

Как упростить проектирование усилителей класса E с использованием синтеза

Мэтт Озалас, Keysight Technologies, Inc.

Создание усилителя мощности класса E может быть сложной задачей. Новый способ проектирования, описываемый в статье, предлагает более простую и быструю альтернативу традиционному подходу.

В нашей повседневной жизни мы всё чаще сталкиваемся с усилителями мощности (УМ), которые уже используются повсеместно: от беспроводных и широкополосных радиопередатчиков до Hi-Fi аудиоаппаратуры. Причина столь широкого использования их заключается в высокой эффективности, обеспечиваемой самим схемотехническим решением УМ класса E, особенно применительно к беспроводным коммуникационным устройствам. Но, к сожалению, имеется и ряд недостатков. В частности, УМ класса E очень сложны в разработке, а их проектирование связано с целым рядом сложностей, решение которых существенно увеличивает срок разработки. Предлагаемый метод синтеза обещает сократить время и упростить сам процесс разработки УМ класса E.

Топология УМ класса E: немного теории

Первоочередным требованием для начала проектирования УМ класса E является четкое понимание принципов его работы. В отличие от привычных нам УМ, класс E, для обеспечения надёжной работы которого следует

учитывать такой параметр, как скважность, подразумевает использование выходного транзистора в роли ключа, коммутирующего подачу основной частоты (см. рис. 1). Последовательный LC-контур на выходе действует как короткозамкнутая цепь для основной частоты и как разомкнутая цепь для гармоник. В результате в цепи протекает синусоидальный ток одной частоты.

Когда ключ замкнут, через него протекает ток I_{sw} , равный сумме постоянного I_{DC} от источника напряжения V_{DC} и переменного, проходящего через LC-контур. Когда ключ разомкнут, переменный ток протекает через конденсатор C1, при этом напряжение представляется как интеграл протекающего тока (см. рис. 1).

Если усилитель спроектирован правильно, то представленная ключевая схема теоретически может иметь КПД равный 100%. Но при этом существует проблема, заключающаяся в том, что амплитуда тока и напряжения может во много раз превышать номинал источника питания (см. рис. 2). Например, если ключ переключается в средней точке (скважность 50%), то пиковые значения тока и напряжения в несколь-

ко раз превышают ток и напряжение источника питания, что в свою очередь может привести к превышению предельных параметров транзистора, и, вследствие этого, к его отказу.

Разработчики стараются избежать описанной ситуации. Поэтому для успешной реализации УМ класса E следует рассчитывать амплитуду тока и напряжения при всех возможных режимах работы. Но сделать это не так просто. Уравнения, описывающие работу УМ класса E и учитывающие зависимость от скважности, получаются громоздкими, а это значит, что их решение представляется в графическом формате или в виде аппроксимации через полином. Часто разработчики вынуждены вручную интерполировать нормализованные значения из полученных графиков, а это может отрицательно сказаться на точности и времени проектирования.

Традиционный подход: моделирование работы УМ при изменении нагрузки

В большей своей массе УМ проектируются с применением простого подбора параметров в зависимости от импеданса нагрузки. Суть методики проста и заключается в изменении импеданса нагрузки в некоторых пределах, построении соответствующих кривых мощности и КПД и фиксации на их основе значения нагруз-

