

УДК 621.375.4

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОСТРОЕНИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ L-ДИАПАЗОНА НА ТРАНЗИСТОРАХ СЕРИИ 2П9110 ПРОИЗВОДСТВА ОАО «НИИЭТ»

Волков Юрий Константинович

начальник отдела АО «Всероссийский научно-исследовательский Институт радиотехники».

E-mail: sprd@rambler.ru, newsprd@yandex.ru.

Илюшечкин Михаил Никитович

инженер-разработчик АО «Всероссийский научно-исследовательский Институт радиотехники».

Ковтун Юрий Юрьевич

инженер-разработчик АО «Всероссийский научно-исследовательский Институт радиотехники».

Лабuzов Виталий Александрович

инженер-разработчик АО «Всероссийский научно-исследовательский Институт радиотехники».

Назаренко Александр Евгеньевич

инженер-разработчик АО «Всероссийский научно-исследовательский Институт радиотехники».

Шестов Михаил Евгеньевич

начальник сектора АО «Всероссийский научно-исследовательский Институт радиотехники».

E-mail: hexvoltt@gmail.com.

Адрес: 105082, г. Москва, ул. Большая Почтовая, д. 22.

Аннотация: В работе представлены сравнительные характеристики LDMOS транзисторов L-диапазона частот серии 2П9110 российского производства и транзисторов ведущих мировых производителей. Разработаны макетные образцы широкополосных усилителей мощности на транзисторах 2П9110А, 2П9110В, MRF6V10010NR4 с целью определения технического потенциала отечественных транзисторов в сравнении с импортными аналогами. Проектирование усилителей мощности выполнено на основе расчета оптимальной нагрузки СВЧ полевого транзистора, с использованием модели Кертиса-Эттенберга, которая получена методом экстракции из экспериментальных вольт-амперных характеристик транзисторов, снятых в импульсном режиме для устранения влияния тепловых эффектов и обработанных затем методами экстраполяции с помощью системы компьютерной алгебры Mathcad 15. Измерены параметры макетных образцов (выходная мощность, коэффициент усиления по мощности, коэффициент полезного действия) в диапазоне рабочих температур от -50 до $+53$ °С на тестовом входном сигнале с длительностью импульса 20 микросекунд и скважностью 10 в трех частотных точках: 1030, 1300, 1550 МГц. Полученные результаты сведены в таблицы и проанализированы. Сделаны выводы о пригодности использования отечественных транзисторов L-диапазона серии 2П9110 в импортозамещении и новых разработках.

Ключевые слова: усилитель мощности, L-диапазон, модель Кертиса-Эттенберга, LDMOS транзистор.

В настоящее время разработка и производство отечественной полупроводниковой элементной базы находится в стадии развития и сокращения отставания от зарубежных производителей практически по всем техническим характеристикам. Это является серьезной причиной сокращения доли импортных полупроводниковых приборов в российской продукции, как гражданского, так и военного применения, т.е. реализации процесса импортозамещения [1].

Появление мощных полевых транзисторов дало сильный толчок к проектированию СВЧ

усилителей мощности L-диапазона для замены усилителей на биполярных транзисторах с целью уменьшения массогабаритных и других характеристик.

Большой интерес представляет серия новых полевых LDMOS транзисторов 2П9110 производства ОАО «НИИЭТ» (г. Воронеж). В таблице 1 представлены основные характеристики этих транзисторов в сравнении с импортными аналогами: выходная мощность ($P_{\text{вых}}$), диапазон рабочих частот (F), длительность импульса ($\tau_{\text{и}}$), скважность (Q), напряжение питания

