

## УСТАНОВОЧНОЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОХОДНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Ю.С. Русов  
Д.И. Иевлев

rusov.yu.s@gmail.com  
idi.96@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Представлены результаты разработки и оптимизации установочного приспособления для измерения электрических характеристик интегрированных элементов проходных фазированных антенных решеток. Предложена конструкция установочного приспособления, обеспечивающая простоту в эксплуатации при приемлемой достоверности и повторяемости результатов измерений. Приведены результаты оптимизации размеров согласующих переходов приспособления и обоснованы требования к характеристикам контактных поверхностей изделия. На основе предложенной конструкции разработаны приспособления, предназначенные для применения в лабораторных исследованиях и в серийном производстве. Представлены результаты реализации устройства в Кс-диапазоне частот

### Ключевые слова

*Установочное приспособление, интегрированный элемент, фазированная антенная решетка, проходная фазированная антенная решетка, электрические характеристики, измерение*

Поступила 06.09.2018  
© Автор(ы), 2019

---

**Введение.** В настоящее время в радиолокации широко применяют проходные фазированные антенные решетки (ФАР), содержащие до нескольких десятков тысяч элементов. В сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн часто используются интегрированные элементы ФАР, выполненные на базе волноводных ферритовых фазовращателей и волноводно-диэлектрических излучателей [1–3]. Применение интегрированных элементов ФАР дает возможность проведения индивидуального входного контроля их параметров и упрощает процесс сборки антенны.

Входной контроль элементов ФАР предполагает измерение их фазовых характеристик и частотных зависимостей вносимого ослабления. Схема измерительного стенда для проведения таких исследований приведена на рис. 1. При измерении электрических характеристик элемент

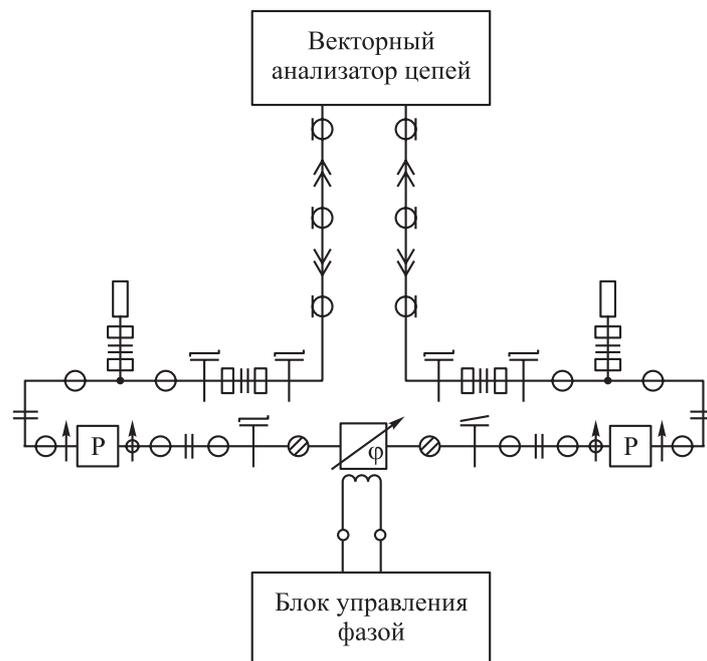


Рис. 1. Схема измерительного стенда

ФАР размещается в установочном приспособлении, обеспечивающем подключение его к тракту измерительного стенда и возможность быстрой смены исследуемых устройств. Кроме того, установочное приспособление выполняет функцию соединения выводов фазовращателя с блоком управления фазой.

Вносимое ослабление, измеряемое стендом, включает в себя составляющие:

$$S_{21} = S_{21 \text{ ЭФАР}} + S_{21 \text{ П}} + S_{21 \text{ фл}} + S_{21 \text{ ст}}$$

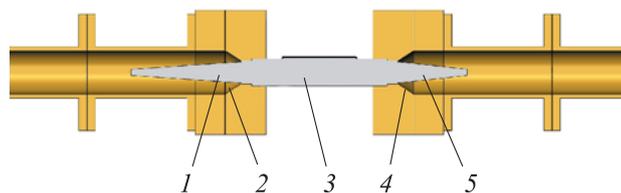
где  $S_{21}$  — значения, отображаемые на экране векторного анализатора цепей;  $S_{21 \text{ ЭФАР}}$  — ослабление в элементе ФАР;  $S_{21 \text{ П}}$  — ослабление в волноводных переходах установочного приспособления, применяемых для соединения элемента ФАР с волноводным трактом измерительного стенда;  $S_{21 \text{ фл}}$  — ослабление, вносимое соединением фланцев стенда и установочного приспособления;  $S_{21 \text{ ст}}$  — ослабление в тракте измерительного стенда.

