

**Прецизионный аналого-цифровой фазовращатель
с изменением фазы 0–360° L-диапазона**

*А.Г. Ефимов¹, Е.О. Купцов¹, В.П. Мартынова¹,
А.Б. Спиридонов², Ю.В. Сурин³*

¹*Обособленное подразделение ООО «Ижевский радиозавод»
в г. Москве, г. Москва, Россия*

²*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

³*АО «Научно-исследовательский институт микроприборов-К»,
г. Москва, Россия*

abspiridonov@gmail.com

В современных системах спутниковой связи, бортовых ретрансляторах, использующих АФАР, в состав приемных и передающих модулей входят, как правило, дискретные фазовращатели, выполненные в виде гибридно-интегральных схем или монолитных схем. В работе рассмотрен бескорпусной модуль аналого-цифрового фазовращателя с изменением фазы 0–360° на отечественных управляющих СВЧ МДП-варикапах, позволяющий обеспечить точность установки фазы дискрета не более 0,5°. Предложена оригинальная схема аналого-цифрового фазовращателя с изменением фазы 0–360° L-диапазона с использованием моста Ланге и фазосдвигающих ячеек на четырех СВЧ МДП-варикапах. Определены требования к виду вольт-фарадной характеристики и коэффициенту перекрытия по емкости МДП-варикапа. Предложенная схема аналого-цифрового фазовращателя позволяет даже при предельной (критической) частоте СВЧ МДП-варикапа не более 15 ГГц обеспечить в L-диапазоне потери фазовращателя не более 1,5 дБ. Управление аналого-цифровым фазовращателем с изменением фазы 0–360° осуществлено платой цифрового управления. Использован 8-разрядный ЦАП. Цена дискрета управления фазовращателя 1,4° при 256 количествах состояний ЦАП. Полученные характеристики прецизионного аналого-цифрового фазовращателя позволяют сделать вывод о перспективности его использования для решения вопросов синхронизации активного имитатора радиомишеней при испытаниях радиолокаторов с синтезированной апертурой, а также в составе приемных и передающих модулей малоэлементных АФАР для L-диапазона

Ключевые слова: МДП-варикап; коэффициент перекрытия по емкости; фазовращатель; микроконтроллер; ЦАП; интерфейс

Для цитирования: Прецизионный аналого-цифровой фазовращатель с изменением фазы 0–360° L-диапазона / А.Г. Ефимов, Е.О. Купцов, В.П. Мартынова и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 3. – С. 285–292. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-3-285-292

Precision Analog-to-Digital Phase Shifter with Phase 0–360° Change of *L*-Range

*A.G. Efimov¹, E.O. Kuptsov¹, V.P. Martynova¹,
A.B. Spiridonov², Yu.V. Surin³*

¹*A separate division «Izhevsky Radiozavod» Ltd., Moscow, Russia*

²*National Research University of Electronic Technology,
Moscow, Russia*

³*Corporation «NIIMP-K», Moscow, Russia*

abspiridonov@gmail.com

Abstract: In modern satellite communication systems, the side repeaters, using an active phased array antenna receiving and transmitting modules, include, as a rule, the discrete phase shifters. The latter are designed in the form of the hybrid integral circuits or monolithic circuits. In this study the open-frame module of analog-to-digital shifter with phase 0–360° change on domestic controlling SHF MIS varicaps, allowing to maintain the setting phase accuracy not more than 0.5, has been considered. An original scheme of the analog-to-digital phase shifter with the phase change of 0–360° *L*-range, using the Lange coupler and the phase sifting cells on four microwave MIS varicaps has been proposed. The requirements for the form of the volt-farad feature and the ratio of the overlap capacitance of MIS varicap have been defined. It has been shown that the proposed scheme of the analog phase shifter permits even at the maximum (critical) frequency of SHF MIS varicaps no more than 15 GHz to ensure the loss of the phase shifter in *L*-range no more than 1.5 dB. Operating of analog-to-digital phase shifter with the phase 0–360° change has been realized by the board digital control. The 8 digit analog converter has been used. The bit width of the discrete control of the phase shifter is 1.4 degree with 256 quantities of the analog converter states. The obtained characteristics of the precision analog-to-digital phase shifter permit to make a conclusion about the prospects of implementing it for solving the issues of synchronization of the active radio target simulator for synthesizing the aperture radars testing and, also, in the composition of receiving and transmitting modules of the few elemental active phased array antennas for *L*-range.