Таблица 1. Основные характеристики транзисторов 2П9110 и импортных аналогов

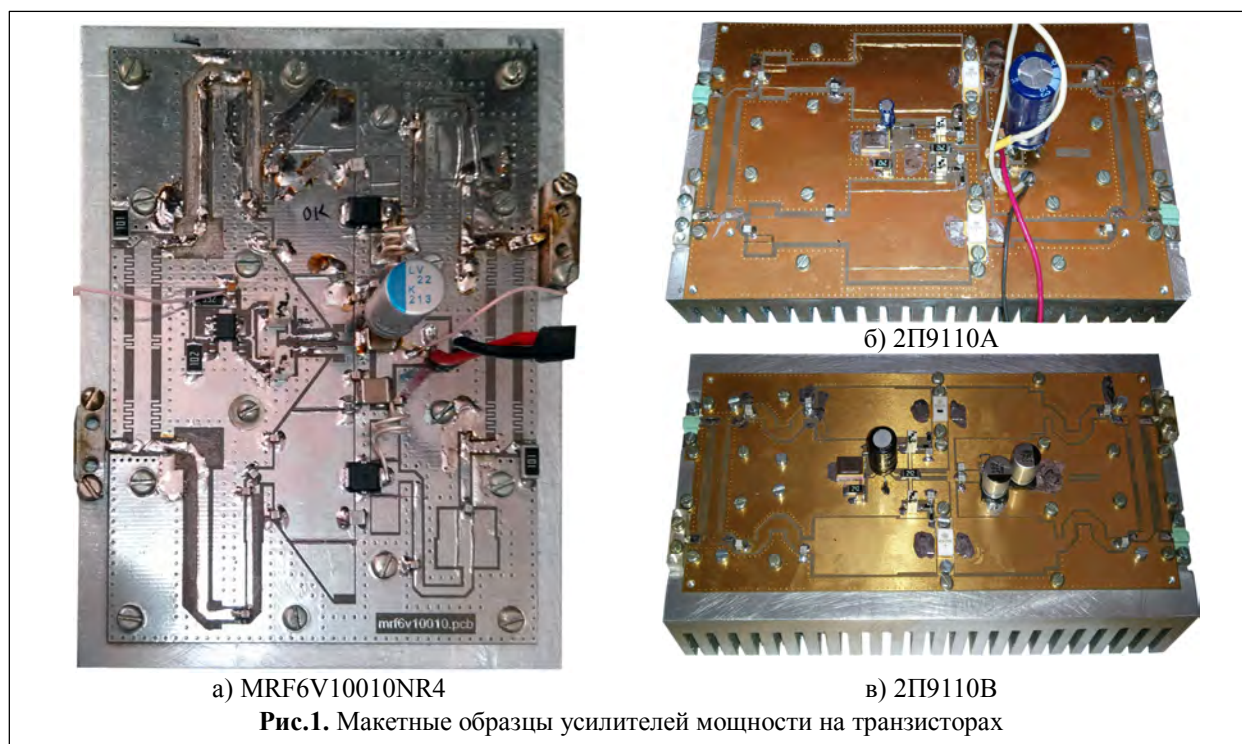
Тип транзистора (импортный аналог)	$P_{\text{вых}}$, Вт	Производитель	F , МГц	$\tau_{\text{н}}$, мкс	Q	$U_{\text{пит}}$, В	$K_{\text{у}}$, дБ	КПД, %
2П9110А	10	НИИЭТ	1030—1550	3500	10	50	12	40
(BLA1011-10)	10	NXP	1030—1090	50	50	36	15	40
(MRF6V10010NR4)	10	Freescale	1090	100	5	50	25	69
2П9110Б	35	НИИЭТ	1030—1550	3500	10	50	12	40
(BLL1214-35)	35	NXP	1200—1400	1000	10	36	13	43
2П9110В	50	НИИЭТ	1030—1550	3500	10	50	12	40
2П9110Г	100	НИИЭТ	1030—1550	3500	10	50	12	40
(BLL6H0514L-130)	130	NXP	1200—1400	300	10	50	17	50
2П9110Д	200	НИИЭТ	1030—1550	3500	10	50	12	40
(BLA1011-200R)	200	NXP	1030—1090	50	50	36	13	45
2П9110ЕС	370	НИИЭТ	1030—1550	3500	10	50	12	40
(MRF6V14300H)	330	Freescale	1200—1400	300	8,5	50	18	60
2П9110ЖС	450	НИИЭТ	1030—1550	3500	10	50	12	40
(BLA6H0912-500)	450	NXP	960—1200	128	10	50	17	50

($U_{\text{пит}}$), коэффициент усиления по мощности ($K_{\text{у}}$), коэффициент полезного действия (КПД). Транзисторы 2П9110ЖС планируются к выпуску в 2016 г.

Как видно из таблицы 1, существует серьезное отличие импортных транзисторов от отечественных, которое заключается в том, что отечественные транзисторы имеют более широкий диапазон рабочих частот и предназначены для работы с импульсами большей длительности. Это различие может привести к

расхождению отдельных параметров усилителей мощности, выполненных на отечественных и импортных транзисторах. Кроме того, зарубежный транзистор MRF6V10010NR4 оптимизирован в точке 1090 МГц и именно за счет этого имеет большие коэффициент усиления по мощности и КПД.