Для достоверного определения вносимого элементом ФАР ослабления  $S_{21 \text{ ЭФАР}}$  необходимо вычесть из полученной величины  $S_{21}$  остальные перечисленные выше составляющие, либо минимизировать их. Ослабление в тракте измерительного стенда  $S_{21 \text{ ст}}$  может вычитаться из измеренной ве-

личины  $S_{21}$  при соответствующей калибровке измерительного стенда. Внутренние полости установочного приспособления без помещенного в него элемента ФАР представляют собой запердельный волновод, в котором не могут распространяться электромагнитные волны с рабочими для элемента ФАР частотами. В связи с этим калибровка стенда проводится при исключенном из тракта установочном приспособлении и составляющие  $S_{21п}$  и  $S_{21фл}$  не могут быть скомпенсированы калибровкой. Представляет практический интерес создание установочного приспособления, конструкция которого обеспечивает значения составляющих  $S_{21п}$  и  $S_{21фл}$  в пределах допустимой погрешности измерений.

Рассмотрены установочные приспособления для элементов ФАР миллиметрового и сантиметрового диапазонов длин волн, аналогичных элементам, представленным в работах [3–7].

**Конструкция установочного приспособления.** Одна из возможных конструкций установочного приспособления с элементом ФАР приведена на рис. 2. Установочное приспособление состоит из двух конических переходов 2 и 4, в которые вставляются излучатели 1 и 5 интегрированного элемента ФАР 3, тем самым образуя переходы, согласующие элемент ФАР с волноводным трактом измерительного стенда.



**Рис. 2.** Установочное приспособление, состоящее из двух конических переходов:

1, 5 — излучатели; 2, 4 — конические переходы; 3 — интегрированный элемент ФАР

К достоинствам данного приспособления можно отнести простоту конструкции и установки элемента ФАР. При этом изделие обладает несколькими недостатками, такими как необходимость обеспечения подвижного соединения волноводов, сложность подключения блока управления фазой к контактным площадкам фазовращателя, снижение достоверности результатов измерений вследствие быстрого износа контактных поверхностей при активной эксплуатации. Опыт применения данного установочного приспособления показал его непригодность при исследовании партии даже из нескольких десятков элементов ФАР.

Для устранения перечисленных выше недостатков предлагается разъемная конструкция установочного приспособления (рис. 3). Изделие состоит из нижнего неподвижного основания 1 и верхней съемной крышки 2 с эргономичной ручкой 3, разделенных плоскостью 4, проходящей через продольную ось устанавливаемого элемента ФАР. Совмещение осей половин сборки обеспечивается направляющими штифтами. Приспособление обеспечивает быстрый и простой доступ к контактным площадкам фазовращателя

с использованием подвижных подпружиненных контактов 5 и 6. Жесткое крепление узла к фланцам волноводов измерительного стенда позволяет повысить достоверность результатов измерений. Конструкция позволяет производить быструю смену элементов ФАР во время исследований.

Для минимизации потерь энергии электромагнитной волны через щели, возникающие при стыковке половин приспособления, могут применяться контактные прокладки с пружинящими лепестками [8, 9]. Однако в режиме частой многократной смены исследуемых элементов ФАР пружинящие лепестки прокладок при недостаточной механической прочности могут отламываться и попадать в волноводный тракт, нарушая достоверность измерений. Свободно от указанного недостатка контактное соединение без прокладок, которое может применяться в рассматриваемом устройстве при условии обеспечения высокого качества

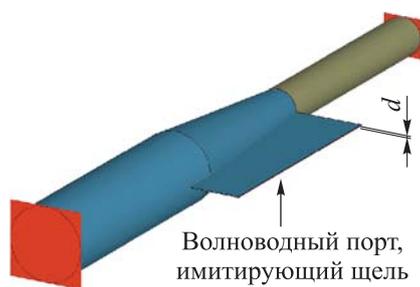


Рис. 4. Модель перехода с продольной щелью

поверхностей при изготовлении деталей [10]. Для обоснования требований к плоскостности и шероховатости стыкуемых поверхностей проведено моделирование влияния размера щели на коэффициент передачи устройства. Модель перехода с продольной щелью приведена на рис. 4, а результаты расчетов коэффициента передачи  $S_{21п}$  в диапазоне частот для различных значений