Keywords: MIS varicap; capacity contact ratio; phase shifter; microcontroller; digital analog converter; interface

For citation: Efimov A.G., Kuptsov E.O., Martynova V.P. et al. Precision analog-to-digital phase shifter with phase 0–360° change of *L*-range. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 3, pp. 285–292. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-3-285-292

Введение. Дискретные фазовращатели, выполненные в виде гибридно-интегральных схем или монокристаллических схем, как правило, входят в состав приемных и передающих модулей современных систем спутниковой связи, бортовых ретрансляторов, использующих АФАР. Рассматриваемый аналого-цифровой фазовращатель отличается от дискретного фазовращателя многофункциональностью (реализуется любой выбор дискретности необходимых разрядов при разработке АФАР без изменения схемного решения) и высокой точностью установки фазы. Серийно выпускаемые дискретные фазовращатели имеют разрядность не более шести. Аналого-цифровой фазовращатель позволяет реализовать 8-разрядный фазовращатель с ценой дискрета $1,4^\circ$, что необходимо для решения вопросов синхронизации активного имитатора радиомишеней при испытаниях радиолокаторов с синтезированной апертурой [1].

Гибридно-интегральная схема аналого-цифрового фазовращателя. Аналого-цифровой фазовращатель на отечественных управляющих СВЧ МДП-варикапах с изменением фазы $0-360^\circ$ может быть реализован путем каскадирования ячеек с изменением фазы $0-60^\circ$, выполненных по Т-схеме [2], с использованием 12 МДП-варикапов. С целью повышения надежности, получения оптимальных потерь аналого-цифрового фазовращателя с изменением фазы $0-360^\circ$ реализована схема на четырех МДП-варикапах. Используемый в схеме МДП-варикап разработан в АО «НИИ МП-К» (г. Москва, Россия). МДП-варикап выполнен на КСКД-структуре. Вольт-фарадная характеристика и эквивалентная схема МДП-варикапа приведены на рис.1. Данный управляющий полупроводниковый прибор является потенциальным прибором, ток утечки составляет не более 10^{-8} А. Наличие двух устойчивых состояний емкости C_{\max} и C_{\min} и линейного участка изменения емкости дает большие перспективы для их применения в фазовращателях с плавным изменением фазы.

МДП-варикап имеет предельную частоту (критическую) не более 15 ГГц, коэффициент перекрытия по емкости

$$K = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} = 2,5 \dots 2,7.$$

Характерная особен-

ность МДП-варикапа, выполненного на КСКД-структуре, – слабая зависимость активного сопротивления R_s от управляющего напряжения. Таким образом, аналого-цифровой фазовращатель оптимизирован по потерям без дополнительных схемных решений в фазосдвигающих ячейках [3]. Допустимый уровень СВЧ-сигнала для использования МДП-варикапа в управляющих СВЧ-устройствах не более 60 мВт. На рис.2 приведены топология и электрическая принципиальная схема аналого-цифрового фазовращателя с изменением фазы $0-360^\circ$ на четырех МДП-варикапах. Нумерация участков топологии на рис.2,а соответствует нумерации узлов на рис.2,б.

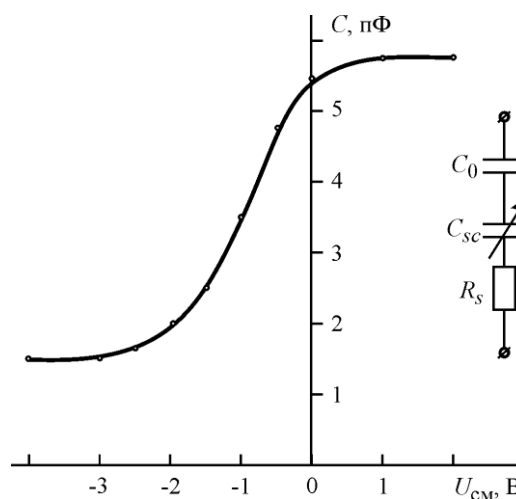


Рис.1. Вольт-фарадная характеристика и эквивалентная схема МДП-варикапа (C_0 – емкость диэлектрика, C_{sc} – емкость области пространственного заряда, R_s – последовательное эквивалентное сопротивление)

Fig.1. The volt-farads' characteristic and equivalent circuit of MOS varactor (C_0 – capacitance of the dielectric, C_{sc} – capacity space-charge region, R_s – equivalent serial resistance)