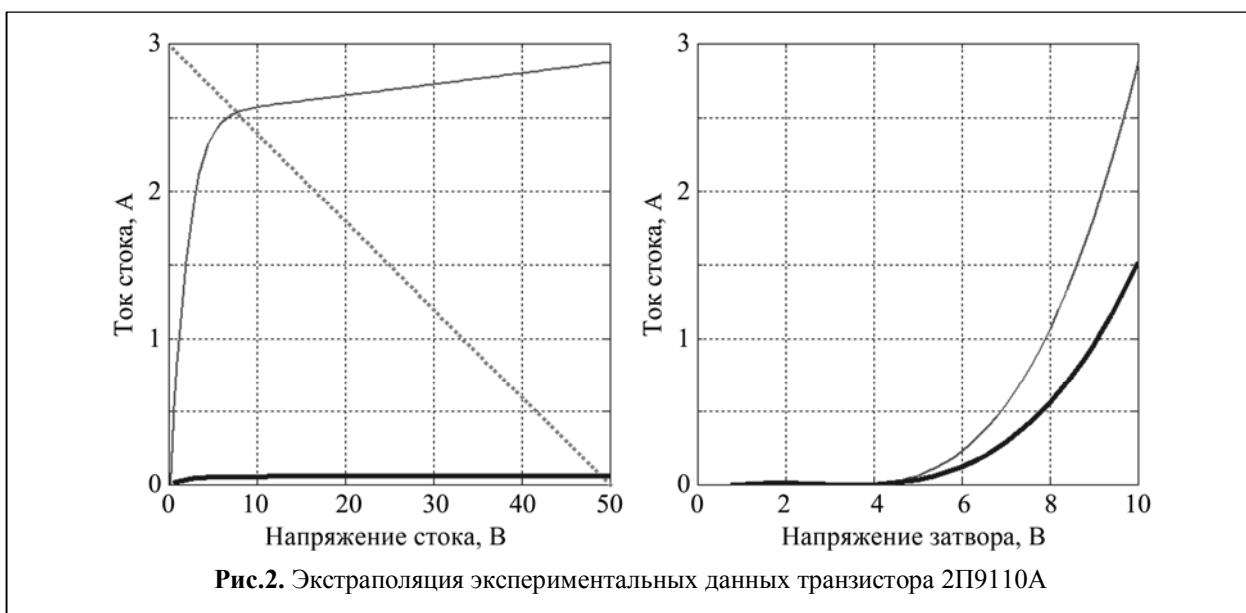
Были разработаны макетные образцы широкополосных усилителей мощности (УМ) на транзисторах 2П9110А и 2П9110В с целью определения технического потенциала отече-



ственных транзисторов и возможности импортозамещения. Для объективного позиционирования был также разработан широкополосный УМ на импортном транзисторе MRF6V10010NR4. К неоспоримым достоинствам MRF6V10010NR4 относятся низкая стоимость за счёт применения пластикового кор-

пуса и возможность установки методом пайки на печатную плату, транзисторы 2П9110 выполнены в металлокерамическом корпусе и к плате приворачиваются винтами. УМ представляет собой печатную плату, на которой в единой технологической цепочке изготовлены квадратурные направленные ответвители (де-

литель, сумматор), цепи согласования и цепи питания. Макетные образцы усилителей мощности показаны на рис.1. Проектирование УМ было выполнено на основе расчета оптимальной нагрузки СВЧ полевого транзистора, используя модель Кертиса-Эттенберга, полученную из эксперимен-



тальных импульсных вольт-амперных характеристик (ВАХ) и данных технических условий транзисторов 2П9110 и MRF6V10010NR4. Механизмы экстракции модели транзистора описаны в [2 - 5], определение входного импеданса в [6, 7], методы расчета оптимальной нагрузки для получения максимальной выход-

ной мощности в [7 - 9]. Для того, чтобы нивелировать некоторые различия транзисторов, усилители мощности будем сравнивать в полосе частот 1030-1550 МГц и при работе на коротких импульсах с большой скважностью.

