

*Ефимович А.П., Тебенева Т.С., Данилов В.В.,
Ступак В.А.
Донецкий национальный университет*

Нагрузочная цепь для широкополосного СВЧ усилителя мощности класса F₃

Предложена новая конструкция нагрузочной цепи для широкополосного СВЧ усилителя мощности класса F₃. Представлены результаты численного моделирования усилителя мощности класса F₃ на арсенид-галлиевом транзисторе CLY5 с центральной рабочей частотой 850 МГц и относительной шириной полосы рабочих частот 28% при стоковом КПД не менее 70%.

Ключевые слова: усилитель мощности, класс F₃, стоковый КПД, нагрузочная цепь.

подавляющее большинство разрабатываемых усилителей мощности (УМ) класса F₃ как для ВЧ так и СВЧ диапазона частот являются узкополосными [1-3]. Это объясняется тем, что современная теоретическая база узкополосного УМ класса F₃ содержит все необходимые сведения для успешного проектирования нагрузочных цепей усилителя, в том числе цепей компенсирующих негативное влияние выходной емкости ($C_{\text{вых}}$) и индуктивности ($L_{\text{вых}}$) транзистора на работу усилителя. Обладая достаточно малой относительной полосой рабочих частот (3-5%), но высокими значениями КПД получаемым на практике (порядка 70-80%) данные усилители, хоть и в достаточно узком спектре, находят применение в радиопередающих устройствах. Вместе с тем в последнее время стала складываться тенденция к расширению полосы рабочих частот усилителей УМ класса F₃ [4]. В первую очередь это связано с необходимостью достижения высоких энергетических характеристик усилителей, предназначенных для радиопередающей аппаратуры, работающей в нескольких диапазонах частот. Это могут быть радиостанции ВЧ, СВЧ диапазона частот, базовые станции сотовой связи, усилители GSM сигнала сотовой связи стандартов GSM-850, GSM-900, GSM-1800, GSM-1900.

Целью данной работы является разработка нагрузочной цепи для СВЧ УМ класса F₃ с расширенной полосой рабочих частот выполненного по интегральной технологии.

В [4] показано, что расширение полосы рабочих частот УМ класса F с нагрузочными цепями, настроенными на ограниченное число гармоник, может быть достигнуто по принципу, согласно которому нагрузочная цепь создает на стоке транзистора импедансы изменяющиеся таким образом, что в диапазоне частот усилитель может работать в режиме класса F₃ и в режиме инверсного класса F₂. Благодаря этому, удастся расширить полосу рабочих частот усилителя. Относительная полоса рабочих частот такого усилителя будет состоять из двух полос рабочих частот узкополосных усилителей класса F₃ и инверсного класса F₂. Однако следует учитывать, что максимум (высота) импульса напряжения стока ($U_{\text{си}}$) в классе F₃ составляет $2U_{\text{пит}}$, где $U_{\text{пит}}$ – напряжение источника питания [5]. Для инверсного УМ класса F₂ эта величина равна $2,91U_{\text{пит}}$, что на 45,5% больше чем в УМ класса F₃. Данный недостаток инверсного УМ класса F₂ требует использования транзисторов с высоким пробивным напряжением стока-исток, поскольку при смене режима работы УМ с класса F₃ на класс F₂ транзистор может выйти со строя.

Предложенная в данной работе нагрузочная цепь для УМ класса F₃ построена по принципу снижения частотной зависимости нагрузочных импедансов транзистора на гармониках, без изменения режима работы УМ на инверсный класс F₂. Схема исследуемого СВЧ УМ класса F₃ с предлагаемой нагрузочной цепью на отрезках микрополосковых линий показана на рис. 1. Где C'₁, C₃ – емкости разделительных конденсаторов, C'₂, C'₃, C₁, C₂ – емкости шунтирующих конденсаторов в цепи питания, L'₁, L₁ – индуктивности дросселей в цепи питания, TL – отрезки микрополосковых линий, R_н – активное сопротивление нагрузки 50 Ом.

