

16. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V. Ustoychivost' k oshibkam v otsenke vesovykh vektorov adaptivnogo prostranstvenno-vremennogo algoritma radiosvyazi na antennykh reshetkakh v releevskom kanale [Stability to errors in the estimation of weight vectors of adaptive existential algorithm of the radio communication on antenna lattices in the relei's channel], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 37-44.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Федосов Валентин Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: fed_val@tgn.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371632, 89525601246; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Ломакина (Емельяненко) Анна Владимировна – e-mail: avemelyanenko@sfedu.ru; тел.: 88634371632, 89515050232; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Fedosov Valentin Petrovich – South Federal University; e-mail: fed_val@tgn.sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632, +79525601246; the department of fundamentals of radio engineering; dr. of eng. sc.; professor.

Lomakina (Emelyanenko) Anna Vladimirovna – e-mail: avemelyanenko@sfedu.ru; phone: +78634371632, +79515050232; the department of fundamentals of radio engineering; postgraduate student.

УДК 621.396.96

Д.С. Дерачиц, Н.Н. Кисель, С.Г. Грищенко

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЧ-МОДУЛЯ ПРИ СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Рассмотрены вопросы стабильности характеристик фазовращателя на примере четырех опытных образцов микрополосковых фазовращателей, выполненных по схеме последовательного соединения T-модулей. В качестве управляющего элемента использован варикап ВВ-135. Проведены сравнения амплитудно- и фазочастотных характеристик S-параметров, коэффициента стоячей волны исследуемых образцов. Измерения проводились с использованием анализатора цепей PXIe-5632. Анализ характеристик для всех четырех опытных образцов фазовращателя показал высокую степень повторяемости результатов исследования для серии образцов макета. Обработка результатов экспериментальных исследований выполнена в программе FEKO. Разброс обратных потерь образцов при исследовании не превысил 0,4 дБ, фазовая характеристика обратных потерь с графической точностью совпала при всех вариациях управляющего напряжения на варикапе. Экспериментальные характеристики имеют некоторые осцилляции, связанные с паразитными связями, возникшими в процессе монтажа, а также из-за наличия собственных паразитных емкостей сосредоточенных элементов (варикапов), однако уровень осцилляций невелик и не ухудшает характеристики фазовращателя.

Фазовращатель; микрополосковое устройство; варактор; S-параметры; FEKO.

D.S. Derachits, N.N. Kisel, S.G. Grishchenko

INVESTIGATION OF STABILITY PERFORMANCE MICROWAVE MODULES IN SERIES PRODUCTION

Stability characteristics questions of the phase shifter in Four prototypes microstrip phase shifters performed on the serial communication circuit T-modules are discussed. Varactors BB-135 is used as the control. Comparison of the frequency characteristics of the S-parameters, VSRW for the test samples are made. The measurements were performed using a network analyzer

PXIe-5632. Analysis of characteristics for all four prototypes of the phase shifter shows a high degree of repeatability of the research results from the layout to the layout. Processing of the experimental studies results carried out in the program FEKO. Variation in the characteristics of return loss from sample to sample is less than 0.4 dB, return loss phase response with graphic precision is the same for all variations of the control voltage to the varactors. Experimental characteristics have some oscillations due to parasitic coupling arising in the process of installation, as well as due to the presence of parasitic capacitances own lumped elements (varactors), but the level of oscillation is not large and does not degrade the performance of the phase shifter.

Phase shifter; varactor; microstrip line; S-parameters; FEKO.

Важным преимуществом антенной решётки является возможность сканирования диаграммы направленности для быстрого обзора пространства электрическими методами. Одним из ключевых элементов фазированной антенной решетки является фазовращатель, обеспечивающий создание фазовых сдвигов на элементах антенной решетки при небольших потерях мощности.

