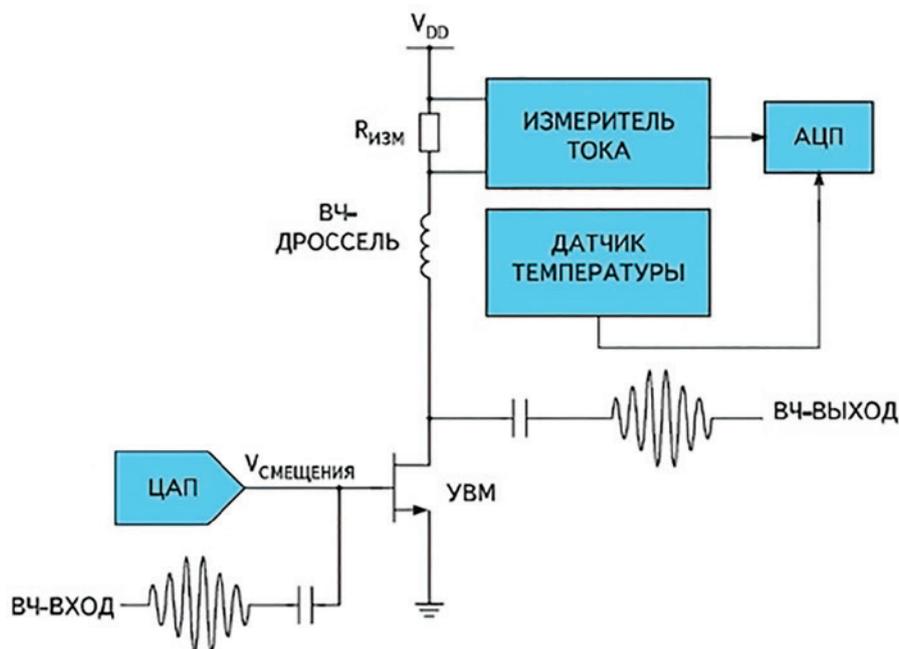


Рисунок 3. Упрощенная схема установки напряжения смещения

тром используют резистор (токовый датчик) в цепи стока, с него получают напряжение, которое может подаваться на усилитель тока и в дальнейшем оцифровываться многоканальным аналогово-цифровым преобразователем. Возможность контроля и управления цепью питания транзистора предоставляет возможность тонко настраивать точку смещения транзистора в широком диапазоне изменений напряжения питания всего устройства.

В транзисторах, выполненных по технологии LDMOS, присутствует высокая зависимость тока «исток – сток» (I_{DS}) от напряжения «затвор – исток» (V_{gs}), что выражается в виде двух компонентов, которые зависят 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 повышением температуры значение таких параметров, как V_{th} и μ , будет уменьшаться таким образом, что это будет приводить к изменениям выходной мощности оконечного каскада радиопередатчика. С этой целью в выходных каскадах усилителя мощности, необходим контроль температуры. Это можно обеспечить с помощью широкого перечня температурных датчиков, например, полупроводниковой термопары, которую можно закрепить непосредственно на радиаторе охлаждения LDMOS-транзисторов. В дальнейшем с набора датчиков (термопар) сигнал будет подаваться на многоканальный аналогово-цифровой преобразователь, для мультиплексирования сигналов. Мультиплексирование выходного напряжения термопары вместе с напряжением, соответствующим измеренному значению тока стока, и другими данными в аналогово-цифровом преобразователе позволяет преобразовать измерение температуры в цифровой вид для последующего контроля.

В зависимости от конфигурации системы разработчиком может возникнуть необходимость разместить на устройстве большее количество термодатчиков (термопар). Например, если используется два и более усилителя мощности или несколько пред-

варительных драйверов во входном каскаде, то применение отдельных термопар на каждый промежуточный усилитель повысит общую эффективность управления системой. Для преобразования аналоговых измерений в цифровые данные при проведении одновременного мониторинга датчиков тока и датчиков температуры чаще всего используются многоканальные аналогово-цифровые преобразователи. Наибольшее распространение получило дельта-сигма преобразование, которое обеспечивает большое разрешение сигнала, отличное соотношение «сигнал – шум» и простоту в использовании.

Цифровую информацию, собираемую с датчиков тока и температурных датчиков (термопар), необходимо отслеживать в непрерывном режиме дискретной логикой управления или специализированным микроконтроллером. Динамическое управление напряжением на стоке LDMOS-транзистора усилителя мощности при помощи цифрового потенциометра или цифро-аналогово преобразователя по результатам мониторинга позволяет поддерживать условия смещения на оптимальном уровне. Разрешение цифро-аналогово преобразователя будет определяться требуемой степенью установки точности регулировки напряжения на стоке LDMOS-транзистора. Производители и разработчики современного телекоммуникационного оборудования в своих проектах цифровых базовых станций и схожего оборудования обычно используют сразу несколько различных усилителей мощности на LDMOS-транзисторах, как показано на рисунке 4.

