

Сергей Захватаев, zahvataev\_sa@lemz-t.ru  
 Владимир Дмитриев, dvd51@mail.ru  
 Евгений Григорьев, grigorjev\_ev@lemz-t.ru

# СВЧ усилитель мощности L-диапазона на отечественных GaN HEMT полевых транзисторах

В статье рассматривается расчет и практическая реализация СВЧ-усилителя мощности L-диапазона на отечественных GaN HEMT-транзисторах АО НИИЭТ, г. Воронеж. Приводятся расчетные и экспериментальные характеристики разработанного усилителя. Даны рекомендации по применению разработанного усилителя в радарных системах L-диапазона.

В настоящее время актуальной задачей является создание СВЧ-усилителей мощности (УМ) для радарных систем и систем связи с использованием отечественной элементной базы. При разработке СВЧ УМ были использованы GaN HEMT полевые транзисторы, выпускаемые Научно-исследовательским институтом электронной техники (НИИЭТ), которые по своим параметрам близки к лучшим зарубежным аналогам.

Расчет и проектирование СВЧ УМ проводились для частотного диапазона 0,95–1,05 ГГц. Выходной каскад УМ построен на основе транзистора 6 П9140 А, который до частоты 1,6 ГГц обеспечивает выходную мощность более 400 Вт в импульсном режиме. При расчете были использованы S-параметры и результаты Load Pull измерений, представленные фирмой-производителем и измеренные в рабочем режиме транзистора ( $I_c = 1$  А,  $U_c = 50$  В). Так, на частоте 1 ГГц для обеспечения максимальной выходной мощности входной импеданс для данного транзистора  $Z_{Source} = 2,1 - j1,52$  (Ом), а выходной  $Z_{Load} = 2,59 + j1,04$  (Ом). Для согласования входного и выходного импедансов транзистора с трактом 50 Ом, были рассчитаны согласующие цепи лестничного типа с дополнительным использованием сосредоточенных элементов.

На рис. 1 представлена топология входной согласующей цепи, а на рис. 2 — полученный с помощью данной цепи импеданс со стороны затвора транзистора.

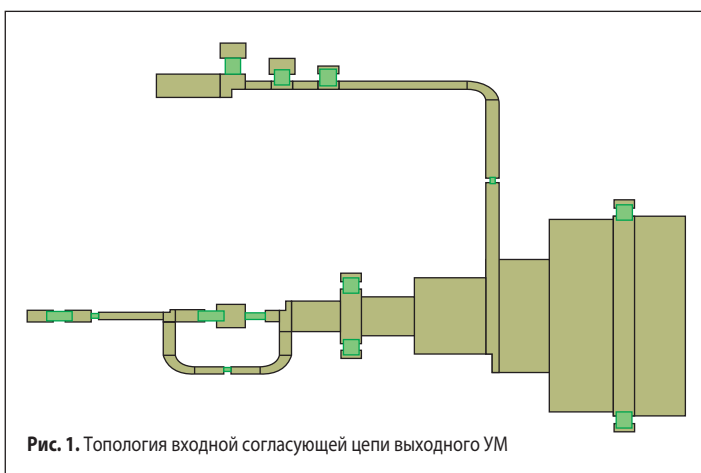


Рис. 1. Топология входной согласующей цепи выходного УМ

Также был выполнен расчет выходной согласующей цепи УМ, чья топология и достигнутый импеданс со стороны стока транзистора приведены на рис. 3, 4 соответственно.

Представленные на рис. 2 и 4 значения импеданса входной и выходной согласующих цепей на частоте 1 ГГц близки к значениям Load Pull измерений, при которых обеспечивается максимальная выходная мощность. На основании рассчитанных согласующих цепей был разработан макет выходного УМ (рис. 5).

Макет выходного УМ реализован на диэлектрической подложке Rogers RO4350В толщиной  $h = 0,762$  мм, с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 3,66$  (размер платы  $140 \times 75$  мм). После регулировки согласующих цепей были измерены S-параметры в режиме малого сигнала, представленные на рис. 6.