В настоящее время к техническим параметрам фазовращателей предъявляются следующие требования: высокое быстродействие и малая энергия, затрачиваемая на управление фазовым сдвигом; малые вносимые потери на СВЧ; высокая точность и стабильность начального и управляемого фазового сдвига; широкополосность (5–15 % от рабочей частоты); высокий уровень импульсной и средней СВЧ-мощности для передающих ФАР (1–5 кВт в импульсе и 1–50 Вт в непрерывном режиме); улучшение качества согласования; увеличение динамического диапазона установки фазы; малые габариты и масса; устойчивость к механическим и климатическим воздействиям и долговечность; высокая воспроизводимость; низкая стоимость. Конструирование антенных решеток связано с использованием большого числа фазовращателей [1–6].

В статье приведены исследования характеристик четырех образцов плавных фазовращателей, реализованных на основе одинаковых последовательно соединенных каскадов по Т-схеме (рис. 1). Изменение фазы осуществляется за счет управления емкостью варактора [7–14]. Целью проведенных исследований был анализ степени повторяемости характеристики опытных образцов фазовращателя.

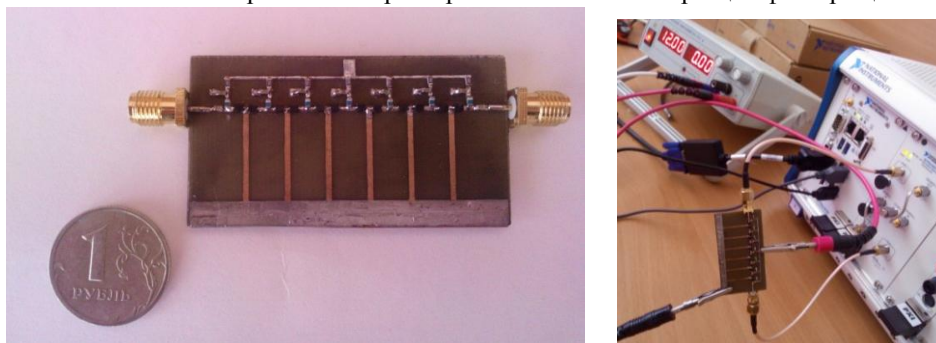


Рис. 1. Экспериментальный макет и измерение характеристик фазовращателя, работающего на частоте 1,5 ГГц

Структурная схема проведения эксперимента представлена на рис. 1. Для проведения эксперимента и исследования повторяемости характеристик были изготовлены четыре макета фазовращателей для четырехэлементной антенной линейки. На рис. 1 изображен экспериментальный образец фазовращателя, работающий на частоте 1,5 ГГц. Каждый из четырех образцов подключался к модулю VNA PXIe-5632 с помощью кабелей, стыковка производилась разъемами SMA. Управление фазой осуществлялось с помощью управляемого источника питания.

Изменение напряжения смещения, подаваемого на фазовращатель, выполнялось с шагом 0,2 В в диапазоне от 0 до 30 В. Для каждого фиксированного значения напряжения смещения (всего 151 значение) записывались параметры фазовращателя в отдельном файле в виде таблицы зависимостей от частоты реальной и мнимой частей элементов комплексной матрицы рассеяния в формате *.s2p.

Представленные в таком виде данные далее обрабатывались в специализированных программах для последующего анализа.

Благодаря калибровке при проведении эксперимента удается учесть и исключить из результатов нежелательные эффекты (потери в кабеле, некоторое рассогласование кабеля с портами).

Результаты экспериментальных исследований для одного из фазовращателей при различном управляющем напряжении представлены ниже на рис. 2–5.

