

## ДРАЙВЕРЫ СВЕРХСКОРОСТНЫХ АЦП НА ОСНОВЕ СВЧ МИС ШИРОКОПОЛОСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

© Е. М. Савченко<sup>1,2</sup>, П. С. Будяков<sup>1,3</sup>, Н. С. Сурков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

<sup>2</sup>ФГБОУВО «Московский технологический университет» (МИРЭА), 119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78

<sup>3</sup>Донской государственный технический университет (ДГТУ), 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

В статье приводится краткий анализ основных параметров и типов драйверов сверхскоростных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Приводится информация о характеристиках серийных АЦП с частотой преобразования до 5,4 ГГц. Рассмотрены основные схемы включения широкополосных усилителей (ШПУ) в качестве драйвера дифференциальных АЦП. Представлены результаты измерений малосигнальных и нелинейных характеристик, а также дана расчётная оценка быстродействия АЦП с драйвером на основе схемы включения с двумя ШПУ.

**Ключевые слова:** драйвер АЦП, широкополосный усилитель, АЦП, СВЧ, ОУ, коэффициент гармоник, гармонические искажения, ГГц

**Сведения об авторах:** Савченко Евгений Матвеевич, к.т.н., savchenko@pulsarnpp.ru; Будяков Петр Сергеевич, к.т.н., budyakov\_ps@pulsarnpp.ru; Сурков Никита Сергеевич, surkov\_ns@pulsarnpp.ru

---

## GAIN-BLOCK BASED ULTRA-HIGH-SPEED ADC DRIVERS

E. M. Savchenko<sup>1,2</sup>, P. S. Budyakov<sup>1,3</sup>, N. S. Surkov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27

<sup>2</sup>Moscow Technological University (MIREA), 119454, Moscow, Vernadskogo avenue, 78

<sup>3</sup>Don State Technical University (DSTU), 344000, Rostov-on-Don, Gagarin square, 1

In this paper, a brief analysis of the main parameters and types of ultra-high-speed ADC drivers is presented. Information about the characteristics of commercially available ADCs with conversion frequency up to 5,4 GHz is given. The basic connections of gain blocks as a driver of differential ADCs are considered. The results of small signal and nonlinear characteristics measurements are presented, as well as an estimation of the ADC performance with driver based on two gain blocks.

**Keywords:** ADC driver, gain block, ADC, microwave, operational amplifier, harmonic factor, harmonic distortion, GHz

**Data of authors:** Savchenko Evgeny Matveevich, Ph.D., savchenko@pulsarnpp.ru; Budyakov Petr Sergeevich, Ph.D., budyakov\_ps@pulsarnpp.ru; Surkov Nikita Sergeevich, surkov\_ns@pulsarnpp.ru

### Введение

Драйверы аналого-цифровых преобразователей применяются для согласования динамических диапазонов источника сигнала и входного каскада АЦП, осуществляя при этом дополнительное усиление сигнала для

повышения разрешения АЦП, его конвертацию из однофазного в дифференциальный, и используются в качестве буфера между источником сигнала и входом АЦП. Так как драйвер – это активное устройство, он вносит дополнительные шум и искажения

на входе АЦП. Эти обстоятельства ограничивают качество преобразования сигнала.

В список наиболее важных параметров драйверов сверхскоростных АЦП входят: амплитуда выходного напряжения, полоса рабочих частот, гармонические искажения, наличие дифференциального выхода и возможность работы на низкоомную нагрузку.

В практических схемах в качестве драйвера дифференциальных АЦП используются полностью дифференциальные операционные усилители (ОУ), охваченные отрицательной обратной связью (ООС) [1-3], при этом наибольшей полосой пропускания обладают ОУ с токовой обратной связью (ТОС) [4, 5] или СВЧ МИС широкополосных усилителей, обычно строящиеся по схеме Дарлингтона [6]. Благодаря своей универсальности, широкой полосе пропускания, малому уровню шумов, драйверы на основе ШПУ находят применение в современной аппаратуре. При этом для реализации дифференциального выхода используются расщепители фаз на основе трансформа-

торов. Применение же ОУ с ООС в качестве драйверов высокочастотных АЦП также ограничивается необходимостью использования сложных СВЧ комплементарных биполярных технологических процессов для достижения необходимых параметров [7, 8].