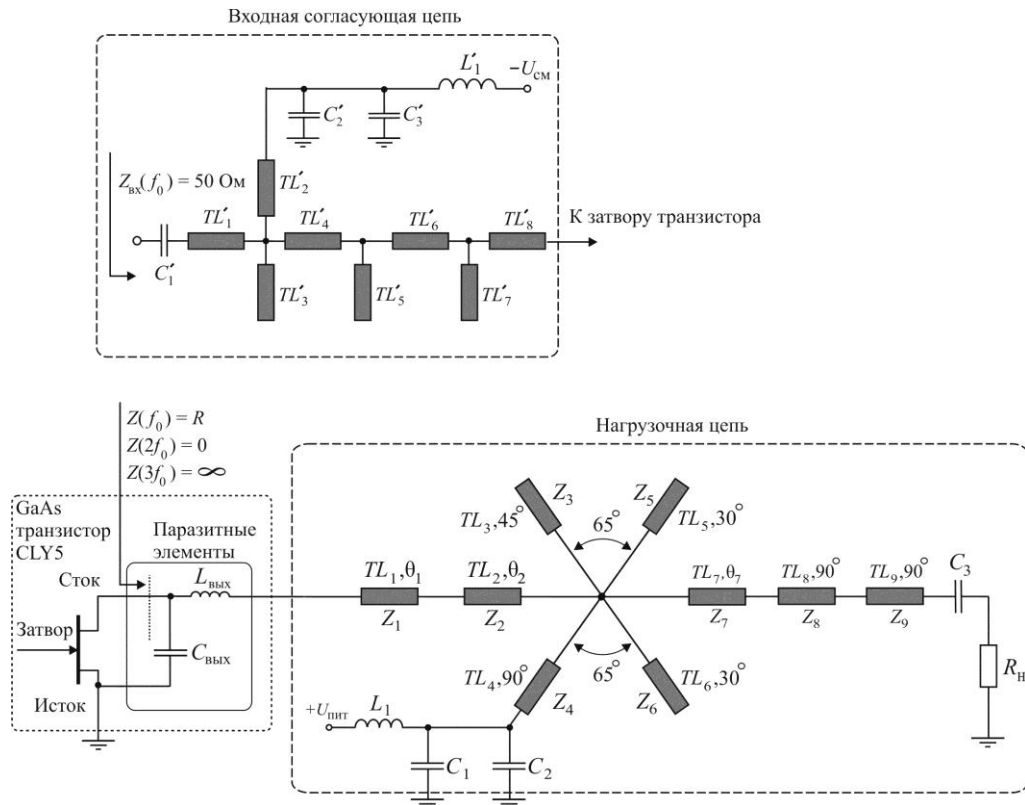


Рис. 1. Электрическая схема СВЧ УМ класса F₃

Нагрузочная цепь УМ класса F₃ (рис. 1) разрабатывалась с учетом значений $C_{\text{вых}} = 2,5$ пФ и $L_{\text{вых}} = 1,7$ нГн арсенид-галлиевого (GaAs) полевого транзистора CLY5. В данной работе центральная рабочая частота усилителя была выбрана равной $f_0 = 850$ МГц. Планируемый диапазон рабочих частот, в котором усилитель должен сохранять высокий стоковый КПД был выбран равным $f_2 - f_1 = 100$ МГц. Где $f_2 = 900$ МГц и $f_1 = 800$ МГц верхняя и нижняя частоты рабочего диапазона, в котором могут работать радиопередающие устройства стандартов связи GSM-850, GSM-900. На стоке транзистора на первой гармонике нагрузочная цепь УМ класса F₃ должна создавать активный нагрузочный импеданс $Z(f_0) = R$, на второй гармонике $Z(2f_0) = 0$ и на третьей гармонике $Z(3f_0) = \infty$. Следует отметить, что для данного усилителя под значением импеданса $Z(3f_0) = \infty$ обычно понимается величина $Z(3f_0) \gg |Z(f_0)|$. На практике для реализации УМ класса F₃ достаточно величины $Z(3f_0) = (3...5)|Z(f_0)|$. Соответственно, в

полосе рабочих частот усилителя нагрузочные импедансы должны быть приближенно равны $Z(f_1 \dots f_2) \approx R$, $Z(2f_1 \dots 2f_2) \approx 0$, $Z(3f_1 \dots 3f_2) \approx (3 \dots 5)|Z(f_0)|$.