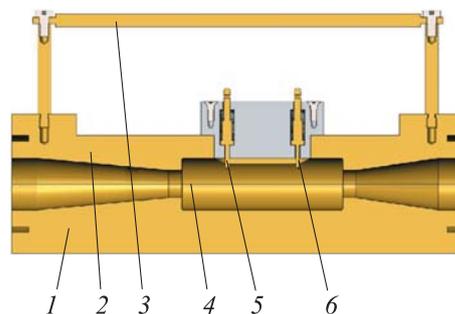
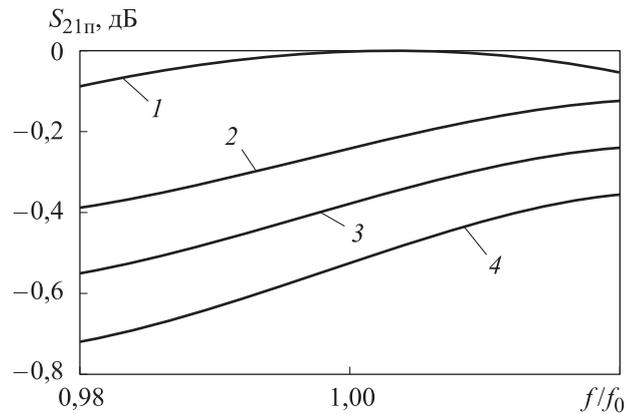


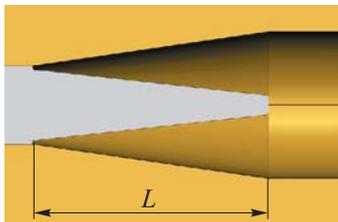
Рис. 3. Продольное сечение разъемного установочного приспособления: 1 — неподвижное основание; 2 — верхняя съемная крышка; 3 — эргономичная ручка; 4 — плоскость; 5, 6 — подвижные подпружиненные контакты



**Рис. 5.** Частотные зависимости коэффициента передачи при значениях размера щели  $d = 0$  (1), 0,02 (2), 0,04 (3) и 0,06 мм (4)

поперечного размера щели  $d$  — на рис. 5. Исследование выполнено на примере одного из переходов установочного приспособления для интегрированных элементов проходных ФАР Ку-диапазона частот.

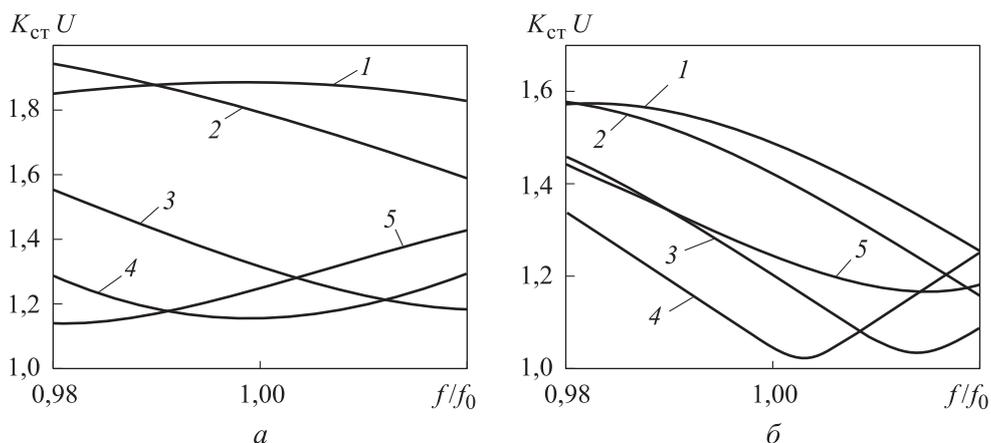
Результаты показывают, что при критическом значении ослабления 0,4 дБ на центральной частоте значение величины  $d$  не может превышать 0,04 мм. В этом случае допуск на плоскостность стыкуемых поверхностей должен составлять не более 0,02 мм.