Обзор современных сверхскоростных АЦП (табл. 1) показывает, что амплитуда дифференциального выходного напряжения на выходе драйвера может достигать 2 В (амплитуда до 4 В,  $P_{вх} = 13$  дБм на 100 Ом дифференциальной нагрузке) при низком коэффициенте шума и малых нелинейных искажениях для достижения высокого качества преобразования сигнала. Современные серийно выпускаемые зарубежные АЦП имеют частоту преобразования до 5,4 ГГц, в то время как аналогичные отечественные изделия с дифференциальным входом имеют частоту преобразования до 300 МГц. В разработке находится отечественный двенадцатиразрядный АЦП с дифференциальным входом и частотой преобразования свыше 1 ГГц [9].

Таблица 1

Сравнение параметров сверхскоростных АЦП

	EV10AS150	EV12AS350	AD9208	AD9691	1273ПВ14
Разрядность, бит	10	12	14	14	12
Тип АЦП*	П-П	П	К	К	К
Частота преобразования, ГГц	2,6	5,4	3	1,25	0,3
Амплитуда входного дифференциального напряжения, В	4	1	1,7	1,58	1,5
Входное дифференциальное сопротивление, Ом	100	100	100	100	высокое
Полоса пропускания, МГц	0-5000	0-4800	0-5000	0-1500	-
Эффективная разрядность АЦП, бит	8,0 ( $f_{вх} = 500$ МГц)	8,9 ( $f_{вх} = 1200$ МГц)	9,6 ( $f_{вх} = 400$ МГц)	10,1 ( $f_{вх} = 500$ МГц)	10 ( $f_{вх} = 150$ МГц)
Динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих, дБ	57 ( $f_{вх} = 500$ МГц)	65 ( $f_{вх} = 1200$ МГц)	71 ( $f_{вх} = 400$ МГц)	72 ( $f_{вх} = 500$ МГц)	70 ( $f_{вх} = 150$ МГц)
Потребляемая мощность, Вт	5,8	2,6	3,3	3,8	1,5

\* П-П – последовательно-параллельный АЦП, П – параллельный АЦП, К – конвейерный АЦП

В качестве усилительного элемента были рассмотрены серийно выпускаемые широкополосные усилители серии 1324 [10]. Параметры ШПУ с наибольшим уровнем выходной мощности приведены в табл. 2. Исходя из требуемых параметров, для исследования возможности применения были выбраны ШПУ 1324УВ9У и 1324УВ11У. Достоинствами данных ШПУ являются высокий коэффициент усиления и высокая точка компрессии коэффициента усиления при приемлемом коэффициенте шума и хорошем согласовании по входу и выходу в рабочем диапазоне частот.

**Базовые схемы включения**

В ходе разработки драйвера АЦП были рассмотрены две схемы включения (рис. 1) на основе ШПУ 1324УВ9У и 1324УВ11У [10] и широкополосных трансформаторов, обеспечивающих диапазон рабочих частот 4,5-3000 МГц при амплитудной и фазовой ошибке менее 0,71 дБ и менее 7 градусов соответственно.

На рис. 1а показана схема на основе одного ШПУ, где для получения дифференциального выходного сигнала используется трансформатор Т1.