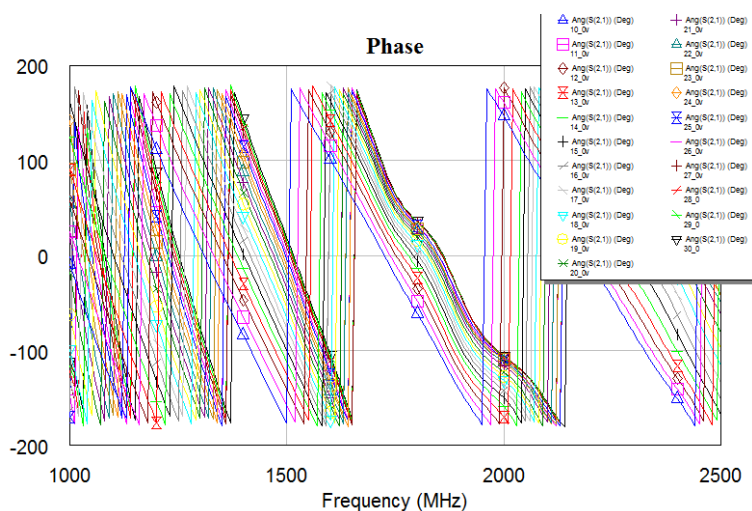


Рис. 2. Фазочастотная характеристика обратных потерь фазовращателя №1 при разном управляющем напряжении

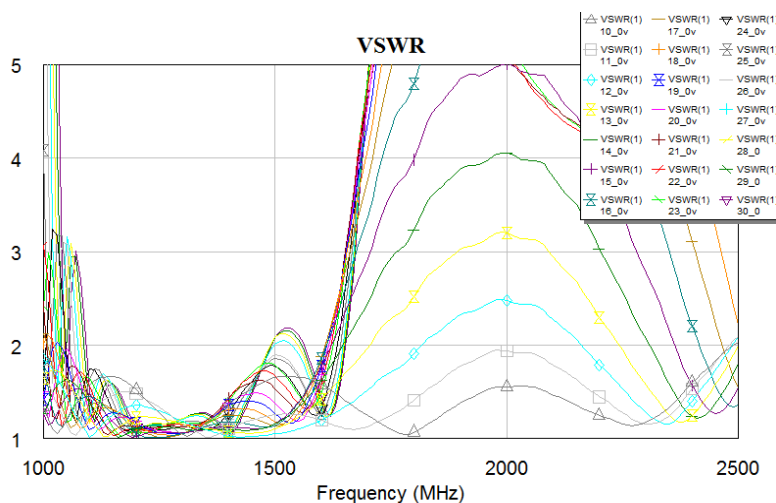


Рис. 3. Частотная зависимость КСВН фазовращателя №1 от управляющего напряжения

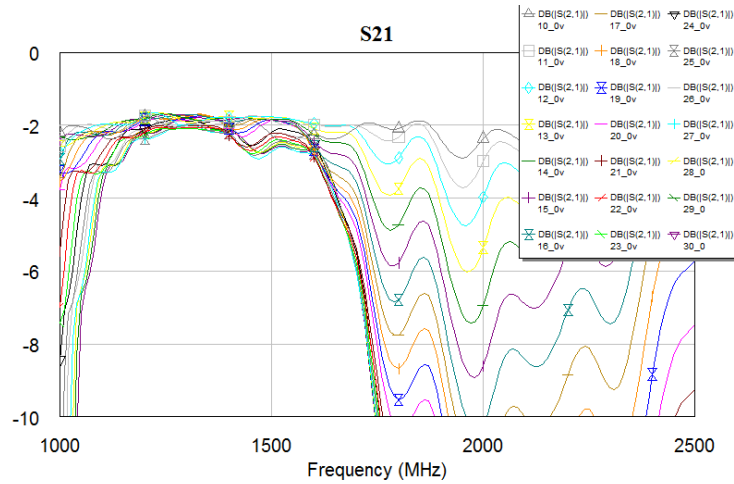


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика обратных потерь фазовращателя №1 при разных значениях управляющего напряжения