Для получения значений $Z(2f_0) = 0$ и $Z(3f_0) = \infty$ на стоке транзистора, находятся волновые сопротивления Z_1 и Z_2 отрезков линий TL_1 и TL_2 (рис. 1) при равных их электрических длинах $\theta_1 = \theta_2$. На частотах $2f_0$ и $3f_0$ отрезок TL_2 нагружен на импеданс равный нулю, поскольку к нему подключены две пары отрезков TL_3, TL_4 и TL_5, TL_6 с электрическими длинами $\theta_3 = 45^\circ$, $\theta_4 = 90^\circ$ и $\theta_5 = 30^\circ$, $\theta_6 = 60^\circ$ как показано на рис. 1. В этом случае на второй гармонике TL_1 и TL_2 совместно с $L_{\text{ВЫХ}}$, образуют последовательный колебательный контур и шунтируют $C_{\text{ВЫХ}}$. На третьей гармонике $C_{\text{ВЫХ}}$ совместно с $L_{\text{ВЫХ}}$ и TL_1, TL_2 образуют параллельный колебательный контур. Соответствующие расчетные значения Z_1 и Z_2 полученные при различных $\theta_1 = \theta_2$, приведены на рис 2 а.

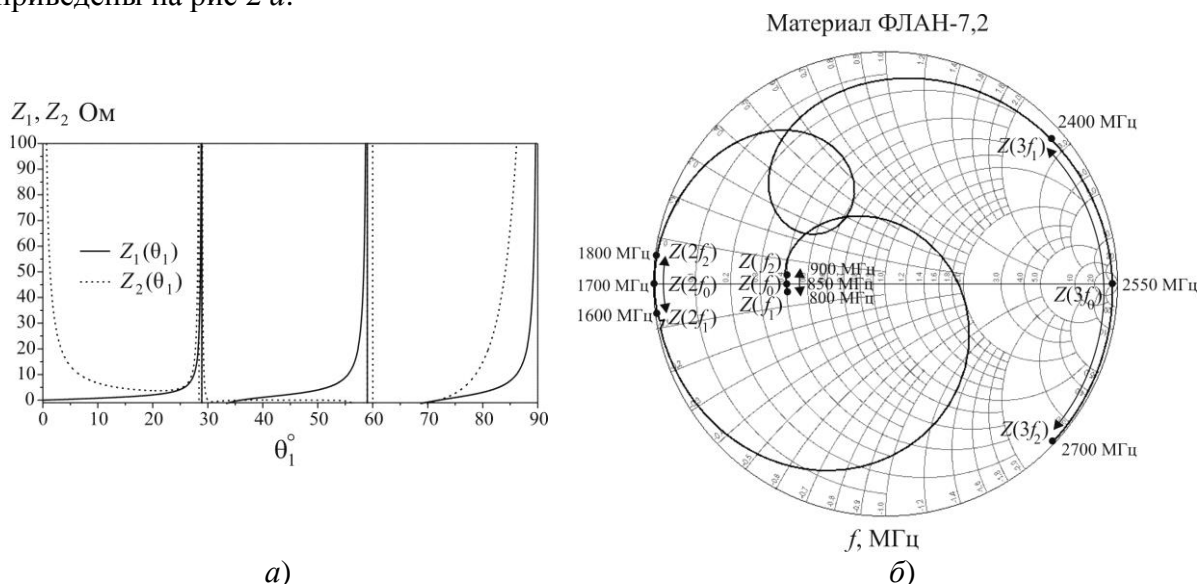


Рис. 2. Зависимость Z_1, Z_2 от $\theta_1 = \theta_2$ (а) и годограф нагрузочного импеданса предлагаемой нагрузочной цепи рассчитанной для материала ФЛАН-7,2 (б)

Для снижения частотной зависимости результирующих импедансов на второй и третьей гармониках в месте подключения к TL_2 , отрезки линий TL_3, TL_4 и TL_5, TL_6 соединены параллельно. Это позволяет расширить диапазон рабочих частот в пределах, которого изменение импедансов на второй и третьей гармониках будет незначительно влиять на КПД усилителя. Отрезки линий TL_3, TL_4 и TL_5, TL_6 , расположены относительно друг друга под углом 65° для исключения их электромагнитного взаимодействия между собой. Годограф нагрузочного импеданса нагрузочной цепи усилителя рассчитанной для материала ФЛАН-7,2 показан на рис. 2 б. Топология предложенной нагрузочной цепи СВЧ УМ класса F₃ выполненного в виде интегральной схемы показана на рис. 3.