Делается это исходя из соображений увеличения гибкости при выборе усилителя мощности для каждой высокочастотной несущей и оптимизации каждого усилителя мощности под конкретный формат предпочтительной модуляции. Помимо этого, объединение выходов нескольких параллельно включенных усилителей мощности улучшает линейность и общий коэффициент полезного действия. В таких случаях для обеспечения требований к коэффициенту усиления и КПД усилителя мощности может потребоваться несколько дополнительных каскадов усиления, состоящих из усилителей с пере-

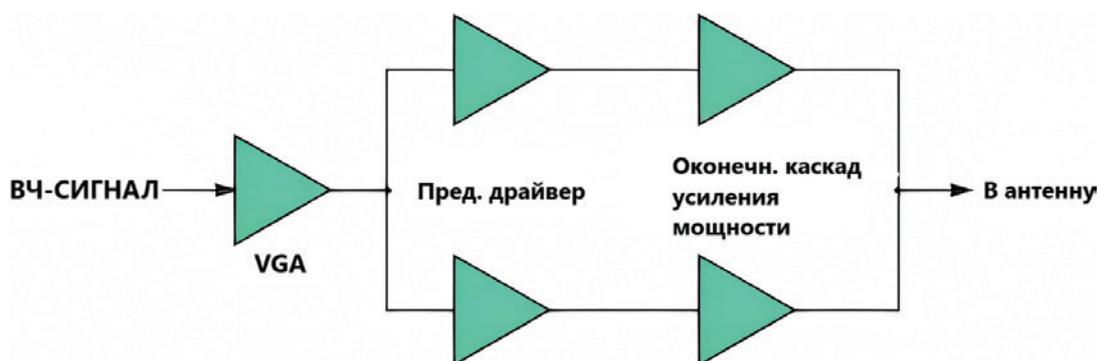


Рисунок 4. Сигнальный тракт усилителя мощности

менным коэффициентом усиления (VGA, Variable Gain Amplifier) и предварительного драйвера. Для управления их усилением и задания различных настроечных уровней можно применить многоканальный цифро-аналоговый преобразователь.

Для применения в усилителях мощности, в которых точность установки напряжения смещения не является ключевым параметром и достаточно 8-битного разрешения, допустимо применение более доступных цифровых потенциометров. Такие резисторы с цифровым управлением выполняют те же функции ступенчатой регулировки, что и механические потенциометры или переменные резисторы, но обладают при этом более высокой точностью установки параметров, надежностью, характерной для полупроводниковых компонентов, и еще отличной температурной стабильностью. Энергонезависимые и однократно программируемые (OTP, One-Time-Programmable) цифровые потенциометры идеально подходят для высокочастотных систем с организацией дуплексной передачи по принципу разделения во времени (TDD, Time Division Duplexing), где усилитель мощности отключается на период приема сигнала и включается фиксированным напряжением, подаваемым на сток, на время передачи. Предварительно запрограммированное значение напряжения запуска сокращает задержку включения и улучшает коэффициент полезного действия при включении транзистора усилителя мощности в фазе передачи сигнала. Возможность отключения транзистора усилителя мощности в фазе приема предотвращает искажение принимаемого сигнала шумом от цепи передатчика и улучшает общий КПД усилителя мощности. Для решения данной задачи существует большое количество разнообразных потенциометров, и выбор конкретного устройства определяется количеством каналов, типом интерфейса, разрешением и требованиями к энергонезависимой памяти.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в текущий момент радиоэлектронная промышленность создала широкий перечень технологий и инфраструктур компонентов, способ-

ных контролировать качественную и долговременную работу выходных каскадов усилителей мощности передающих устройств. Но обилие различных технологий вызывает у разработчиков трудности при подборе комплиментарных компонентов для построения усилителей мощности. Это влечет за собой попытки создать структуры универсальных устройств, которые позволяют сократить номенклатурную базу используемых компонентов и удешевить стоимость конечного продукта. Как следствие, повсеместно применяются интегрированные однокристалльные системы (SoC), содержащие набор необходимых устройств для контроля за параметрами транзисторов в выходных каскадах радиопередатчиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выбор технологии СВЧ-транзисторов для использования в усилителях мощности // СВЧ Электроника [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://microwave-e.ru/components/vybor-tehnologii-svch/>. – Дата доступа: 11.01.2024.
2. Интегрированные схемы управления усилителями мощности в базовых станциях и схемы управления на дискретных компонентах Analog Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wireless-e.ru/components/usiliteli-moshhnosti/>. – Дата обращения: 27.12.2023.
3. Мощные СВЧ LDMOS-Транзисторы АО «НИИЭТ» для средств радиосвязи и радиолокации // НИИЭТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://niiet.ru/m%D0%BE%D1%89%D0%BD%D1%8B%D0%B5-%D1%81%D0%B2%D1%87-ldmos-%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%8B-%D0%B0%D0%BE-%D0%BD%D0%B8%D0%B8%D1%8D%D1%82-%D0%B4%D0%BB%D1%8F/>. – Дата доступа: 15.12.2023.
4. Variable thermal resistance model of GaN-on-SiC with substrate scalability // Research Gate [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/343520407_Variable_thermal_resistance_model_of_GaN-on-SiC_with_substrate_scalability/. – Date of access: 03.01.2024.

In the article, the authors consider the importance of the operation of the output stages of transmitting devices in modern communication systems. With the advent of complex and multi-level digital data transmission systems, the requirements for efficiency, power dissipation, linearity and cost-effectiveness of these devices have increased. Control and monitoring of the functioning of the output stage of the radio transmitter allows you to achieve maximum power while maintaining the required quality indicators. Methods for setting static and dynamic bias in the drain circuit of LDMOS transistors are presented. The advantages and disadvantages of the above methods are assessed in terms of quality and availability of implementation.

Keywords: ADC, DAC, LDMOS, GaN.