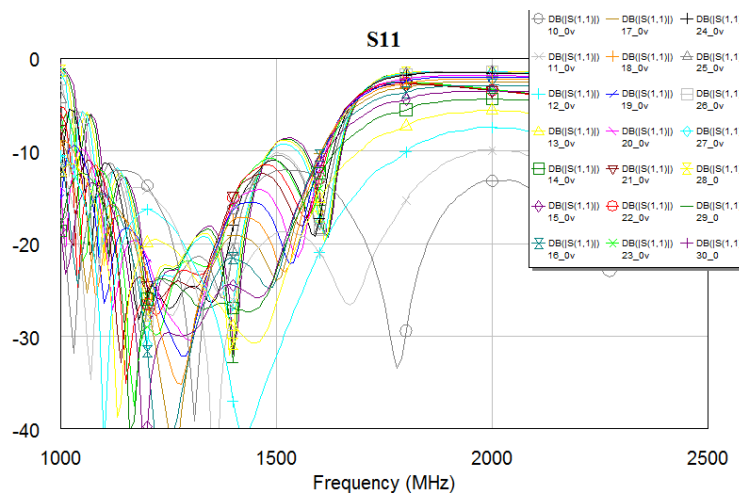


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента отражения фазовращателя №1 от управляющего напряжения

Из экспериментальных характеристик видно, что сдвиг фазы в диапазоне рабочих частот 1,2–1,5 ГГц составляет не менее 360 град, при этом коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) не превышает 2, обратные потери не превышают 3 дБ.

Анализ характеристик для всех четырех опытных образцов ФВ показывает высокую степень повторяемости результатов исследования от макета к макету. Обработка результатов экспериментальных исследований выполнена в программе FEKO [15].

Разброс прямых потерь от образца к образцу не превышает 0,4 дБ, фазовая характеристика прямых потерь с графической точностью совпадает при всех вариациях управляющего напряжения на варикапе.

Исследуется повторяемость характеристик образцов по амплитудно- и фазо-частотным характеристикам прямых потерь S_{21} при различном управляющем напряжении $U_{упр} = 27 В, 20 В, 15 В$.

Как видно из приведенных ниже характеристик, неравномерность S_{21} в диапазоне частот 1,45–1,6 ГГц составила от 0,1 до 0,4 дБ при управляющем напряжении $U_{упр} = 20 В$. Наличие отклонений в амплитудной характеристике эквивалентно изменению амплитудного распределения поля в раскрыве антенной решетки.

Следует также отметить хорошее согласование результатов численного моделирования [12–14] и экспериментальных характеристик образцов, что подтверждает эффективность использования современных САПР СВЧ (HFSS, FEKO, CST Studio).

Экспериментальные характеристики имеют некоторые осцилляции, связанные с паразитными связями, возникшими в процессе монтажа, а также из-за наличия собственных паразитных емкостей сосредоточенных элементов (варикапов), цепей управления емкостью варактора, однако уровень осцилляций невелик и не ухудшает характеристики фазовращателя.