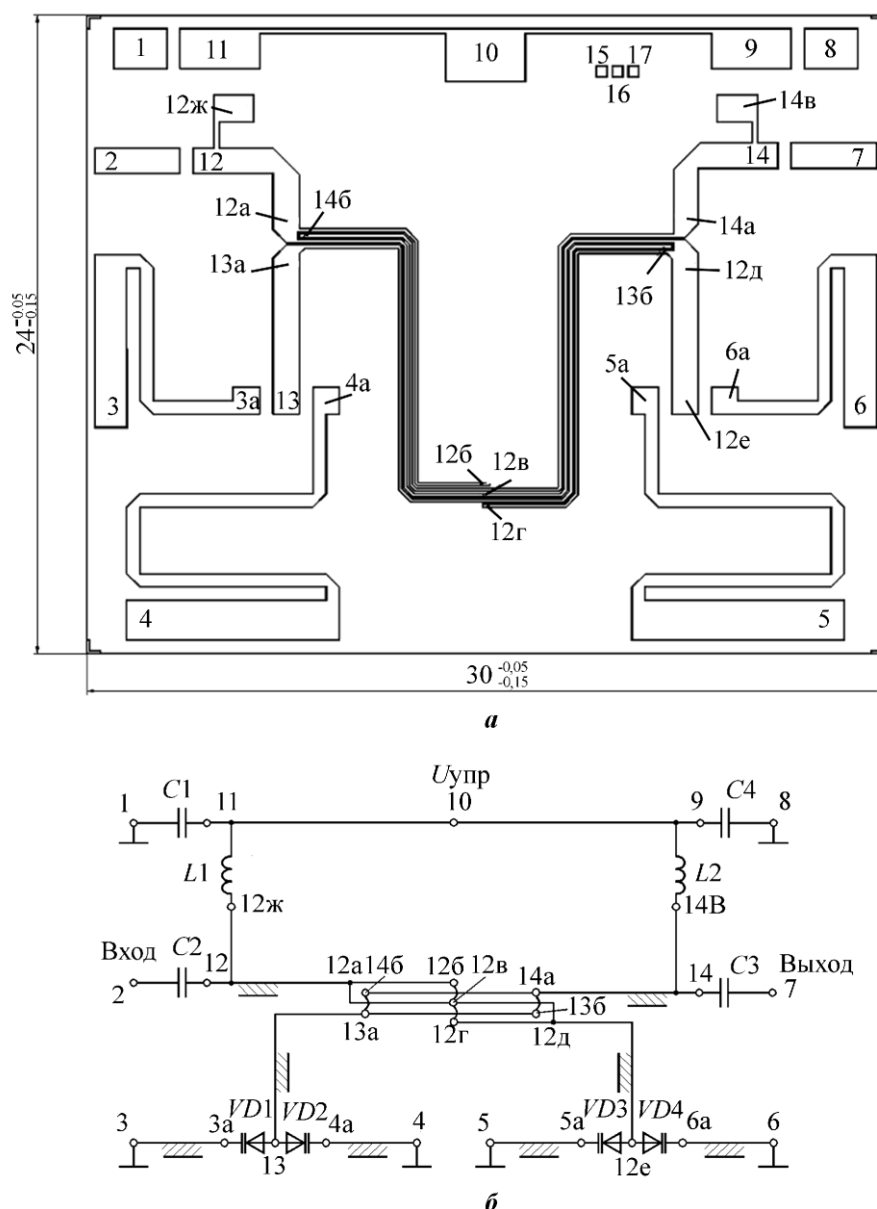


Рис.2. Топология (а) и схема электрическая принципиальная (б) аналого-цифрового фазовращателя с изменением фазы 0–360°
 Fig.2. The topology (a) and the schematic circuit diagram (b) of the analog phase shifter with a phase change of 0–360°

Аналоговый фазовращатель L -диапазона представляет собой проходной фазовращатель с использованием моста Ланге, в плечи которого включены фазосдвигающие ячейки (рис.3), а в качестве активных элементов использованы МДП-варикапы. Элементы схемы фазосдвигающей ячейки (МДП-варикапы и индуктивные шлейфы) подобраны следующим образом. При управляющем напряжении, соответствующем двум стабильным участкам вольт-фарадной характеристики, возникает последовательный резонанс поочередно в каждом из плеч фазосдвигающей ячейки. Между режимами последовательного резонанса первого и второго плечей возникает режим параллельного резонанса двух плеч фазосдвигающей ячейки.