Экспериментальные частотные характеристики оказались близки к расчетным значениям. При этом коэффициент усиления  $|S_{21}|$

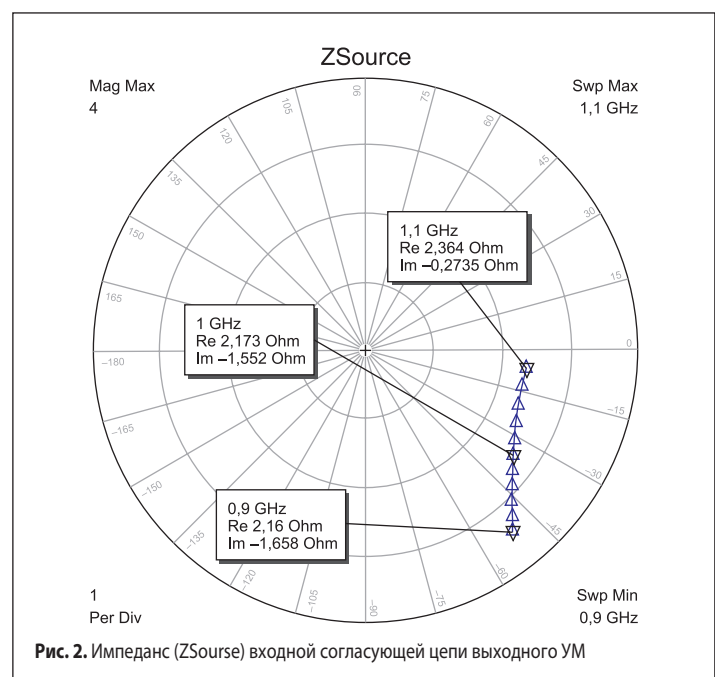


Рис. 2. Импеданс ( $Z_{Source}$ ) входной согласующей цепи выходного УМ

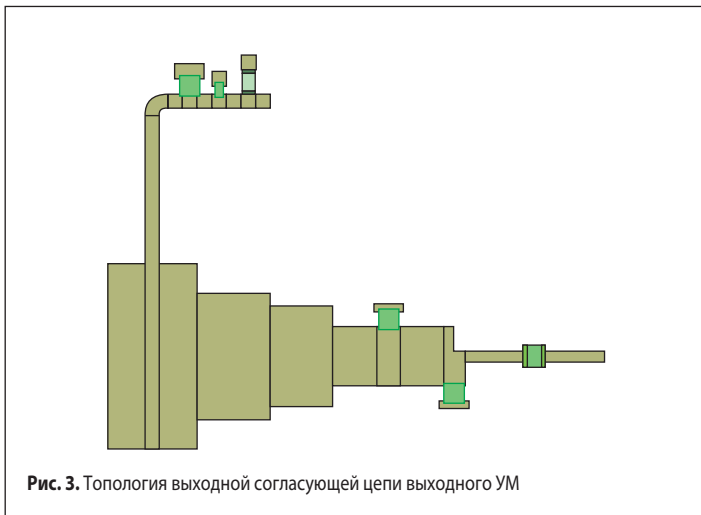


Рис. 3. Топология выходной согласующей цепи выходного УМ

в требуемом частотном диапазоне составил 21 дБ с минимальной неравномерностью (менее 1 дБ) по частоте. Для исследования максимальной выходной мощности УМ был рассчитан и спроектирован предварительный УМ на отечественном GaN полевом транзисторе НИИЭТ ПП9138А, который имеет максимальную выходную мощность 15 Вт до 4 ГГц. При расчете были использованы S-параметры, измеренные при рабочем режиме транзистора  $U_c = 28$  В,  $I_c = 200$  мА. Предварительный УМ рассчитывался на частотный диапазон 0,9–1,5 ГГц. В данном частотном диапазоне при измерении выходной мощности предварительный УМ обеспечивал уровень не менее 10 Вт, что достаточно для получения максимальной мощности выходного каскада УМ на транзисторе 6П9140А. Макет предварительного УМ (рис. 7) также изготовлен на диэлектрической подложке Rogers RO4350В (размер платы 125×50 мм).