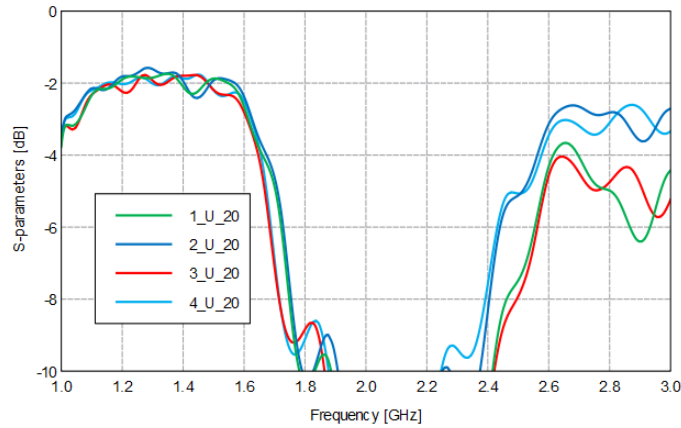


Рис. 6. Частотные характеристики прямых потерь при $U_{упр} = 20 В$

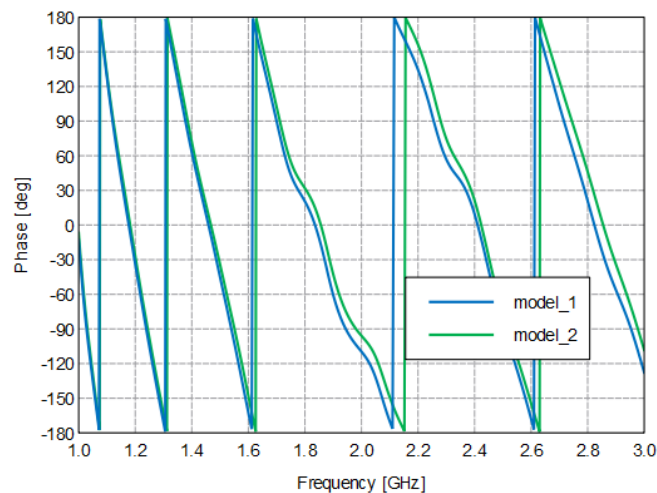


Рис. 7. Фазочастотные характеристики прямых потерь при $U_{упр} = 20 В$

Таким образом, основным источником неравномерности амплитудно- и фазочастотного распределения антенной решетки является наряду с излучателем стабильность воспроизводимости конструктивно-технологических характеристик фазовращателя при наличии дестабилизирующих факторов таких, как параметры сосредоточенных элементов, подложки, качества развязки цепей управления. Стабильность характеристик фазовращателя является главным условием серийного производства образцов. Полученные результаты подтверждают высокую степень повторяемости характеристик фазовращателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Хижга Г.С., Вендик И.Б., Серебрякова Е.А.* СВЧ-фазовращатели и переключатели. – М.: Радио и связь, 1984. – 184 с.
2. *Vendik L.B., Vendik O.G., Kollberg E.L.* Commutation.quality factor of two-state switching devices // IEEE Trans, on Microwave Theory and Tech. – 2000. – Vol. 48, No. 5.
3. *Гунта К., Гардж Р., Чадха Р.* Машинное проектирование СВЧ-устройств: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 432 с.
4. *Никольский В.В., Орлов В.П., Феоктистов В.Г. и др.* Автоматизированное проектирование устройств СВЧ. – М.: Радио и связь, 1982. – 272 с.
5. *Фуско В.* СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
6. *Kim H., Kozzyrev A.B., Karbassi A., D.W. van der Weide.* Linear tunable shifter using a left-handed transmission line // IEEE Microwave and Wireless components letters. – 2005. – Vol. 15, No. 5. – P. 366-369.
7. *Ellinger F., Jäckel H., and Bächtold W.* Varactor-loaded transmission line phase shifter at C-band using lumped elements // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – Apr. 2003. – Vol. 51, No. 4. – P. 1135-1140.
8. *Eleftheriades G.V., Iyer A.K. and Kremer P.C.* Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – Dec. 2002. – Vol. 50, no. 12. – P. 2702-2712.
9. *Antoniades M.A. and Eleftheriades G.V.* Compact linear lead/lag metamaterial phase shifters for broadband applications // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. – 2003. – Vol. 2. – P. 103-106.
10. *Caloz C., Sanada A. and Itoh T.* A novel composite right-/left-handed coupled-line directional coupler with arbitrary coupling level and broad bandwidth // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – Mar. 2004. – Vol. 52, No. 3. – P. 980-992.
11. *Kozzyrev B. and D.W. van der Weide.* Nonlinear wave propagation phenomena in left-handed transmission line media // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – Jan. 2005. – Vol. 53, no. 1. – P. 238-245.
12. *Кисель Н.Н., Грищенко С.Г., Дерачиц Д.С.* Имитационное трехмерное электромагнитное моделирование плавного фазовращателя // Компоненты и технологии. – 2014. – Т. 6, № 155. – С. 161-164.
13. *Кисель Н.Н., Грищенко С.Г., Дерачиц Д.С.* Визуальное проектирование СВЧ-устройств на примере фазовращателя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 4 (153). – С. 95-102.
14. *Кисель Н.Н., Грищенко С.Г., Богаченко Д.А.* Моделирование электрически управляемого фазовращателя со структурой микрополоскового полосно-заграждающего фильтра // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 105-111.
15. *Кисель Н.Н.* Моделирование прикладных задач электродинамики и антенн на супервычислительной системе в пакете FEKO: Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013.