При подаче на МДП-варикап управляющего напряжения, соответствующего максимальной емкости C_{\max} варикапа, возникает последовательный резонанс в первом плече. Такой режим соответствует начальному состоянию работы схемы. Рабочим является первое плечо. Сопротивление индуктивного шлейфа в этом случае равно:

$$X_{L1} = -X_{C_{\max}} = j \frac{1}{\omega C_{\max}}.$$

Реактивное сопротивление первого плеча

$$X_I = X_{L1} + X_C, \quad X_I = j \left(\frac{1}{\omega C_{\max}} - \frac{1}{\omega C} \right)$$

в этом случае носит емкостной характер.

При подаче управляющего напряжения, соответствующего минимальной емкости C_{\min} варикапа, возникает последовательный резонанс во втором плече схемы фазовращающей ячейки. Индуктивный шлейф в этом случае должен иметь сопротивление

$$X_{L2} = -X_{C_{\min}} = j \frac{1}{\omega C_{\min}}.$$

Рабочим является только второе плечо. Таким образом, режим работы схемы аналогичен режиму при последовательном резонансе в первом плече и соответствует фазовому сдвигу $\varphi = 0 + 2\pi$, или 360° .

Реактивное сопротивление второго плеча

$$X_{II} = X_{L2} + X_C, \quad X_{II} = j \left(\frac{1}{\omega C_{\min}} - \frac{1}{\omega C} \right)$$

в этом случае носит индуктивный характер.

При подаче управляющего напряжения, устанавливающего емкость варикапа в интервале $C_{\max} < C < C_{\min}$, рабочими будут оба плеча схемы фазосдвигающей ячейки.

Отметим, что рассмотренная схема аналого-цифрового фазовращателя с плавным изменением фазы $0-360^\circ$ на четырех МДП-варикапах реализуется согласно вольт-фарадной характеристике на рис.1. При этом коэффициент перекрытия по емкости K_{Π} должен быть не менее 2,5. Если K_{Π} менее 2,5, то длина одного из индуктивных шлейфов в фазосдвигающей ячейке начинает вырождаться и стремится к нулевой длине. В этом случае схема становится ненастраиваемой.

Конструктивно аналого-цифровой фазовращатель выполнен в виде гибридно-интегральной схемы на поликоре толщиной 1 мм. Для минимизации общей площади гибридно-интегральной схемы мост Ланге выполнен в свернутом варианте. Размер платы фазовращателя $30 \times 24 \times 1$ мм.

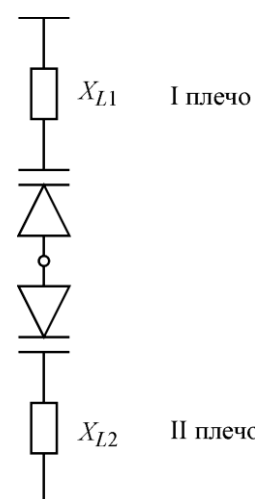


Рис.3. Фазосдвигающая ячейка
Fig.3. Phase-shifting cell

Плата цифрового управления. На рис.4 приведена функциональная схема платы управления аналого-цифровым фазовращателем на МДП-варикапах. В качестве основных элементов плата содержит драйвер, микроконтроллер, цифроаналоговый преобразователь. Внешняя связь осуществляется с помощью интерфейса RS-485. Плата реализована на микроконтроллере и ЦАП с диапазоном рабочего напряжения от -15 В до $+15\text{ В}$. Микроконтроллер платы через интерфейсную микросхему получает команду от ЭВМ на установку фазы, преобразует команду в параллельный код управления и выдает команду на ЦАП. Затем ЦАП преобразует код в аналоговый сигнал управления фазовращателем. Управление от ЭВМ платой цифрового управления реализовано по интерфейсу RS-485 со скоростью $922,6\text{ кБит/с}$. Интерфейс RS-485 дает возможность собирать платы цифрового управления в «гирлянду» до 32 абонентов, что необходимо в случае реализации многоэлементной АФАР.