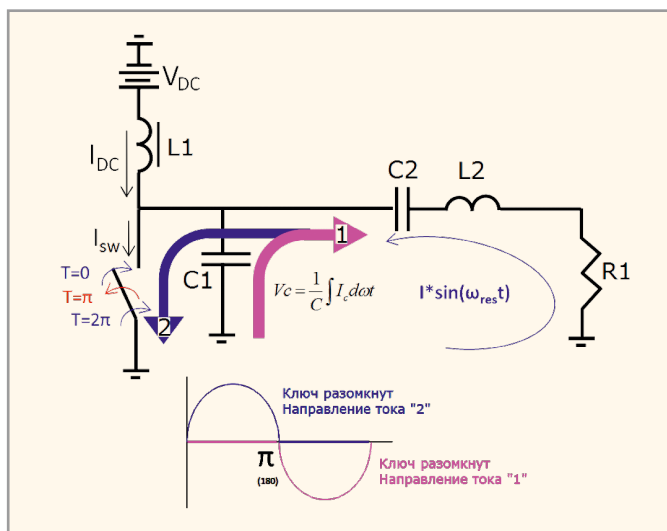


Рис. 1. Типовая схема УМ класса E

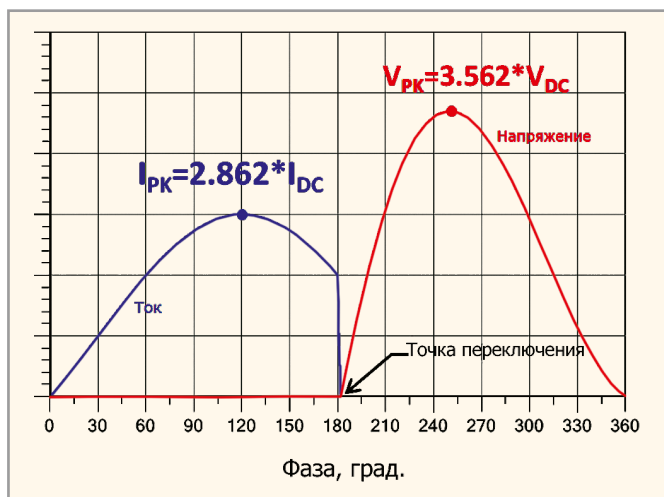


Рис. 2. Амплитуда тока и напряжения при ключевом режиме работы транзистора в схеме УМ класса E

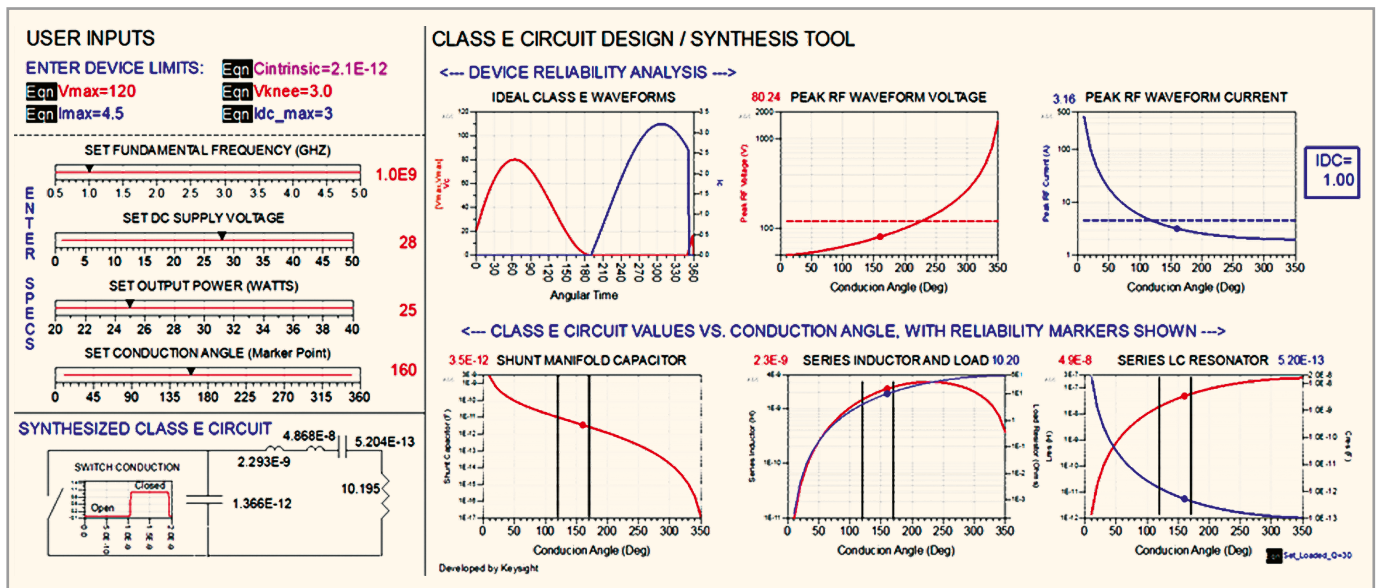


Рис. 3. Рабочая область утилиты синтеза УМ класса E в САПР Keysight ADS

ки, которое обеспечивает требуемые характеристики. К сожалению, эта методика не очень хорошо работает при проектировании сложных ключевых режимов, которые применяются в усилителях класса E.