REFERENCES

1. *Khizha G.S., Vendik I.B., Serebryakova E.A.* SVCh-fazovrashchateli i pereklyuchateli [Microwave phasers and switches]. Moscow: Radio i svyaz', 1984, 184 p.

2. Vendik L.B., Vendik O.G., Kollberg E.L. Commutation quality factor of two-state switching devices, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, 2000, Vol. 48, No. 5.
3. Gupta K., Gardzh R., Chadkha R. Mashinnoe proektirovanie SVCh-ustroystv [Machine design of microwave devices]. Moscow: Radio i svyaz', 1987, 432 p.
4. Nikol'skiy V.V., Orlov V.P., Feoktistov B.G. i dr. Avtomatizirovannoe proektirovanie ustroystv SVCh [Computer-aided design of microwave devices]. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 272 p.
5. Fusko V. SVCh-tsepi. Analiz i avtomatizirovannoe proektirovanie [Analysis and computer-aided design]. Moscow: Radio i svyaz', 1990, 288 p.
6. Kim H., Kozyrev A.B., Karbassi A., D.W. van der Weide. Linear tunable shifter using a left-handed transmission line, *IEEE Microwave and Wireless components letters*, 2005, Vol. 15, No. 5, pp. 366-369.
7. Ellinger F., Jäckel H., and Bächtold W. Varactor-loaded transmission line phase shifter at C-band using lumped elements, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Apr. 2003, Vol. 51, No. 4, pp. 1135-1140.
8. Eleftheriades G.V., Iyer A.K. and Kremer P.C. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Dec. 2002, Vol. 50, No. 12, pp. 2702-2712.
9. Antoniadis M.A. and Eleftheriades G.V. Compact linear lead/lag metamaterial phase shifters for broadband applications, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 2003, Vol. 2, pp. 103-106.
10. Caloz C., Sanada A. and Itoh T. A novel composite right-/left-handed coupled-line directional coupler with arbitrary coupling level and broad bandwidth, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Mar. 2004, Vol. 52, No. 3, pp. 980-992.
11. Kozyrev B. and D.W. van der Weide. Nonlinear wave propagation phenomena in left-handed transmission line media, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Jan. 2005, Vol. 53, No. 1, pp. 238-245.
12. Kisel' N.N., Grishchenko S.G., Derachits D.S. Imitatsionnoe trekhmernoe elektromagnitnoe modelirovanie plavnogo fazovrashchatelya [Simulation of three-dimensional electromagnetic modeling smooth Phaser], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2014, Vol. 6, No. 155, pp. 161-164.
13. Kisel' N.N., Grishchenko S.G., Derachits D.S. Vizual'noe proektirovanie SVCh-ustroystv na primere fazovrashchatelya [Visual design of an example of microwave phase shifters], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 4 (153), pp. 95-102.
14. Kisel' N.N., Grishchenko S.G., Bogachenko D.A. Modelirovanie elektricheskoi upravlyayemoi fazovrashchatelya so strukturoy mikropoloskovogo polosno-zagrazhdayushchego filtra [Modelling electrically operated phase shifter with structure of the microstrip band blocking filter], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 5 (142), pp. 105-111.
15. Kisel' N.N. Modelirovanie prikladnykh zadach elektrodinamiki i antenn na supervychislitel'noy sisteme v pakete FEKO [Modeling of applied problems of electromagnetics and antennas on supercomputing system in package FEKO]: *Uchebnoe posobie* [Textbook]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Макаров

Деращиц Дмитрий Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: dekanat-rtf@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371634; кафедра антенн и радиопередающих устройств; аспирант.

Кисель Наталья Николаевна – кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор; к.т.н.; доцент.

Грищенко Сергей Григорьевич – директор Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета; к.т.н.; доцент.

Derachits Dmitriy Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: dekanat-rtf@tti.sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371634; the department of antennas and radio transmitter; postgraduate student.

Kisel Natalia Nikolayevna – the department of antennas and radio transmitters; professor; cand. of eng. sc.; associate professor.

Grishchenko Sergey Grigorievich – the director of Institute radio engineering system and control Southern Federal University; cand. of eng. sc.; associate professor.