Таблица 2

Сравнение параметров отечественных СВЧ МИС ШПУ [10]

	1324УВ2У	1324УВ6У	1324УВ9У	1324УВ11У
Технология изготовления	Si	Si	GaAs	GaAs
Диапазон рабочих частот, ГГц	0,01-3,1	0,01-2,8	0,01-6,1	0,01-6
Коэффициент усиления, дБ	20	20,4	21	16
Коэффициент шума, дБ	3,34	3,05	3,8	3,05
Точка компрессии на 1 дБ (по выходу), дБм	9	11,5	18	20
Ток потребления, мА	100	100	100	110
КСВ по входу и выходу	1,3	1,3	1,6	1,8

Электрические параметры при  $f_{вх} = 0,5$  ГГц,  $U_n = 5$  В,  $T = 25$  °С

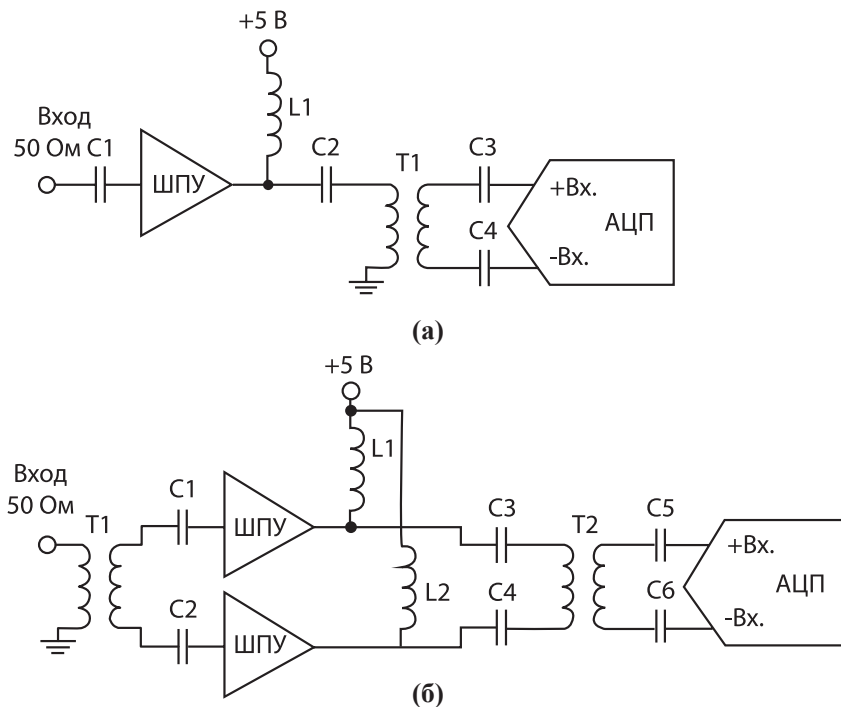


Рис. 1

Схемы драйвера АЦП: а) с одним ШПУ; б) с двумя ШПУ

Во второй схеме включения, показанной на рис. 1б, входной трансформатор Т1 преобразует синфазный сигнал источника в дифференциальный. Ослабление синфазной составляющей в выходном трансформаторе Т2 схемы рис. 1б позволяет уменьшить искажения по второй гармонике, а также уменьшить разницу по коэффициенту усиления между двумя ШПУ. В [11] показано, что схема с одним ШПУ (рис. 1а) имеет на 15-20 дБ хуже подавление второй гармоники, поэтому для создания высокопроизводительного драйвера АЦП схема с двумя ШПУ является наиболее предпочтительной.

### Результаты измерений

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента усиления и коэффициентов от-

ражения от входа и выхода для драйвера с двумя ШПУ 1324УВ9У, а на рис. 3 для драйвера с двумя ШПУ 1324УВ11У. Измерения проводились на одном выходе, при этом второй выход трансформатора был заземлён.

На рис. 4 представлены зависимости гармонических искажений ( $K_{ги}$ ) по второй и третьей гармоникам относительно основной гармоники в зависимости от выходной мощности для схемы включения с двумя ШПУ 1324УВ9У и с 1324УВ11У. Видно, что с уменьшением выходной мощности характеристики гармонических искажений улучшаются.