Для снятия ВАХ в импульсном режиме (этот режим позволяет устранить тепловые уходы параметров транзисторов) был использован стенд собственной разработки. Снятые ВАХ транзисторов (экспериментальные данные) обрабатывались затем методами экстраполяции с помощью системы

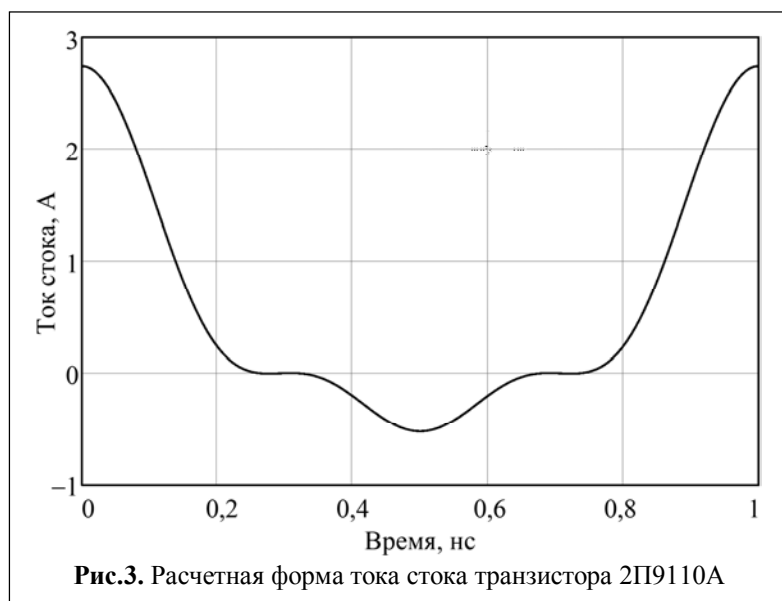


Таблица 2. Параметры макета усилителя на транзисторах MRF6V10010NR4 при $P_{ВХ} = 0,67$ Вт

$T, ^\circ\text{C}$	$P_{ВЫХ}, \text{Вт}$			$K_u, \text{дБ}$			КПД, %
	1030 МГц	1300 МГц	1550 МГц	1030 МГц	1300 МГц	1550 МГц	
-50	5,0	30,0	32,0	17,2	16,5	16,8	65,0
-40	34,0	28,0	31,0	17,0	16,2	16,7	63,0
-30	32,0	27,0	29,0	16,8	16,0	16,4	63,0
-20	30,5	25,0	29,0	16,6	16,55	16,4	63,0
-10	29,4	23,0	28,0	16,4	15,4	16,2	62,0
0	28,3	21,2	27,5	16,3	15,0	16,2	62,0
+10	27,1	21,0	26,0	16,1	14,9	15,9	62,0
+20	25,7	20,2	24,0	16,2	14,8	15,6	61,5
+30	25,0	19,1	22,0	16,55	14,6	15,2	60,0
+40	24,0	19,4	21,0	15,6	14,5	14,9	60,0
+53	23,2	17,8	20,2	15,4	14,2	14,8	59,5
				$\Delta=-2,8$	$\Delta=-2,3$	$\Delta=-2,0$	

компьютерной алгебры Mathcad 15.

Результаты экстраполяции для транзистора 2П9110А приведены на рис.2: слева - зависимость тока стока от напряжения стока при граничных напряжениях на затворе 0 В (жирная кривая) и +10 В (тонкая кривая), прерывистая линия — нагрузочная характеристика транзистора, соответствующая максимальной выходной мощности; справа — зависимость тока стока от напряжения затвора при граничных напряжениях на стоке +5 В (жирная кривая) и +50 В (тонкая кривая).

Расчетная форма нелинейного тока стока транзистора 2П9110А при синусоидальном воздействии на затворе большим сигналом

представлена на рис.3.

Форма тока имеет небольшое отличие от экспериментальной формы в виде наличия небольшого отрицательного тока стока, чего нет на практике. Объясняется это неидеальной аппроксимацией тока стока от напряжения на затворе в виде кубического полинома.

Измерения параметров макетов осуществлялось на тестовом входном сигнале с длительностью импульса $\tau_{и} = 20$ мкс и скважностью $Q = 10$ в трех частотных точках: 1030, 1300 и 1550 МГц.