**Рис. 6.** Модель согласующего перехода

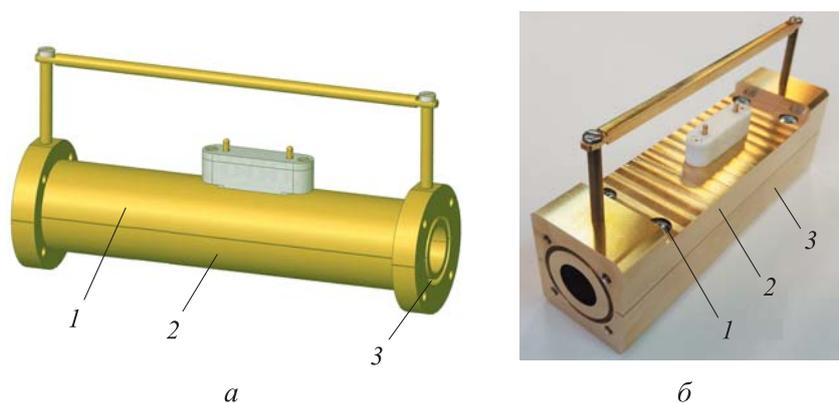
Согласование элемента ФАР с круглым волноводом тракта осуществляется с помощью конических переходов, внутрь которых помещаются диэлектрические стержневые излучатели. Для снижения коэффициента отражения необходима оптимизация волноводно-диэлектрических переходов. Переход, в котором варьируемым параметром является длина конического участка волновода  $L$ , показан на рис. 6, результаты моделирования — на рис. 7. Длина оптимизированного перехода  $L$  составляет  $1,1\lambda$  и  $1,99\lambda$  для излучателей с длиной диэлектрического стержня  $\lambda$  и  $2\lambda$  соответственно ( $\lambda$  — длина волны на средней частоте рабочего диапазона).

Вариант установочного приспособления, предназначенный для использования в условиях серийного производства, приведен на рис. 8, а. Для ускорения процесса смены исследуемых устройств верхняя съемная крышка 1 обладает достаточной массой, обеспечивающей требуемый прижим стыкуемых поверхностей, что позволяет совмещать ее с нижним основанием 2 без дополнительных элементов крепления. В конструкции



**Рис. 7.** Частотные зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению для волноводно-диэлектрического перехода:

*а* — с длиной диэлектрического стержня  $\lambda$  ( $1 - L = 0,8\lambda$ ;  $2 - L = 0,9\lambda$ ;  $3 - L = \lambda$ ;  $4 - L = 1,1\lambda$ ;  $5 - L = 1,15\lambda$ ); *б* — с длиной диэлектрического стержня  $2\lambda$  ( $1 - L = 1,7\lambda$ ;  $2 - L = 1,83\lambda$ ;  $3 - L = 1,93\lambda$ ;  $4 - L = 1,99\lambda$ ;  $5 - L = 2,17\lambda$ )



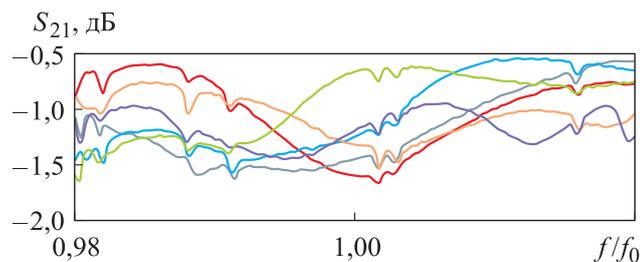
**Рис. 8.** Установочные приспособления:

*а* — для использования в серийном производстве ( $1$  — верхняя съемная крышка;  $2$  — нижнее основание;  $3$  — дроссельная канавка); *б* — для лабораторных исследований элементов ФАР Ку-диапазона частот ( $1$  — резьбовое крепление;  $2$  — верхняя съемная крышка;  $3$  — нижнее основание)

предусмотрены стандартные фланцы, но допускается верхнюю съемную крышку не притягивать к фланцам волноводов измерительного тракта винтовыми соединениями, что позволяет снизить среднее время смены элемента ФАР. При этом для уменьшения потерь энергии электромагнитной волны, вызванных неплотным прилеганием фланцев, на стыкуемых поверхностях фланцев выполняются кольцевые дроссельные канавки 3.