Измеренные параметры схем приведены в табл. 3. Для сравнения приведены параметры драйверов зарубежного производства на основе ОУ (LTC6420-20) и на основе двухканальных ШПУ

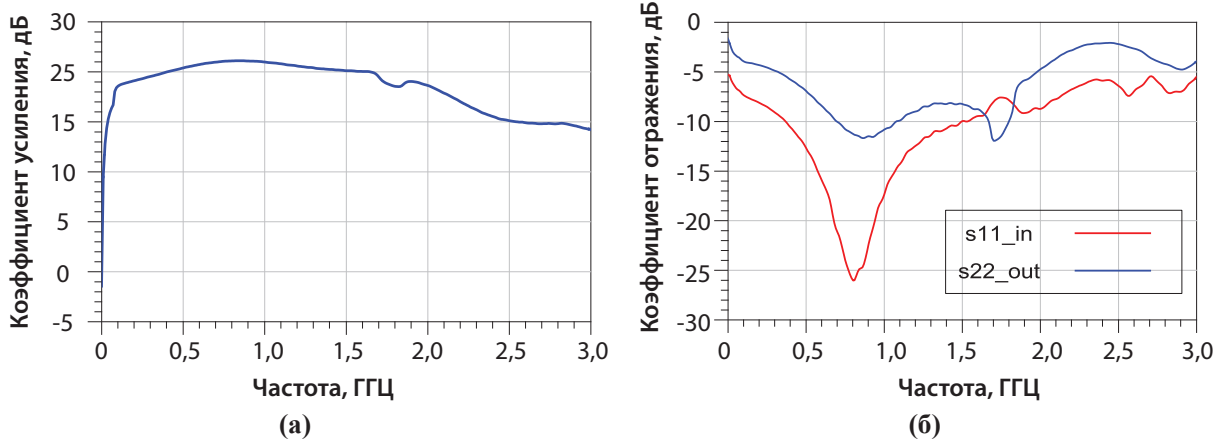


Рис. 2

S-параметры драйвера с двумя ШПУ 1324УВ9У: а) зависимость коэффициента усиления от частоты; б) зависимости коэффициентов отражения от входа и выхода от частоты

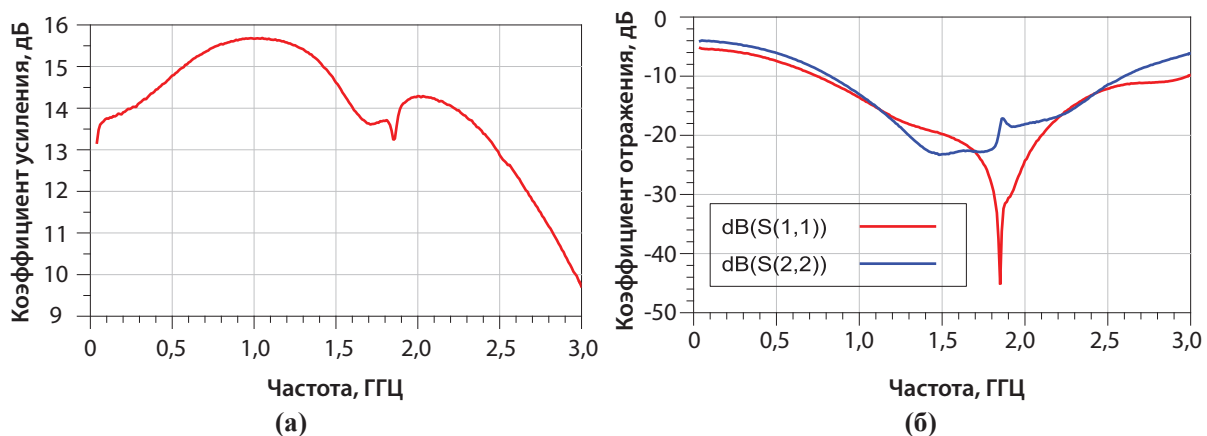


Рис. 3

S-параметры драйвера с двумя ШПУ 1324УВ11У: а) зависимость коэффициента усиления от частоты; б) зависимости коэффициентов отражения от входа и выхода от частоты