В таблице 2 представлены выходная мощность, коэффициент усиления по мощности K_u и КПД макета усиления на двух транзисторах

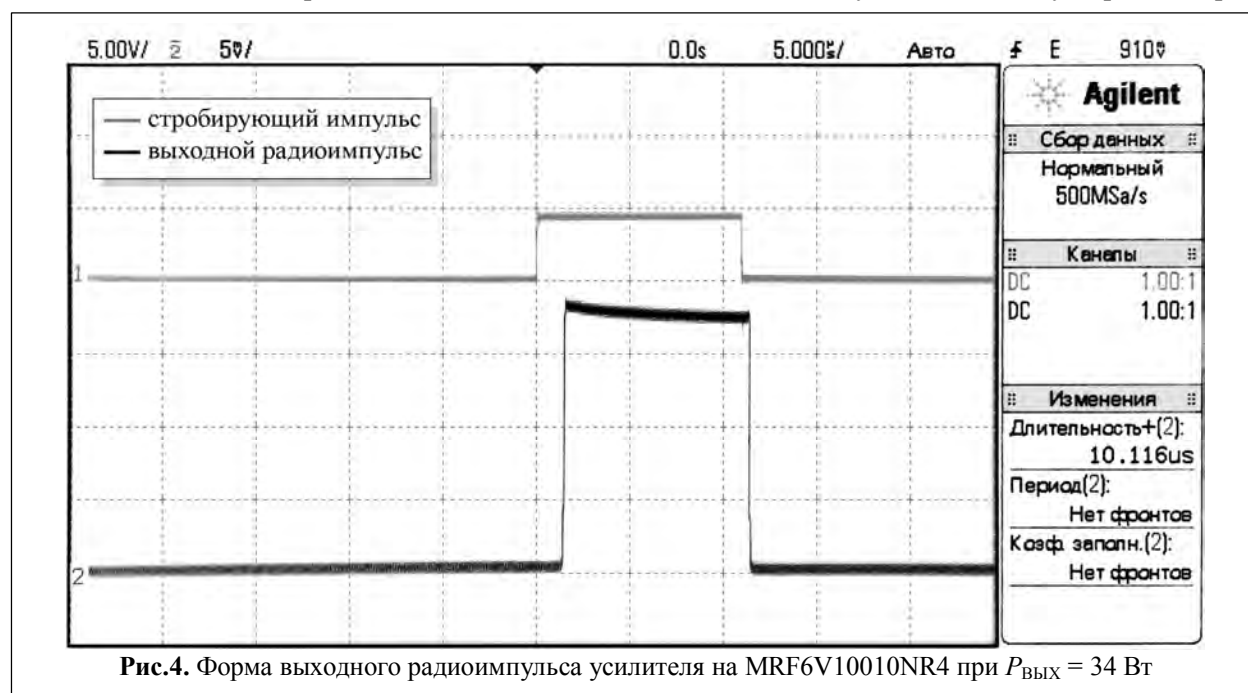


Таблица 3. Параметры макета усилителя на транзисторах 2П9110А при $P_{ВХ} = 1,9$ Вт

$T, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{ВЫХ}}, \text{Вт}$			$K_{\text{У}}, \text{дБ}$			КПД, %
	1030 МГц	1300 МГц	1550 МГц	1030 МГц	1300 МГц	1550 МГц	
-50	20,5	20,1	20,4	10,8	10,3	10,45	43,0
-40	20,1	19,8	20,0	10,3	10,2	10,3	43,0
-30	19,6	19,0	19,1	10,1	9,8	9,9	42,0
-20	19,0	18,3	18,8	9,8	9,6	9,7	41,5
-10	18,3	17,7	18,0	9,6	9,4	9,5	41,5
0	17,7	16,9	17,1	9,4	9,15	9,22	41,0
+10	17,0	16,2	16,7	8,9	8,7	8,9	40,5
+20	16,5	15,8	16,1	8,75	8,25	8,5	40,5
+30	16,2	15,1	15,6	8,6	8,05	8,15	40,0
+40	15,7	15,0	15,1	8,3	8,0	8,05	40,0
+53	15,2	15,2	15,2	8,0	8,0	8,0	42,0
				$\Delta = -2,8$	$\Delta = -2,3$	$\Delta = -2,45$	

MRF6V10010NR4 в диапазоне рабочих температур (T) при постоянной входной мощности $P_{ВХ} = 0,67$ Вт. Параметр Δ представляет собой изменение $K_{\text{У}}$ при увеличении температуры от -50 до $+53$ $^\circ\text{C}$. На рис.4 показана форма выходного радиоимпульса при выходной мощности $P_{\text{ВЫХ}} = 34$ Вт.

В таблице 3 представлена зависимость выходной мощности, коэффициента усиления и КПД от температуры макета усилителя на двух транзисторах 2П9110А при постоянной мощности на входе 1,9 Вт. На рис.5 представлена форма выходного радиоимпульса при $P_{\text{ВЫХ}} = 20,5$ Вт.