Характеристики УМ класса E зависят от очень точного согласования импеданса на различных частотах, а также от соотношения уровня входного сигнала и напряжения смещения, которое определяет скважность. Чтобы найти столь специфическую комбинацию простым подбором (например, путём моделирования нагрузки), нужно обработать огромные объёмы данных. И даже если удастся это сделать, нет гарантии, что модель будет адекватна для всех комбинаций напряжения питания и импеданса. Существуют комбинации параметров, при которых разработанную модель применять нельзя, поскольку устройство может быть нестабильно, или саму модель не удастся получить. Поэтому при использовании традиционного подхода разработчики должны обладать высокой квалификацией и профессиональным опытом и чётко интерпретировать полученные в процессе моделирования данные. По этой причине для начального проектирования усилителей класса E желательно использовать более скрупулёзный подход. В чём он должен заключаться?

Новый подход на основе синтеза: более точный и надёжный

Как точно спроектировать усилитель класса E без традиционного модели-

рования и ручной интерполяции графиков нормализованных уравнений? Ответом является интерактивный, основанный на синтезе процесс проектирования, использующий основные принципы для получения очень точного прогнозирования параметров усилителя по начальному набору уравнений и правил. Этот процесс позволяет разработчикам усилителей быстрее достичь начальных условий проектирования.

На первом этапе выполняется синтез схемы полностью на основе уравнений переходных процессов. На втором – схема проверяется с применением идеализированных компонентов схемы УМ. На третьем этапе параметры тока и напряжения во временной области ставятся в соответствие импедансу гармоник в заданной частотной области. В завершение используются средства проектирования для оптимизации схемного решения в соответствии с требуемыми значениями импеданса для нескольких первых гармоник.

Ключевым аспектом этого подхода является выбор инструмента синтеза (см. рис. 3). В идеале этот инструмент должен иметь утилиту, позволяющую интерактивно решать уравнения, описывающие работу УМ класса E, чтобы синтез схемы выполнялся в режиме реального времени на основе исходных данных для проектирования. С помощью такой утилиты разработчик может ввести параметры устройства (например, максимальное напряжение и ток, напряжение насыщения и внутренние паразитные ёмкости) и указать технические характеристики (например, частоту, напряжение питания, выход-

ную мощность и угол проводимости). Затем инструмент синтеза использует эту информацию для синтеза идеальной схемы класса E. Например, САПР Keysight ADS [1] позволяет синтезировать электрическую схему, отображая такие основные параметры, как форма тока и напряжения на транзисторе, включая их анализ с точки зрения области безопасной работы ключа.

Такой инструмент синтеза позволяет строить зависимости тока от угла проводимости и указывать маркерами допустимый диапазон, в котором усилитель может работать надёжно. Углы проводимости между маркерами допустимы, а за пределами маркеров – нет. Если работа при определённом угле проводимости невозможна, разработчику выводится сообщение с предупреждением. Такая гибкость проектирования жизненно важна для обеспечения надёжной работы устройства при одновременном соблюдении заданных характеристик УМ класса E.

Новый подход в действии

Чтобы лучше понять, как именно работает этот четырёхэтапный процесс, рассмотрим пример проектирования УМ класса E на основе GaN СВЧ-транзистора от компании Cree, используя, в том числе, САПР Keysight ADS. СВЧ-транзистор имеет напряжение пробоя 120 В, собственную ёмкость 2,1 пФ, максимальное же значение переменного и постоянного тока составляет 4,5 и 3 А соответственно. Кроме того, модель транзистора, предоставляемая производителем, наиболее полно описывает физическое