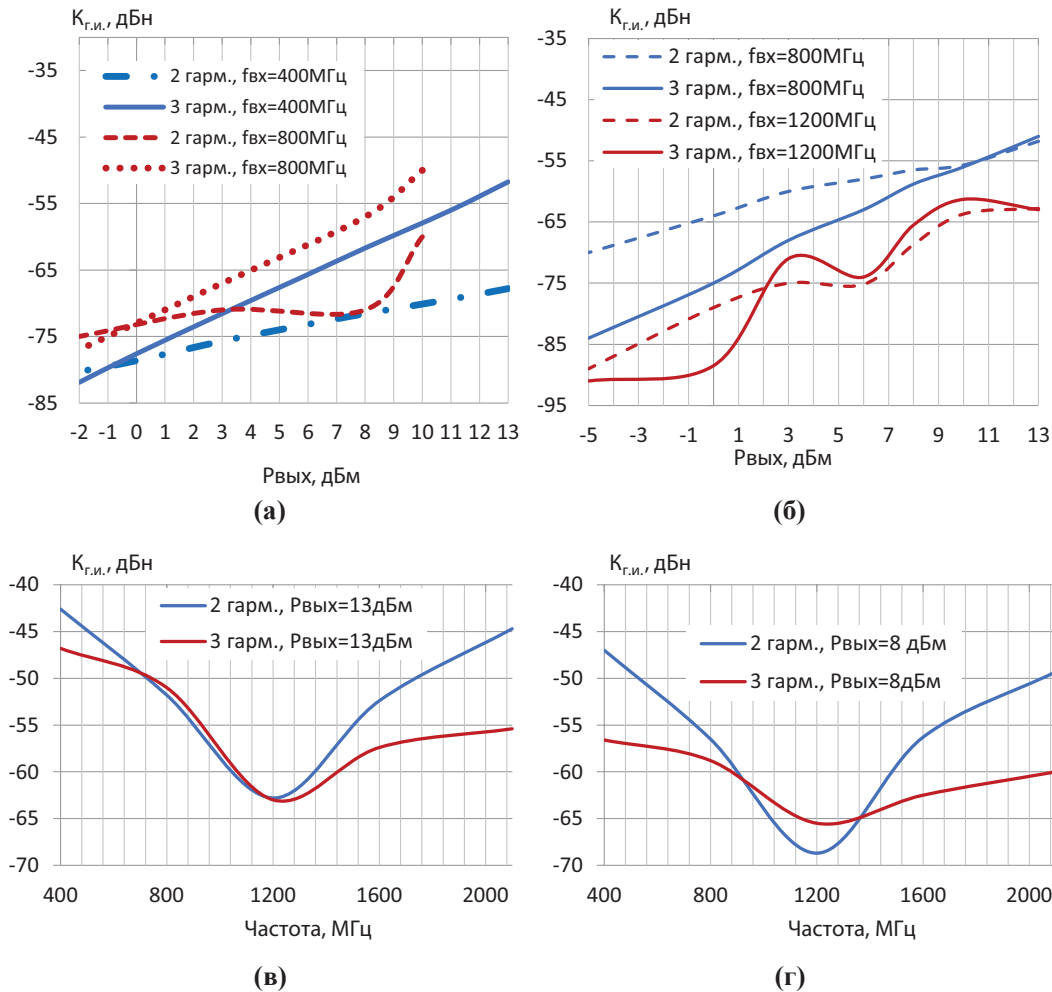


Рис. 4

Зависимости гармонических искажений от выходной мощности: а) для ШПУ 1324УВ9; б) для ШПУ 1324УВ11; зависимости гармонических искажений в диапазоне частот для схемы с двумя ШПУ 1324УВ11: в) при  $P_{вых} = 13$  дБм; г)  $P_{вых} = 8$  дБм