В таблице 4 представлена зависимость вы-

ходной мощности, коэффициента усиления и КПД от температуры макета усилителя на двух транзисторах 2П9110В при постоянной мощности на входе 10 Вт. На рис.6 представлена форма выходного радиоимпульса при $P_{\text{ВЫХ}} = 100$ Вт.

Анализируя представленные материалы, можно сделать следующие выводы:

- построение широкополосных усилителей привело к снижению заявленных коэффициентов усиления транзисторов на 2—4 дБ;
- коэффициент полезного действия оказался близок к заявленному (40% у отечественного транзистора и 69% у импортного);

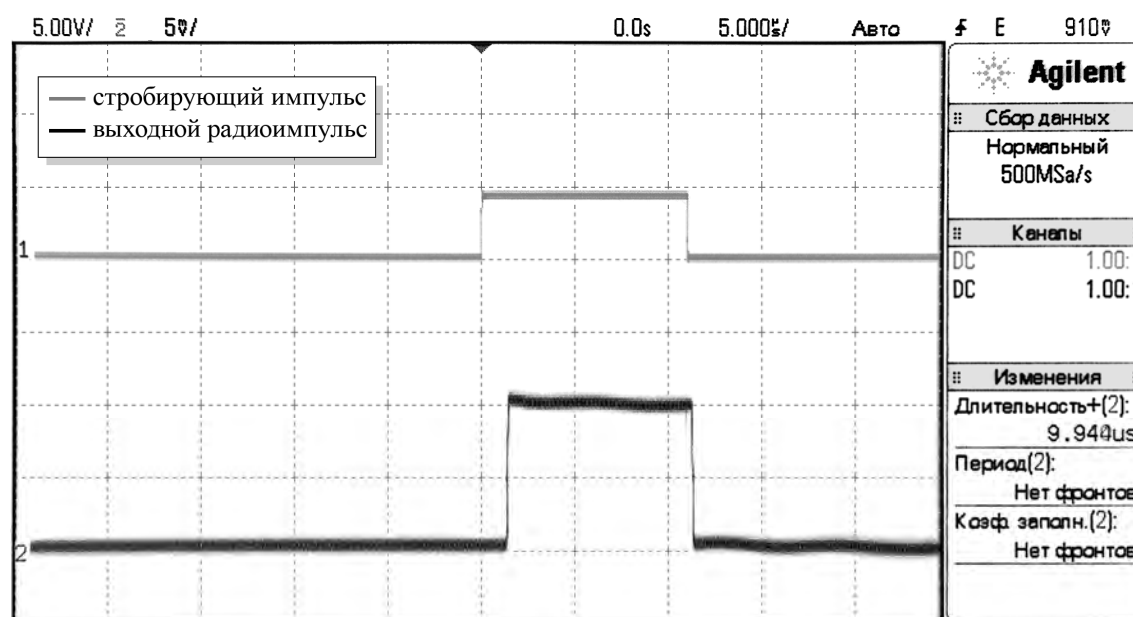
**Рис.5.** Форма выходного радиоимпульса усилителя на 2П9110А при $P_{\text{ВЫХ}} = 20,5$ Вт

Таблица 4. Параметры макета усилителя на транзисторах 2П9110В при $P_{ВХ} = 10$ Вт

$T, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{ВЫХ}}, \text{Вт}$			$K_u, \text{дБ}$			КПД, %
	1030 МГц	1300 МГц	1550 МГц	1030 МГц	1300 МГц	1550 МГц	
-50	103	100	116	10,2	10,0	10,6	44,1
-40	102	98	115	10,1	9,9	9,6	43,8
-30	100	94	114	10,0	9,73	10,56	43,2
-20	98	90	111	9,91	9,54	10,45	43,1
-10	96	88	107	9,9	9,44	10,3	42,7
0	94	84	105	9,73	9,24	10,2	42,0
+10	91	82	102	9,6	9,14	10,05	41,7
+20	90	80	101	9,54	9,0	10,05	41,3
+30	89	78	99	9,5	8,95	10,0	41,0
+40	87	74	95	9,39	8,7	9,8	41,0
+53	86	72	91	9,3	8,6	9,7	41,4
				$\Delta=-0,9$	$\Delta=-1,4$	$\Delta=-0,9$	