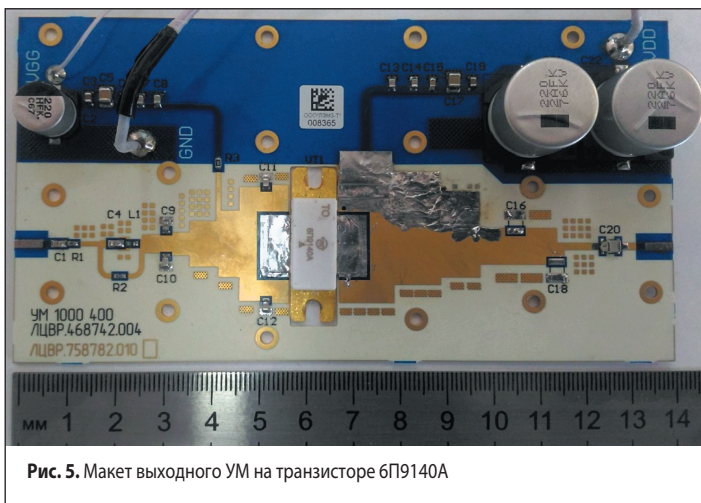


Рис. 5. Макет выходного УМ на транзисторе 6П9140А

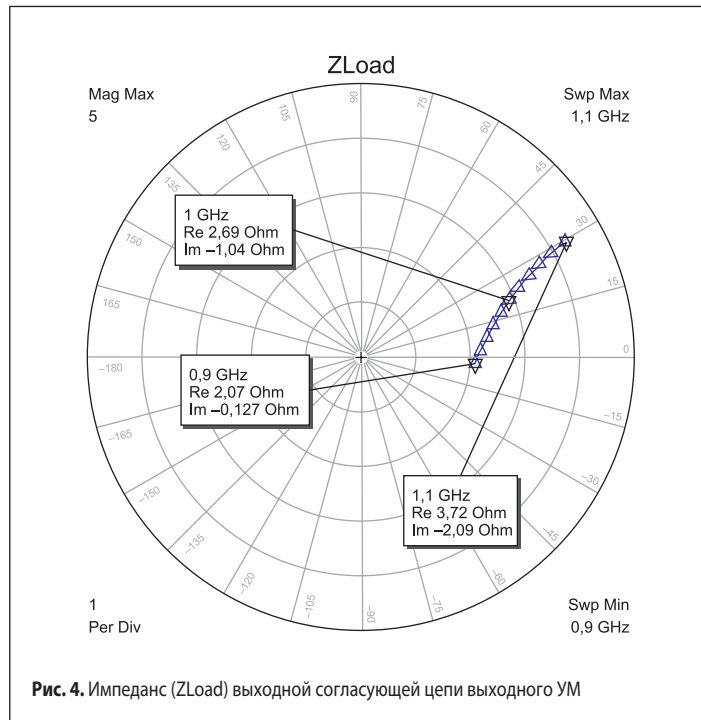


Рис. 4. Импеданс (ZLoad) выходной согласующей цепи выходного УМ

На рис. 8 изображены экспериментальные частотные характеристики каскадного соединения предварительного и выходного УМ, измеренные в режиме малого сигнала.

Из представленных на рис. 8 частотных характеристик видно, что суммарный коэффициент усиления  $|S_{21}|$  составляет  $(44 \pm 1)$  дБ, при уровне возвратных потерь не более  $-13$  дБ.

Измерение выходной мощности УМ проводилось в импульсном режиме при воздействии различной длительности импульсов (ДИ) при скважности сигналов  $Q = 10$ . На рис. 9 приведены значения мак-