(LTC6430-15 и LTC6430-20) [12]. Для измерения параметров драйвера использовался источник сигнала с узкополосным фильтром для подавления паразитных гармоник. Использование фильтра позволило снизить уровень по второй и третьей гармоникам источника до уровня -90 дБ относительно полезного сигнала, что снизило погрешность измерений.

Анализируя результаты измерений драйверов, можно сделать вывод, что в диапазоне низких частот (до 800 МГц) для достижения наименьших гармонических искажений лучше использовать схему на основе ШПУ 1324УВ9У, для частот от 800 до 2000 МГц наиболее подходящим является драйвер на основе ШПУ 1324УВ11У.

В сравнении с зарубежными аналогами на основе двухканальных ШПУ (LTC6430-20 и LTC6430-15) разработанные драйверы имеют сопоставимые показатели по полосе пропускания, шумам, а уровни второй гармоники зависят от частоты входного сигнала и определяются фазовым и амплитудным разбалансом сигнала в трансформаторах.

#### Расчёт характеристик драйвера в связке с АЦП

Одними из основных характеристик точности преобразования АЦП являются его эффективная разрядность (ENOB) и динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих (SFDR), зависящие от гармо-

Таблица 3

Сравнение результатов измерений драйверов АЦП

	1324УВ9У-2	1324УВ11У-2	LTC6420-20	LTC6430-20	LTC6430-15	Условия
Тип схемы	2 ШПУ	2 ШПУ	ОУ с ООС	2 ШПУ	2 ШПУ	
$U_n$ , В	5	5	3,6	5	5	–
$I_n$ , мА	176	216	80	170	160	–
Верхняя граничная частота, МГц	100-2000	50-2500	0,1-1800	20-2000	20-2000	По уровню -3 дБ
Коэффициент усиления, дБ	20,1	15,5	16	20,7	14,7	$f_{вх} = 1$ ГГц $P_{вх} = -20$ дБм
Коэффициент отражения от входа, дБ	-18	-13	-18	-15	-15	$f_{вх} = 1$ ГГц $P_{вх} = -20$ дБм
Коэффициент отражения от выхода, дБ	-11	-13	-17	-15	-15	$f_{вх} = 1$ ГГц $P_{вх} = -20$ дБм
Коэффициент шума, дБ	4,9	4,4	13	3,3	4,2	$f_{вх} = 1$ ГГц
Точка компрессии на 1 дБ, дБм	18,3	22	18	24,3	22,3	$f_{вх} = 1$ ГГц
Уровень 2 гармоник, дБн <sup>1</sup>	-72	-46,8	-80	-70,3	-81,9	$f_{вх} = 0,4$ ГГц
	-52	-56,5	( $f_{вх} = 100$ МГц)	-51,4	-71,2	$f_{вх} = 0,8$ ГГц
	–	-68,7		-55,2	-74,2	$f_{вх} = 1,2$ ГГц
	–	-56,3		–	–	$f_{вх} = 1,6$ ГГц
Уровень 3 гармоник, дБн <sup>1</sup>	-63	-56,6	-88	-74,3	-88	$f_{вх} = 0,4$ ГГц
	-65	-58,8	( $f_{вх} = 100$ МГц)	-71,2	-76,7	$f_{вх} = 0,8$ ГГц
	–	-65,5		-65,8	-86	$f_{вх} = 1,2$ ГГц
	–	-62,5		–	–	$f_{вх} = 1,6$ ГГц

<sup>1</sup> $P_{вых} = 8$  дБм или эквивалент напряжения на нагрузке 50 Ом

нических искажений и шумов как на входе, так и внутри АЦП. Для оценки качества преобразования рассмотрим работу драйвера с двумя ШПУ 1324УВ11У и АЦП AD9208.