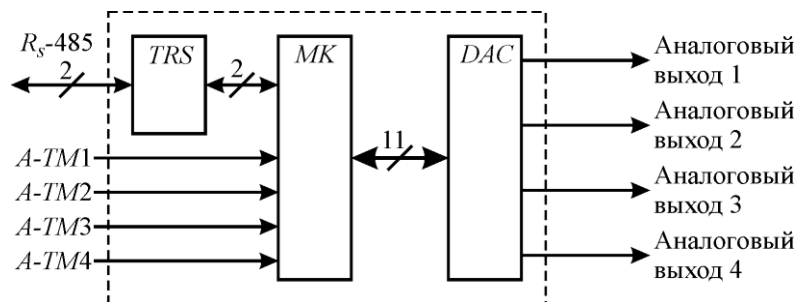


Рис.4. Функциональная схема платы управления
Fig.4. Functional diagram of the control board

Применение 8-разрядного ЦАП дает возможность управлять аналоговым фазовращателем с точностью $\Delta U/256$, где ΔU – диапазон управляемого напряжения. Цена дискрета управления фазовращателя $360^\circ/N_{\text{цап}} = 1,4^\circ$, где $N_{\text{цап}} = 256$ – количество состояний ЦАП. При увеличении разрядности ЦАП соответственно уменьшается дискрет фазовращателя. Следует учитывать, что с увеличением дискретности ЦАП схема управления внешней микросхемой ЦАП поменяется на последовательный интерфейс I2C. Это увеличит время установки состояний фазовращателя. Для решения проблемы скорости управления фазовращателя можно перейти на использование микроконтроллера или микропроцессора со встроенным ЦАП. При выборе микроконтроллера или микропроцессора необходимо учитывать диапазон управляемых напряжений.

В плате цифрового управления реализована схема контроля установки аналоговых сигналов управления фазовращателями. Схема контроля используется для регулировки

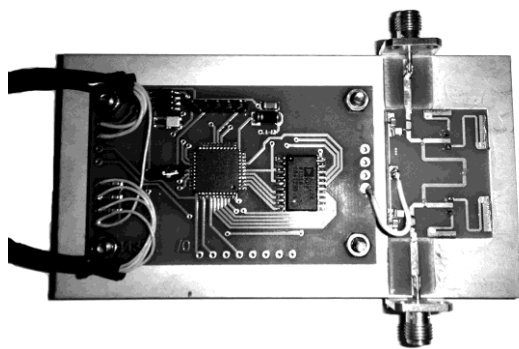


Рис.5. Макет фазовращателя
Fig.5. Photo layout of the phase shifter

и проверки работоспособности платы, так как установленное входное напряжение управления фазовращателем подается в микроконтроллер на 10-разрядный АЦП. На этапе отладки платы цифрового управления проверяется работоспособность и точность установки управляющего напряжения. Схемотехническое решение платы в части управления аналоговым фазовращателем реализовано для четырех независимых каналов с аналоговыми фазовращателями. Конструктивно плата цифровой

схемы управления выполнена на стеклотекстолите DE 104 1,000L H 035/4000 РС-4101/21. Плата двухслойная, размер платы 65 × 41 мм. На рис.5 приведена фотография экспериментального образца прецизионного аналого-цифрового фазовращателя.

Экспериментальные результаты. Измерения величин потерь, КСВН и фазы проводились в полосе частот 810–870 МГц на центральной частоте 840 МГц с помощью векторного анализатора цепей R&SZVL-13. Управление МДП-варикапами в модуле фазовращателя осуществлялось платой цифрового управления. С целью определения точности установки фазы при цифровом управлении МДП-варикапами выбран фазовый шаг 11,25°, который является меньшим дискретом 5-дискретного фазовращателя: 11,25; 22,5; 45; 90; 180°.

Потери при изменении напряжения смещения на МДП-варикапах от 0 до 5 В составляют не более 1,4 дБ, КСВН – не более 1,5, точность установки фазы для выбранных разрядов менее 0,5°. Точность установки фазы аналого-цифровым фазовращателем ограничивается только средствами измерения. Программное обеспечение платы позволяет проводить автоматическую подстройку фазы при изменении температурных параметров. Для сравнения отметим, что ИС аналого-цифрового фазовращателя с изменением фазы 0–400° НМС934LP5Е фирмы Analog Devices в диапазоне частот 1,0–2,0 ГГц имеет потери 3,5 дБ при управляющем напряжении 0–13 В [4].

Заключение. Рассмотренный экспериментальный образец прецизионного аналого-цифрового фазовращателя *L*-диапазона с точностью установки фазы дискрета не более 0,5° может использоваться в составе приемных и передающих модулей малоэлементных АФАР [5] взамен дискретных фазовращателей, а также для синхронизации активного имитатора радиомишеней при проведении испытаний радиолокаторов с синтезированной апертурой.