Пример реализации конструкции установочного приспособления, предназначенного для лабораторных исследований элементов ФАР Ку-диапазона частот, показан на рис. 8, б. В целях получения достоверных результатов измерения вносимого элементом ФАР ослабления в конструкции предусмотрено дополнительное резьбовое крепление 1, обеспечивающее прижатие верхней съемной крышки 2 к нижнему основанию 3. Невозможность обеспечения прижатия этих частей установочного приспособления за счет магнитных элементов обусловлена влиянием их магнитных полей на намагниченность ферритового стержня фазовращателя исследуемого элемента ФАР [11].

Работоспособность приспособления проверена при исследовании экспериментальной партии из 50 элементов ФАР. Характеристики экспериментального образца элемента ФАР, полученные с использованием предлагаемого приспособления, приведены на рис. 9.



**Рис. 9.** Частотные характеристики ослабления, вносимого элементом ФАР в различных фазовых состояниях

Для элементов ФАР Ку-диапазона частот, выполненных на базе ферритового фазовращателя с продольным намагничиванием ферритового стержня [3], характерны средние значения вносимого ослабления около 1,4 дБ и максимальные до 1,8 дБ. При этом измеренные средние значения вносимого ослабления составили 1,2...1,4 дБ, а максимальные — не более 1,7 дБ. Таким образом, измеренные характеристики ослабления соответствуют ожидаемым для исследованных элементов ФАР, что свидетельствует о работоспособности разработанной конструкции установочного приспособления. Достоверность результатов измерений также подтверждается повторяемостью получаемых значений при многократном размещении в приспособлении одного и того же образца элемента ФАР.

**Заключение.** Предложена конструкция установочного приспособления, которое можно использовать как в лабораторных исследованиях, так и в серийном производстве. Изделие позволяет проводить измерения

фазовых характеристик и вносимого ослабления интегрированных элементов проходных ФАР, содержащих волноводно-диэлектрические излучатели. Работоспособность конструкции подтверждена результатами исследования экспериментальной партии элементов ФАР Ку-диапазона частот.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М. и др. Антенны и устройства СВЧ. М., Радиотехника, 2006.
- [2] Колесников В.Л., Афанасьев Ю.Н., Канащенков А.И. и др. Антенный элемент фазированной антенной решетки. Патент 2194342 РФ. Заявл. 26.09.2001, опубл. 10.12.2002.
- [3] Голубцов М.Е., Русов Ю.С., Крехтунов В.М. и др. Элемент проходной фазированной антенной решетки. Патент 2461931 РФ. Заявл. 30.12.2010, опубл. 20.09.2012.
- [4] Афанасьев Ю.Н., Жигарев В.В., Захарьев Л.Н. и др. Приемопередающий элемент фазированной антенной решетки. Патент 2184410 РФ. Заявл. 26.06.2001, опубл. 27.06.2002.
- [5] Афанасьев Ю.Н., Батов П.Л., Виниченко Ю.П. и др. Антенный элемент проходной фазированной антенной решетки. Патент 2322737 РФ. Заявл. 04.12.2006, опубл. 20.04.2008.
- [6] Колесников В.Л., Манаенков Е.В., Евтюхин А.С. и др. Элемент фазированной антенной решетки. Патент 2592054 РФ. Заявл. 16.06.2015, опубл. 20.07.2016.
- [7] Рошаль Л.Б., Фирсенков А.И., Крехтунов В.М. и др. Элемент фазированной антенной решетки. Патент 2325741 РФ. Заявл. 06.10.2006, опубл. 27.05.2008.
- [8] Фельдштейн Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. М., Сов. радио, 1967.
- [9] Фролов И.И., Чиняков С.В., Копейкина Н.Д. и др. Фланцевое соединение волноводов. Патент 2562755 РФ. Заявл 06.11.2013, опубл. 10.09.2015.
- [10] Гусев В.П. Производство радиоаппаратуры. М., Высш. шк., 1970.
- [11] Бунин А.В., Геворкян В.М., Михалин С.Н. и др. Разъемное соединение фланцев волноводов СВЧ-тракта. Патент 2667324 РФ. Заявл. 27.12.2016, опубл. 18.09.2018.