Мощность шумов на входе драйвера  $P_{шум}$  можно вычислить как:

$$P_{шум} = -174 + 10\lg(f_{ш}) + K_{ш} + K_n, \quad (1)$$

где -174 дБм – мощность теплового шума резистора 50 Ом при комнатной температуре,  $f_{ш}$  – шумовая полоса,  $K_{ш}$  – коэффициент шума драйвера,  $K_n$  – коэффициент усиления драйвера.

При шумовой полосе 1 ГГц мощность шума  $P_{шум}$  на выходе драйвера с двумя ШПУ равна -64,1 дБм или 139 мкВ на

нагрузке 50 Ом. При этом значение младшего разряда ( $LSB_1$ ) АЦП AD9208 равно:

$$LSB_1 = \frac{(1,7 \text{ Вп-п})}{2^{14}} = 104 \text{ мкВ.} \quad (2)$$

Это означает, что драйвер будет работать с данным АЦП как с 13-разрядным.

Динамический диапазон драйвера определяется как отношение выходной мощности к мощности наибольшей гармоники:

$$SFDR_{\text{драйвер}} = P_{\text{вых}} - P_i \quad (3)$$

где  $P_i$  – мощность наибольшей гармоники в выходном спектре.

Эквивалент эффективного числа бит (ENOB) для драйвера на частоте  $f_{\text{вх}} = 1200$  МГц можно высчитать по формуле:

$$ENOB_{\text{драйвер}} = \frac{(SFDR_{\text{драйвер}}) - 1,76}{6,02} = 10,6 \text{ бит.} \quad (4)$$

По данным из табл. 1 эффективная разрядность для АЦП AD9208 равна 9,4 бит при  $f_{\text{вх}} = 1800$  МГц. Таким образом, можно сделать вывод, что исследуемый драйвер не ухудшает эффективную разрядность АЦП.

### Выводы

Результаты исследований показали, что существующие отечественные СВЧ МИС ШПУ (1324УВ9У и 1324УВ11У в частности) пригодны для создания драйверов сверхскоростных АЦП с эффективной разрядностью до 10 бит на частотах до 2 ГГц. Это подтверждает целесообразность разработки специализированных СВЧ МИС двухканальных ШПУ с высоким уровнем линейности для использования в качестве драйверов сверхскоростных АЦП.

### Литература

1. Савченко Е. М. Методы обеспечения высокой динамической точности обработки сигнала в операционных усилителях с токовой обратной связью // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2009. – № 2 (223). – С. 83-92.
2. Будяков А. С., Прокопенко Н. Н., Савченко Е. М. и др. Опыт разработки и моделирования аналоговых микросхем с предельными параметрами на базе Российских биполярных технологий // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем: сб. науч. трудов всерос. науч.-практ. конф. – М.: ИППМ РАН, 2006. – С. 206-211.
3. Прокопенко Н. Н., Будяков П. С., Серебряков А. И. Архитектура СВЧ дифференциальных операционных усилителей с парафазным выходом // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2010. – № 1. – С. 571-576.
4. Савченко Е. М., Корнеев С. В., Будяков А. С. Предельные динамические параметры операционных усилителей с обратной связью по напряжению и усилителей с «токовой обратной связью» в линейном и нелинейном режимах // Электронный научный журнал «Исследовано в России». – 2006. – Т. 882. – С. 229-234.
5. Прокопенко Н. Н., Будяков А. С., Савченко Е. М. Операционные усилители с обобщенной токовой обратной связью // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2008. – № 1. – С. 330-333.
6. Стукач О. В. Форсирование характеристик сверхширокополосного усилителя Дарлингтона // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 6. – С. 150-152.
7. Дроздов Д. Г., Савченко Е. М., Зубков А. М. Результаты приборно-технологического моделирования комплементарной биполярной технологии с граничной частотой 10 ГГц и более // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2010. – № 1. – С. 66-69.
8. Дроздов Д. Г., Савченко Е. М. Особенности использования самосовмещения в комплементарной биполярной технологии // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2011. – № 2 (227). – С. 53-58.
9. Опыт-конструкторские разработки АО «СКТБ ЭС» [Электронный ресурс]. – URL: <https://sktbes.com/okt.html> (дата обращения: 29.09.2017).
10. Серия 1324 – СВЧ монолитные интегральные схемы [Электронный ресурс]. – URL: <http://pulsarnpp.ru/index.php/integralnye-mikroskhemy/seriya-1324> (дата обращения: 29.09.2017).
11. Драйвер высокоскоростного АЦП на основе широкополосного СВЧ усилителя мощности / Сав-