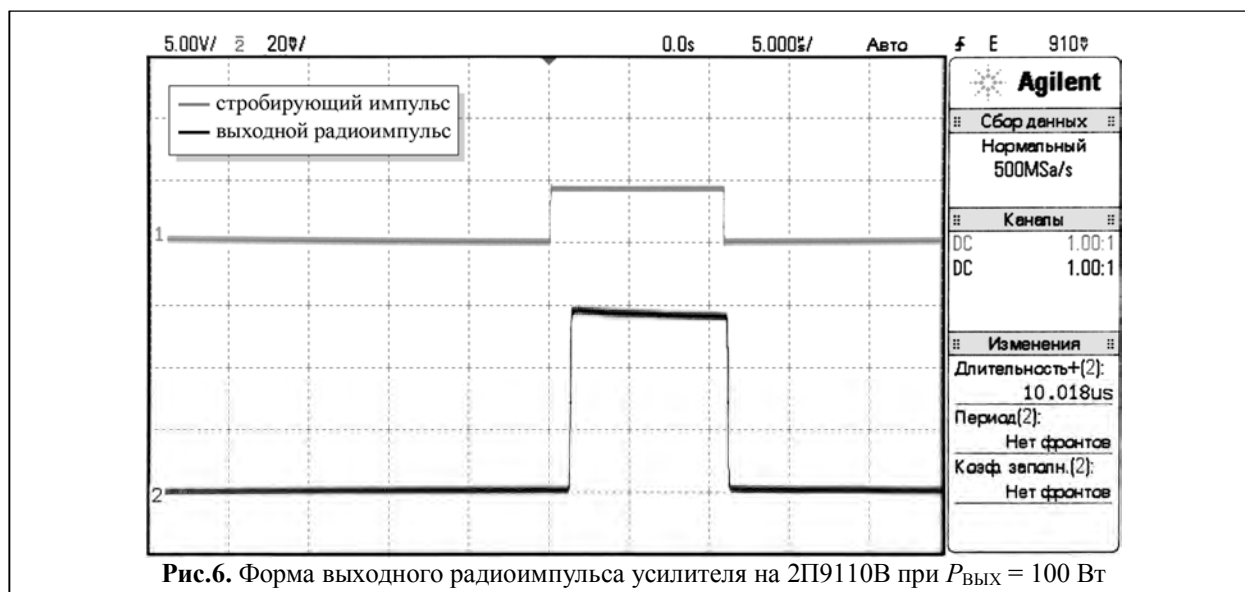
– при изменении температуры от -50 до $+53$ градусов наблюдается тенденция снижения коэффициента усиления по мощности (около 2,5 дБ) и коэффициента полезного действия (около 2—5%), как у отечественных, так и зарубежных LDMOS транзисторов, что объясняется отрицательным температурным коэффициентом начального тока стока;

– в диапазоне температур и выходных мощностей (в динамическом диапазоне 10 дБ) наблюдалась устойчивая работа всех трех усилителей мощности (не возникали побочные, внеполосные и иные виды паразитных колебаний);

Исследование макетных образцов усилителей мощности L -диапазона на LDMOS транзисторах серии 2П9110 показало принципиальную возможность импортозамещения на этапах модернизации аппаратуры и в новых разработках.

Литература

1. Волков Ю.К., Илюшечкин М.Н., Шестов М.Е. Мифы и реалии импортозамещения в радиоэлектронной промышленности // Компоненты и технологии. 2015. № 2. С. 6 - 8.
2. Аронов В.Л., Евстигнеев А.А. Моделирование мощного биполярного транзистора в усилительном режиме с учётом квазинасыщения // Электронная техника, сер. 2. 2009. С. 24 - 33.
3. Maas S.A. Fixing the Curtice FET Model // Microwave Journal. 2002. Vol. 45, № 3. P. 68 - 80.
4. Curtice W.R., Ettenberg M.A. Nonlinear GaAs FET Model for Use in the Design of Output Circuits for Power Amplifiers // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1985. Vol. MTT-33, № 12. P. 1383.
5. Коротаев В.М., Туев В.И. Расчетно-экспериментальный метод определения оптимальной нагрузки СВЧ полевого транзистора в режиме усиления мощности // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314, № 4. С. 131 - 134.
6. Каганов В.И. Транзисторные передатчики. - М.: Энергия, 1970. - 328 с.

**Рис.6.** Форма выходного радиоимпульса усилителя на 2П9110В при $P_{\text{ВЫХ}} = 100$ Вт

7. Завражнов В.Ю., Каганова И.И., Мазель Е.З., Миркин А.И. Мощные высокочастотные транзисторы. - М.: Радио и связь, 1985. - 177 с.