**Русов Юрий Сергеевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства» МГТУ им. Н.Э. Баумана, начальник сектора НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Иевлев Даниил Игоревич** — студент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Русов Ю.С., Иевлев Д.И. Установочное приспособление для исследования электрических характеристик интегрированных элементов проходных фазированных антенных решеток. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2019, № 3, с. 4–13. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-3-4-13

**INSTALLATION DEVICE FOR RESEARCH OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

**Yu.S. Rusov**  
**D.I. Ievlev**

rusov.yu.s@gmail.com  
idi.96@mail.ru

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

The article presents the results of the development and optimization of the installation device for measuring the electrical characteristics of the integrated elements of the feedthrough phased antenna arrays. The design of the installation device providing simplicity in operation at acceptable validity and repeatability of results of measurements is offered. Results of optimization of the sizes of the matching transitions of the installation device are given and requirements to characteristics of contact surfaces of a product are proved. On the basis of the proposed design developed devices designed for use in laboratory research and mass production. The results of the device implementation in the Ku-band are presented

**Keywords**

*Mounting facility, integrated element, phased array antenna, feedthrough phased antenna array, electrical characteristics, measurement*

Received 06.09.2018

© Author(s), 2019

**REFERENCES**

- [1] Voskresenskiy D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., et al. *Antenny i ustroystva SVCh* [Antennas and microwave devices]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006.
- [2] Kolesnikov V.L., Afanas'yev Yu.N., Kanashchenkov A.I., et al. *Antenny element fazirovannoy antennoy reshetki* [Antenna element of phased array antenna]. Patent 2194342 RF. Appl. 26.09.2001, publ. 10.12.2002 (in Russ.).

- [3] Golubtsov M.E., Rusov Yu.S., Krekhtunov V.M., et al. Element prokhdnoy fazirovannoy antennoy reshetki [Feedthrough phased array antenna element]. Patent 2461931 RF. Appl. 30.12.2010, publ. 20.09.2012 (in Russ.).
- [4] Afanas'yev Yu.N., Zhigarev V.V., Zakhar'yev L.N., et al. Priemoperedayushchiy element fazirovannoy antennoy reshetki [Transceiving element of a phased array antenna]. Patent 2184410 RF. Appl. 26.06.2001, publ. 27.06.2002 (in Russ.).
- [5] Afanas'yev Yu.N., Batov P.L., Vinichenko Yu.P., et al. Antenny element prokhdnoy fazirovannoy antennoy reshetki [Antenna element of a feedthrough phased array antenna]. Patent 2322737 RF. Appl. 04.12.2006, publ. 20.04.2008 (in Russ.).
- [6] Kolesnikov V.L., Manaenkov E.V., Evtyukhin A.S., et al. Element fazirovannoy antennoy reshetki [Phased array antenna element]. Patent 2592054 RF. Appl. 16.06.2015, publ. 20.07.2016 (in Russ.).
- [7] Roshal' L.B., Firsenev A.I., Krekhtunov V.M., et al. Element fazirovannoy antennoy reshetki [Phased array antenna element]. Patent 2325741 RF. Appl. 06.10.2006, publ. 27.05.2008 (in Russ.).
- [8] Fel'dshteyn A.L., Yavich L.R., Smirnov V.P. Spravochnik po elementam volnovodnoy tekhniki [Handbook on elements of waveguide engineering]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1967.
- [9] Frolov I.I., Chinyakov S.V., Kopeykina N.D., et al. Flantsevoe soedinenie volnovodov [Waveguide flange connection]. Patent 2562755 RF. Appl. 06.11.2013, publ. 10.09.2015 (in Russ.).
- [10] Gusev V.P. Proizvodstvo radioapparatury [Manufacture of radio equipment]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970.
- [11] Bunin A.V., Gevorkyan V.M., Mikhalin S.N., et al. Raz'emnoe soedinenie flantsev volnovodov SVCh-trakta [Detachable connection of microwave waveguides flanges]. Patent 2667324 RF. Appl. 27.12.2016, publ. 18.09.2018 (in Russ.).

**Rusov Yu.S.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Radioelectronic Systems and Devices, Bauman Moscow State Technical University; Head of Sector, Research Institute of Radioelectronic Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Ievlev D.I.** — student, Department of Radioelectronic Systems and Devices, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Rusov Yu.S., Ievlev D.I. Installation device for research of electrical characteristics of integrated elements of feedthrough phased antenna arrays. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2019, no. 3, pp. 4–13 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2019-3-4-13