ченко Е. М., Будяков П. С., Сурков Н. С. // Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». – М.: АО «НПП «Пульсар», 2017. – С. 88-94.

12. ADC Drivers [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.linear.com/products/IF\\_Amplifiers\\_%7C\\_ADC\\_Drivers](http://www.linear.com/products/IF_Amplifiers_%7C_ADC_Drivers) (дата обращения: 29.09.2017).

## References

1. Savchenko E. M. Methods for ensuring high dynamic precision signal processing in current-feedback operational amplifiers. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2009, № 2 (223), pp. 83-92.
2. Budyakov A. S., Prokopenko N. N., Savchenko E. M. et al. Development and modeling of analog microchips with critical parameters, based on Russian bipolar technology. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem* [Issues of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Moscow, IPPM RAS Publ., 2006, pp. 206-211.
3. Prokopenko N. N., Budyakov P. S., Serebryakov A. I. Architecture of microwave differential operational amplifiers with para-phase output. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem* [Issues of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development], 2010, № 1, pp. 571-576.
4. Savchenko E. M., Korneev S. V., Budyakov A. S. Critical dynamic parameters of voltage-feedback and current-feedback operational amplifiers in linear and nonlinear mode. *Digital Scientific Journal «Issledovano v Rossii»* [Researched in Russia], 2006, Vol. 882, pp. 229-234.
5. Prokopenko N. N., Budyakov A. S., Savchenko E. M. Current-feedback generalized operational amplifiers. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem* [Issues of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development], 2008, № 1, pp. 330-333.
6. Stukach O. V. Direct parameter-extraction method for wideband Darlington amplifier. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University], 2005, Vol. 308, № 6, pp. 150-152.
7. Drozdov D. G., Savchenko E. M., Zubkov A. M. Results of process modeling of complementary bipolar technology with frequency limit 10 GHz or more. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem* [Issues of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development], 2010, № 1, pp. 66-69.
8. Drozdov D. G., Savchenko E. M. Issues of using the self-aligned process in complementary bipolar technology. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2011, № 2 (227), pp. 53-58.
9. JSC «SKTB ES» Design and Engineering Developments. – URL: <https://sktbes.com/okr.html> (accessed 29 September 2017).
10. Series 1324 – Microwave Monolithically Integrated Circuits. – URL: <http://pulsarmp.ru/index.php/integralnye-mikroskhemy/seriya-1324> (accessed 29 September 2017).
11. Savchenko E. M., Budyakov P. S., Surkov N. S. Microwave gain-block based high-speed ADC Driver. *Materialy XV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of XV Russian science and technical conference «Solid-state electronics. Complex functional blocks of radio-electronic equipment»]. Moscow, JSC «S&PE «Pulsar», 2017, pp. 88-94.
12. ADC Drivers. – URL: [http://www.linear.com/products/IF\\_Amplifiers\\_%7C\\_ADC\\_Drivers](http://www.linear.com/products/IF_Amplifiers_%7C_ADC_Drivers) (accessed 29 September 2017).