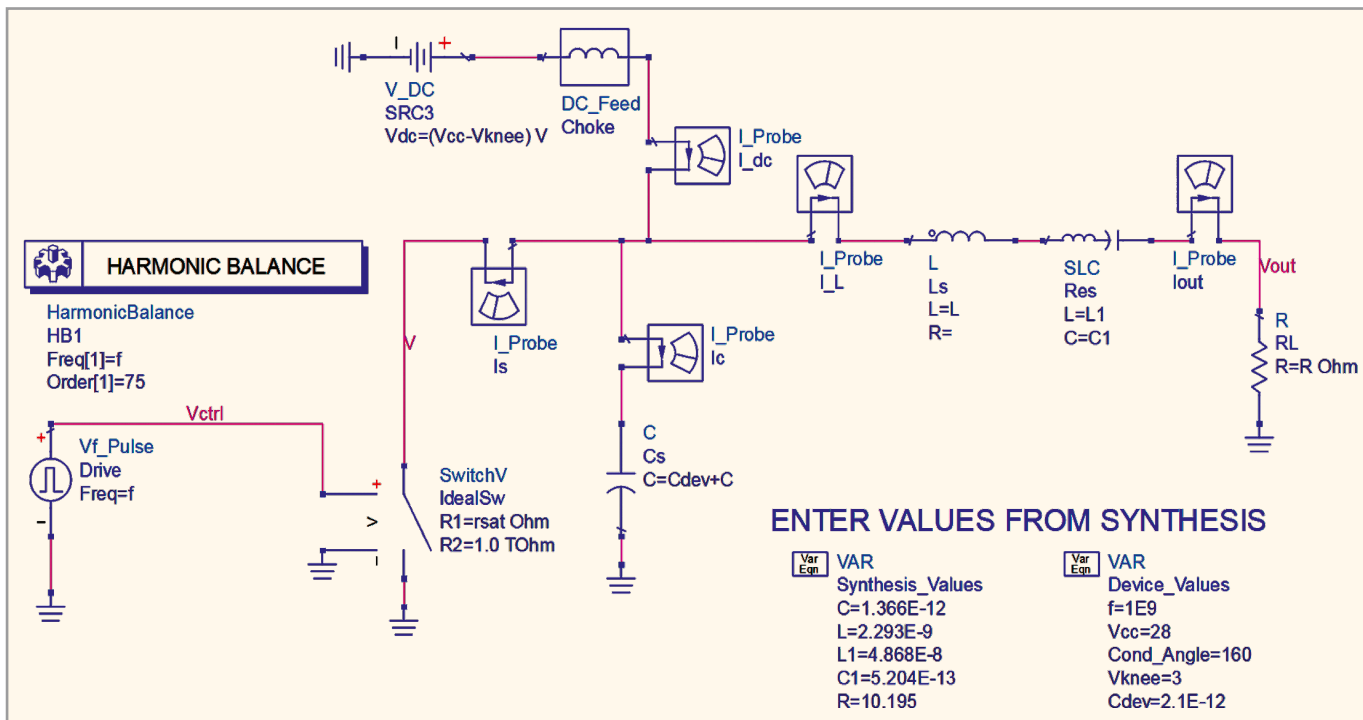


Рис. 4. Синтезированная идеальная схема

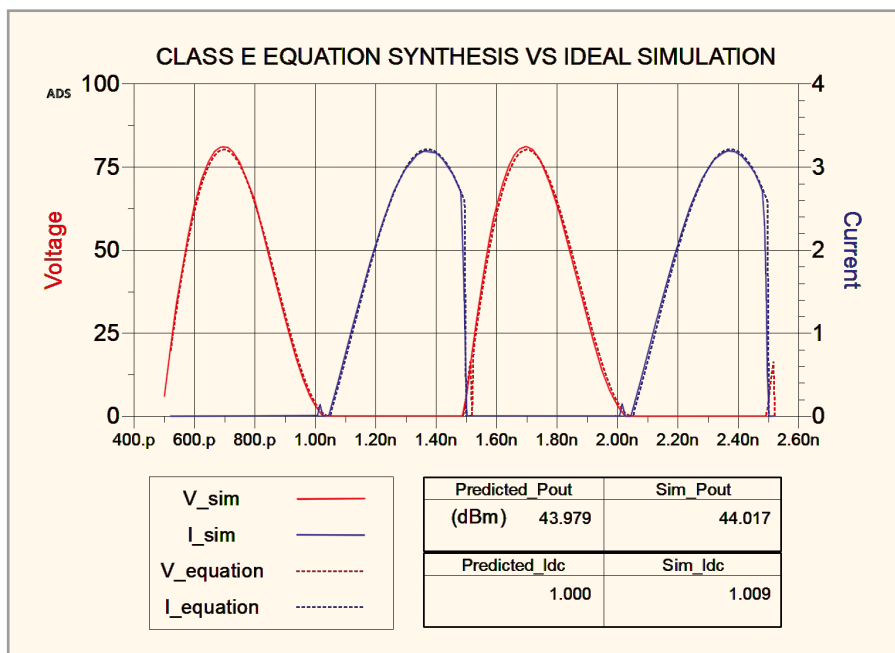


Рис. 5. График проверки синтезированной идеальной схемы (сплошные линии на графике соответствуют результатам моделирования, а пунктирные линии предсказаны по уравнениям синтеза; при этом КПД составляет около 99,9 %)

поведение полупроводникового прибора, что позволяет более точно синтезировать УМ.