8. De Hek A.P. A Novel Fast Search Algorithm for an Active Load-Pull Measurement System // GaAs Symposium, Amsterdam, the Netherlands. 1998. P. 268 - 273.

9. Дмитриев В.Д., Брунев А.И., Коротаев В.М. Анализ и расчет СВЧ усилителей на полевых транзисторах с барьером Шоттки по нелинейным критериям // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1988. Т. 31, № 7. С. 68 - 71.

Поступила 22 июня 2015 г.

English

Prospects of making power L range amplifiers based on transistors line manufactured by JSC NIET

Yury Konstantinovich Volkov – Head of Department JSC All-Russian Research Institute of Radio Engineering. *E-mail:* sprd@rambler.ru, newsprd@yandex.ru.

Mikhail Nikitovich Ilyushechkin – Development project engineer JSC All-Russian Research Institute of Radio Engineering.

Yury Yuryevich Kovtun – Development project engineer JSC All-Russian Research Institute of Radio Engineering.

Vitaly Aleksandrovich Labuzov – Development project engineer JSC All-Russian Research Institute of Radio Engineering.

Alexander Evgenyevich Nazarenko – Development project engineer JSC All-Russian Research Institute of Radio Engineering.

Mikhail Evgenyevich Shestov – Head of section JSC All-Russian Research Institute of Radio Engineering. *E-mail:* hexvoltt@gmail.com.

Address: 105082, Moscow, Bolshaya Pochtovaya St., 22.

Abstract: The work presents comparative characteristics of LDMOS L frequency band transistors of line 2P9110 of the Russian production and transistors of the leading global manufacturers. Prototype samples of broad-band power amplifiers with transistors 2P9110A, 2P9110V, MRF6V10010NR4 are developed for the purpose of determination of technical potential of domestic transistors in comparison with foreign made similar products. Design of power amplifiers is performed on the basis of calculation of optimum load of microwave field transistor using Curtice-Ettenberg's model received by extraction method from experimental volt-ampere characteristics of the transistors which were taken in a pulse mode for elimination of influence of the thermal effects and were processed then via extrapolation methods by means of computer algebra system Mathcad 15. Parameters of prototype samples (output power, power gain, efficiency) of test input signal with pulse time of 20 microseconds and on-off time 10 in three frequency points: 1030, 1300, 1550 MHz were measured at operating temperature in the range from – 0 up to +53 °C. The obtained results are tabulated and analyzed. Conclusions are drawn on suitability of use of domestic line 2P9110 L-range transistors as import substitution as well as their further development.

Key words: power amplifier, L-range, Curtice-Ettenberg's model, LDMOS transistor.

References

1. Volkov Yu.K., Ilyushechkin M. N., Shestov M. E Myths and realities of import substitution in the radio-electronic industry. - Komponenty i tekhnologii. 2015. No. 2. P. 6 - 8.
2. Aronov V. L., Yevstigneyev A.A. Modeling of the powerful bipolar transistor in intensifying mode with regard to quasisaturation. - Elektronnaya tekhnika, ser. 2. 2009. P. 24 - 33.
3. Maas S.A. Fixing the Curtice FET Model. - Microwave Journal. 2002. Vol. 45, No. 3. P. 68 - 80.
4. Curtice W.R., Ettenberg M.A. Nonlinear GaAs FET Model for Use in the Design of Output Circuits for Power Amplifiers. - IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1985. Vol. MTT-33, No. 12. P. 1383.
5. Korotayev V. M., Tuyev V. I. Experiment-calculated method of definition of optimum load of microwave field transistor in power amplification mode. - Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2009. T. 314, No. 4. P. 131 - 134.
6. Kaganov V. I. Transistor transmitters. - M.: Energiya, 1970. - 328 p.
7. Zavrazhnov V. Yu., Kaganova I.I., Mazel E.Z., Mirkin A.I. Powerful high frequency transistors. - M.: Radio i svyaz, 1985. - 177 p.
8. De Hek A.P. A Novel Fast Search Algorithm for an Active Load-Pull Measurement System. - GaAs Symposium, Amsterdam, Netherlands. 1998. P. 268 - 273.
9. Dmitriyev V.D., Brunev A.I., Korotayev V.M. Analysis and calculation of microwave amplifiers based on field transistors with Schottky barrier by nonlinear criteria. - Radioelektronika. 1988. T. 31, No. 7. P. 68 - 71.