Литература

1. *Лепёхина Т.А., Николаев В.Н.* Вопросы синхронизации активного имитатора радиомишеней для испытаний радиолокаторов с синтезированной апертурой // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2016: сб. тр. / Под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2016. – Ч. 1. – С. 236–239.
2. Микрополосковый фазовращатель на основе МДП варакторов / *Е.Н. Егоров, Л.К. Жохов, Ю.В. Лебедев и др.* // Специальная электроника. Сер. 10. – 1979. – Вып. 2 (6).
3. *John I., Bernard D.* Low loss 360 degree X-band analog phase shifter // Patent N. 5, 119, 050, Jun. 2, 1992.
4. *Кочемасов В., Шадский В.* Твердотельные СВЧ-фазовращатели // Электроника, наука, технология, бизнес. – 2017. – №1. – С. 86–100.
5. *Selin J.R.* Continuously variable L-band monolithic GaAs phase shifter // Microwave J. – 1987. – September. – P. 211–217.

Поступила 20.10.2017 г.; принята к публикации 27.02.2018 г.

Ефимов Андрей Геннадьевич – доктор технических наук, начальник отдела обособленного подразделения ООО «Ижевский радиозавод» в г. Москве (Россия, 124460, г. Москва, ул. Генерала Алексеева, д. 8), av45362@akado.ru

Купцов Евгений Олегович – главный специалист обособленного подразделения ООО «Ижевский радиозавод» в г. Москве (Россия, 124460, г. Москва, ул. Генерала Алексеева, д. 8), dissident-sw@mail.ru

Мартынова Валентина Петровна – доктор технических наук, главный специалист обособленного подразделения ООО «Ижевский радиозавод» в г. Москве (Россия, 124460, г. Москва, ул. Генерала Алексеева, д. 8), mvp45@bk.ru

Спиридонов Александр Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), abspiridonov@gmail.com

Сури́н Ю́рий Васи́льевич – кандидат технических наук, заместитель директора АО «Научно-исследовательский институт микроприборов-К» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, Центральный проспект, д.5), niimpk@mail.compnet.ru

References

1. Lepyohina T.A., Nikolaev V.N. *Voprosy sinhronizacii aktivnogo imitatora radiomishenej dlya ispytaniy radiolokatorov s sintezirovannoj aperturoj. Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanoelektronnyh sistem 2016. Sbornik trudov pod obshch. red. akademika RAN A.L. Stempkovskogo* [Synchronizing active simulator radio targetstesting of synthesized aperture radar. Problems of development of perspective micro - and nano electronic systems 2016.Collection of papers]. Moscow, IPPM RAN Publ., 2016. Chast' 1, pp. 236-239. (In Russian).
2. Egorov E.N., Zhohov L.K., Lebedev YU.V., Martynova V.P., Saprykin V.G. Mikropoloskovyj fazovrashchatel' na osnove MDP varaktorov [Microstrip phase shifter on the basis of the MIS varactors]. *Special'naya elektronika = Special electronics*, 1979, seriya 10, vol. 2 (6). (In Russian).
3. John I., Bernard D. *Low loss 360 degree X-band analog phase shifter*. Patent Number 5, 119, 050 от Jun. 2, 1992.
4. Kochemasov V., Shadskij V. Tverdotel'nye SVCH-fazovrashchateli [Solid-state microwave phase shifters]. *Elektronika, nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics, science, technology, business*, 2017, no.1, pp. 86–100. (In Russian).
5. John R. Selin. Continuously variable L-Band monolithic GaAs phase shifter. *Microwave journal*, September 1987, pp. 211–217.

Submitted 20.10.2017; Accepted 27.02.2018.

Information about the authors:

Andrey G. Efimov – Dr. Sci. (Tech.), Head of the Separate Division Department, ООО «Izhevskiy Radiozavod» Moscow (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, General Alekseev str., 8), av45362@aKado.ru

Evgeniy O. Kuptsov – Chief Specialist of the Separate Division Department, ООО «Izhevskiy Radiozavod» Moscow (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, General Alekseev str., 8), dissident-sw@mail.ru

Valentina P. Martynova – Dr. Sci. (Tech.), Chief Specialist of the Separate Division Department, ООО «Izhevskiy Radiozavod» Moscow (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, General Alekseev str., 8).mvp45@bk.ru

Alexander B. Spiridonov – Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof. of the Physics Department, National University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1) abspiridonov@gmail.com

Yuriy V. Surin – Cand. Sci. (Tech.), Deputy Director of JSC «Scientific research Institute of micro device –K» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Central prospect, 5) niimpk@mail.compnet.ru