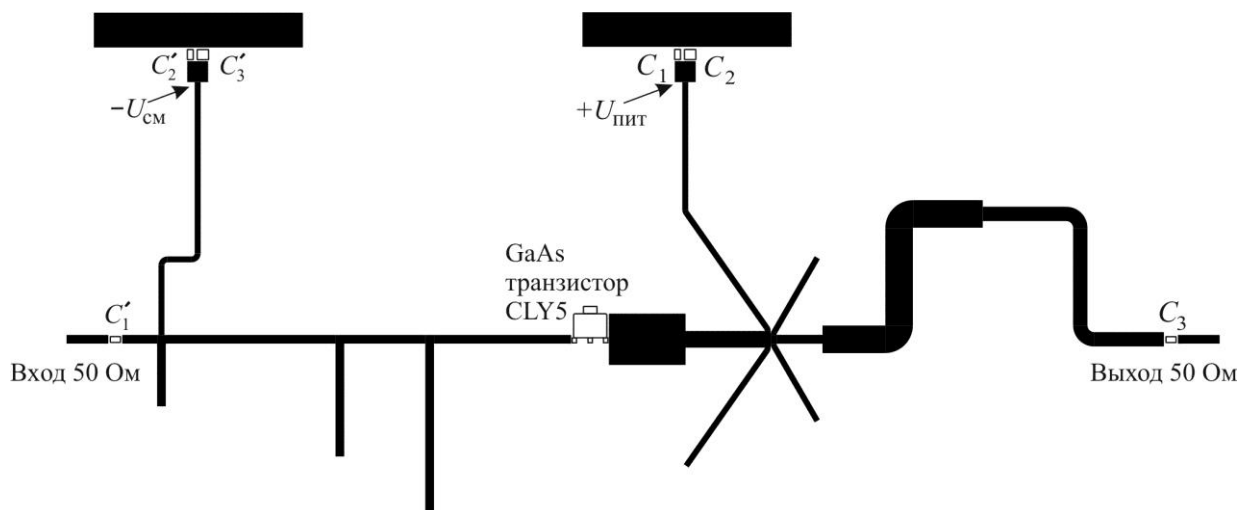


Рис. 3. Топология СВЧ УМ класса F_3 с предложенной нагрузочной цепью

Требуемая величина активного нагрузочного импеданса на первой гармонике на стоке транзистора может быть получена за счет выбора волнового сопротивления Z_7 отрезка линии TL_7 при заданном θ_7 и активного сопротивления, на которое он должен быть нагружен. Величина данного активного сопротивления поддерживается постоянной в полосе рабочих частот за счет двухсекционного четвертьволнового трансформатора, состоящего из отрезков линий TL_8 , TL_9 с электрическими длинами $\theta_8 = \theta_9 = 90^\circ$ (рис. 1). Снижение частотной зависимости нагрузочного импеданса на стоке транзистора дополнительно достигается за счет выбора величин Z_1 и Z_2 из зависимости (рис. 1). В данной работе наибольшее снижение частотной зависимости достигалось при $Z_2 = 2,28 Z_1$. Соответствующие нагрузочные импедансы показаны на рис. 2 б.

Входная согласующая цепь усилителя (рис. 1) проектировалась на максимум передачи мощности с генератора на затвор транзистора в диапазоне частот 800-900 МГц. Моделирование усилителя выполнялось методом гармонического баланса, в котором использовалась модель Матерки-Каспрчака [5] для GaAs транзистора CLY5. Напряжение питания составляло $U_{пит} = 5,0$ В. Угол отсечки был выбран $\theta_{отс} = 90^\circ$, чему соответствовало напряжение смещения на затворе транзистора $U_{см} = -3,2$ В. Значение нагрузочного сопротивления $Z(f_0) = 20$ Ом было рассчитано исходя из выходной мощности $P_{вых} = 0,6$ Вт. Полученные в моделировании зависимости стокового КПД (η_c) и $P_{вых}$ при разных уровнях входной мощности ($P_{вх}$) показаны на рис. 4 а. По уровню $\eta_c = 70\%$ полоса рабочих частот усилителя составляет 240 МГц в диапазоне частот 730...970 МГц, что соответствует относительной ширине полосы 28%. Изменение $P_{вх}$ от 70 мВт до 90 мВт не существенно влияет на стоковый КПД усилителя, чего нельзя сказать об изменении $P_{вых}$. Это связано с тем, что $P_{вх}$ сильно зависит величина, первой гармоники тока стока поступающая в нагрузку, что не является специфичным для работы транзистора в перенапряженном режиме [6].