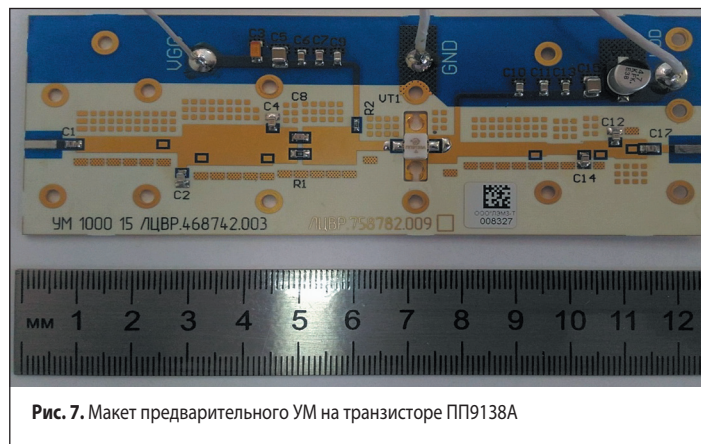


Рис. 7. Макет предварительного УМ на транзисторе ПП9138А



Рис. 6. Экспериментальные частотные зависимости  $|S_{11}|$ ,  $|S_{21}|$  макета УМ на транзисторе 6П9140А

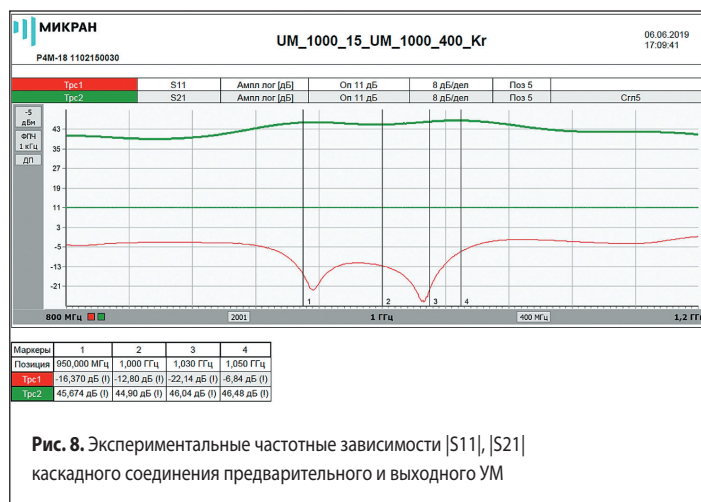
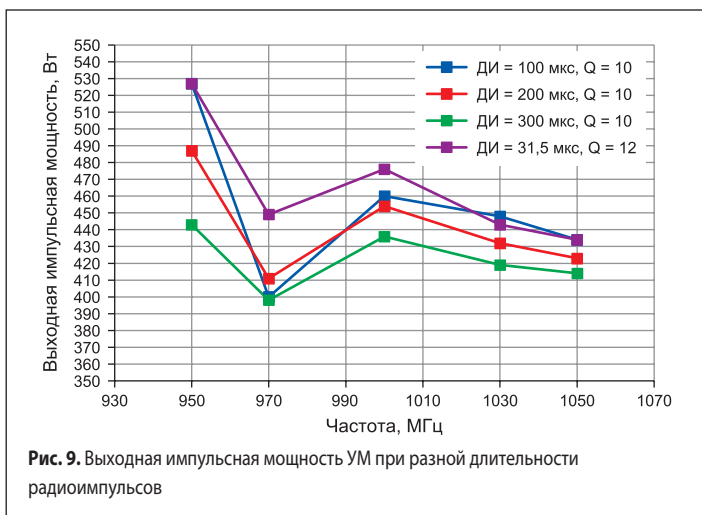


Рис. 8. Экспериментальные частотные зависимости  $|S_{11}|$ ,  $|S_{21}|$  каскадного соединения предварительного и выходного УМ



симальной выходной мощности при длительности радиоимпульсов ДИ = 100, 200 и 300 мкс.

Из представленных на рис. 9 графиков следует, что минимальное значение выходной мощности составляет 400 Вт на частоте 970 МГц, а максимальное 525 Вт — на 950 МГц. При этом наблюдается увеличение мощности для радиоимпульсов с меньшей ДИ, что связано с изменением теплового режима выходного каскада УМ. При более коротких радиоимпульсах и увеличении скважности (ДИ = 31,5 мкс, Q = 12) повышается уровень выходной мощности, преимущественно в середине частотного диапазона.

В результате проведенной работы спроектирован усилитель мощности СВЧ в частотном диапазоне 950–1050 МГц на отечественных GaN полевых транзисторах, который в импульсном режиме обеспечивает уровень выходной мощности не менее 400 Вт при скважности Q до 10.