Шаг 1: синтез схемы по уравнениям переходного режима

Для создания схемы в САПР ADS вводится область возможных значений параметров для безопасной работы синтезируемого устройства, а также значение собственной ёмкости. Затем с помощью ползунковых регуляторов (см. рис. 3) устанавливается частота

1 ГГц, напряжение источника питания 28 В и выходная мощность 25 Вт. САПР ADS выводит диапазон углов проводимости, который можно использовать для этой схемы. В данном случае он составляет 120–170. Если угол проводимости станет меньше 120, то ВЧ ток превысит предельное значение для устройства. Если угол проводимости превысит 170, то необходимое значение шунтирующего конденсатора станет меньше собственной паразитной ёмкости устройства. Интерактивность

процесса даёт более полное понимание компромиссов и накладываемых ограничений, помогая избежать ошибок на последующих этапах проектирования. В рассматриваемом варианте выбирается угол отсечки 160, и мы получаем идеальную схему класса E (см. рис. 4).

Шаг 2: проверка схемы с помощью идеализированной модели

Целью этой проверки является согласование сигналов переменного тока и напряжения, мощности и постоянного тока так, чтобы затем схему можно было реализовать физически. Всегда полезно сначала проверить схему в идеальной среде, а уже потом переходить к её реализации на реальных компонентах. В данном случае схема проверялась с помощью простых средств моделирования. Транзистор моделировался с помощью ключевого компонента и параметров схемы, взятых из инструмента синтеза, а затем выполнялось моделирование гармонического баланса. Из графика, изображённого на рисунке 5, видно, что результаты моделирования хорошо согласуются с предсказанными. На этом проверка закончена.

Шаг 3: параметры тока и напряжения во временной области ставятся в соответствие импедансу гармоник в заданной частотной области

Для создания реального усилителя идеальная схема дополняется физи-

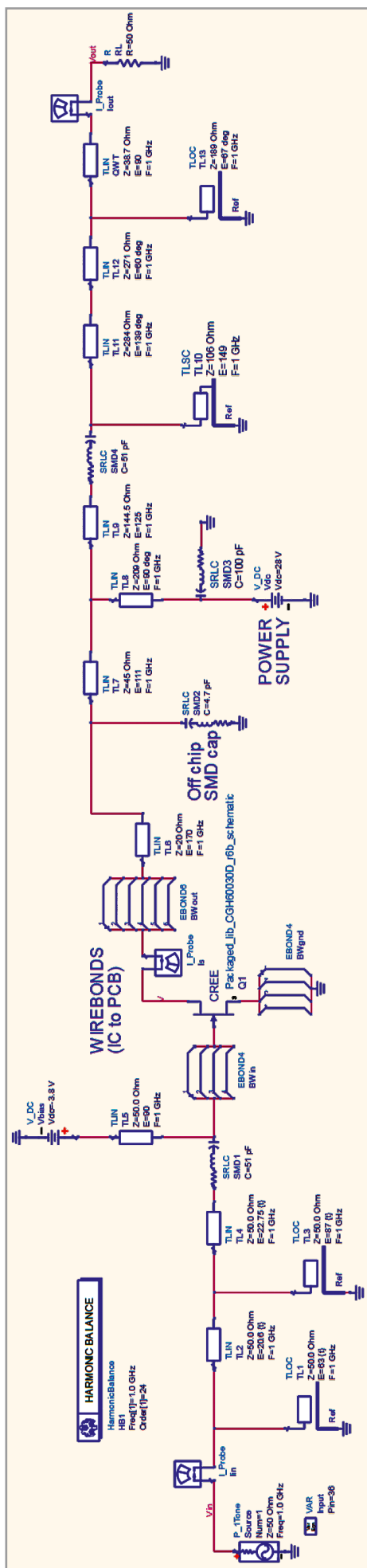


Рис. 6. Синтезированная физическая схема УМ класса E, построенная на базе GaN транзистора компании Cree