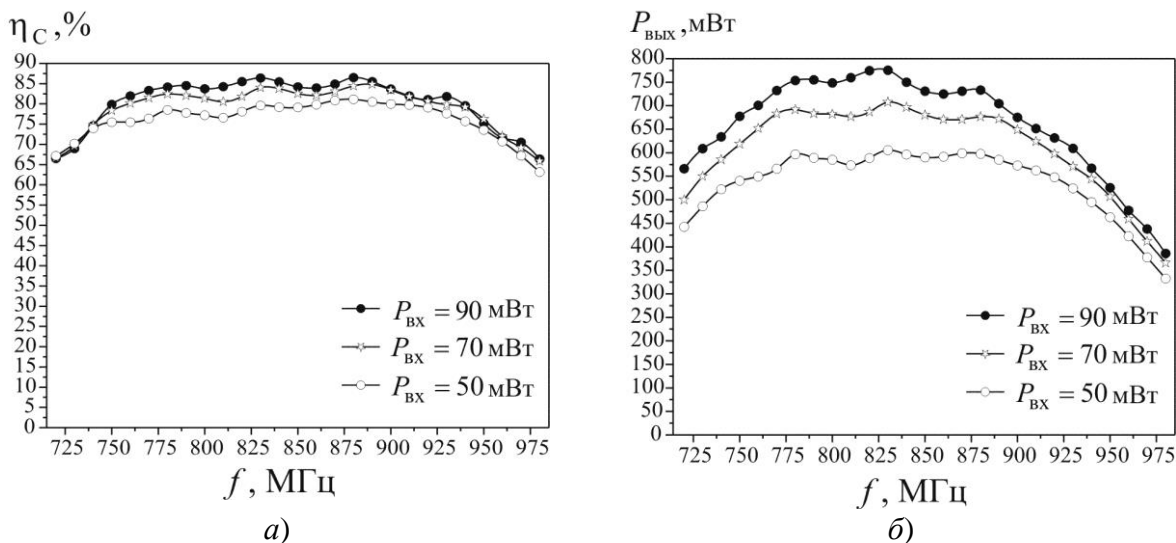


Рис. 4. Зависимость стокового КПД (а) и выходной мощности (б) УМ класса F₃ от рабочей частоты

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная нагрузочная цепь для СВЧ УМ класса F₃ обладает вполне достаточной шириной относительной полосы рабочих частот для работы усилителя в диапазонах частот сотовой связи стандартов GSM-850, GSM-900 и может быть применима в оконечных каскадах радиопередающих устройств выполненных по интегральной технологии.

Библиографический список

1. Kazimierczuk M.K. RF Power Amplifiers. USA.: Wiley. 2008. – 403 p.
2. Yefimovych A., Krizhanovski V., Kovalenko V., Giofrè R., Colantonio P., Danieli R. Load network for microwave class F amplifier // Radioelectronics and Communications Systems. – 2015. – Vol 58, No 7. – P. 291-303.
3. Yefimovich A.P., Kryzhanovskii V.G. Investigation into energy characteristics of saturated class-F amplifier // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – Vol. 74, Issue 8. – P. 709-723.
4. Chen K. Design of broadband highly efficient harmonic-tuned power amplifier using in-band continuous Class-F¹/F mode transferring // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2012. – Vol. 60, No. 12, – P. 4107-4116.
5. Materka A., Kacprzak T. Computer calculation of large-signal GaAs FET amplifier characteristics // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1985. – Vol. 33, No.2. – P. 129-135.
6. Ефимович А.П. Методика расчета насыщенного усилителя класса F // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2015. – Вып. 3. – С. 13-21.