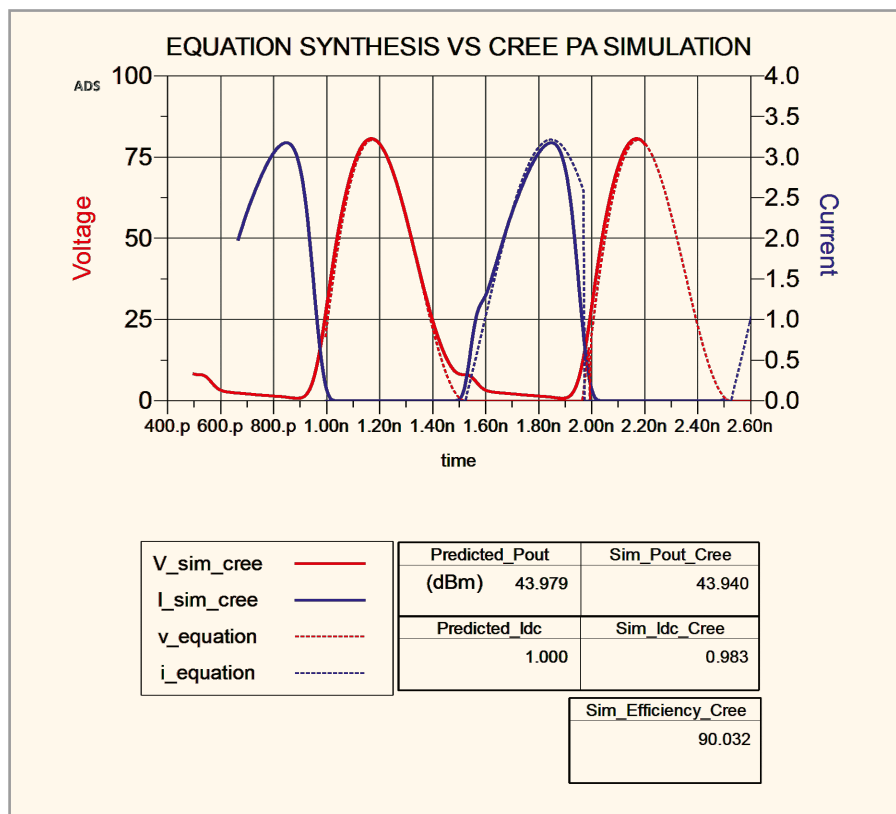


Рис. 7. График соответствия между прогнозом и результатами работы модели схемы УМ класса E

ческими параметрами. Это делается путём применения преобразования Фурье к моделируемым сигналам тока и напряжения усилителя класса E, а затем согласования результирующих гармонических импедансов в частотной области на шаге 4.

Шаг 4: применение средств проектирования для оптимизации схемного решения в соответствии с требуемыми значениями импеданса для нескольких первых гармоник

На этом, последнем, этапе любая полученная ранее схема с требуемым значением импеданса частотных гармоник может быть представлена реальными компонентами. Существует множество схемотехнических решений, которые потенциально могут удовлетворять установленным параметрам. Для проверки полученного решения разработчику обычно достаточно согласовать несколько первых гармоник.

На рисунке 6 показана физическая схема, созданная при выполнении вышеописанных действий. Для подключения к СВЧ-транзистору использовались компоненты EBOND (модель контактных линий подключения транзистора к печатной плате). Во всех

остальных случаях соединения компонентов использовались простые линии передачи.

Форма сигналов, полученных в ходе моделирования физической схемы, оказалась сходной с идеализированной схемой (см. рис. 7). Кроме того, эти результаты точно соответствуют исходному прогнозу утилиты синтеза, использованной на шаге 1, что особенно важно для разработчиков.

Короткий видеоролик, описывающий предлагаемый подход более подробно, можно посмотреть по ссылке, приведённой в списке литературы [1]. На той же странице можно загрузить бесплатную копию рабочей среды Keysight ADS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя создание УМ класса E может быть сложной задачей, новый способ проектирования предлагает более простую и быструю альтернативу традиционному подходу. Он позволяет разработчикам существенно упростить первичный анализ разрабатываемого УМ, что впоследствии сократит время разработки и повысит надёжность конечного изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.keysight.com/find/eesof-how-to-pa-series.