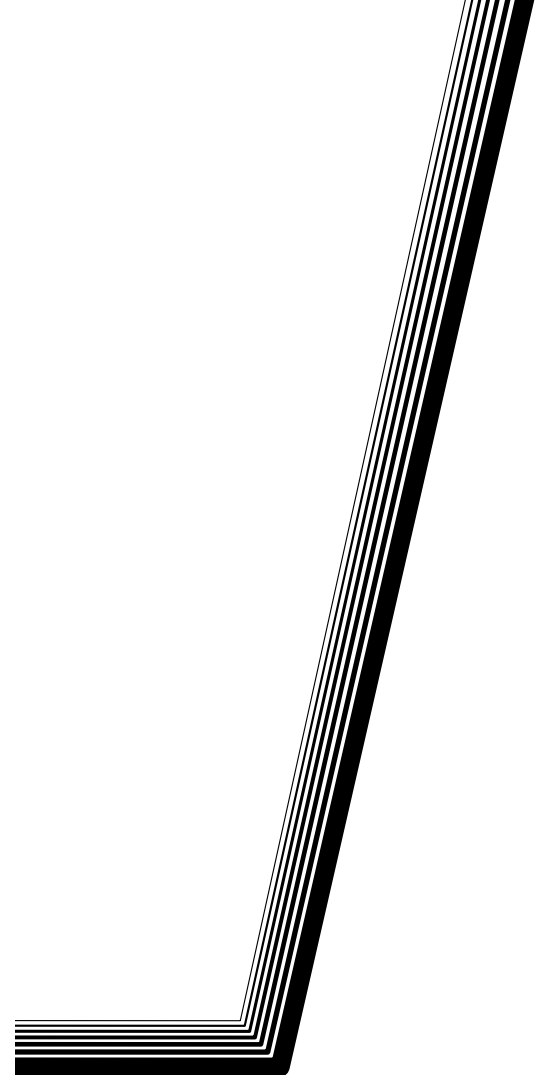


**СИБИРСКИЙ  
ЖУРНАЛ  
НАУКИ  
И ТЕХНОЛОГИЙ**



Том 19, № 2

Красноярск 2018

# СИБИРСКИЙ ЖУРНАЛ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Том 19, № 2

*Главный редактор*

**Ковалев Игорь Владимирович**, доктор технических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

*Заместители главного редактора*

**Логинов Юрий Юрьевич**, доктор физико-математических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Сенашов Сергей Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Мурыгин Александр Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ответственный за подготовку выпусков журнала, содержащих секретные сведения (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Аплеснин С. С.**, доктор физико-математических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Галеев Р. Г.**, доктор технических наук (АО «НПП «Радиосвязь»)

**Головенкин Е. Н.**, доктор технических наук, профессор (АО «ИСС»)

**Лаптенко В. Д.**, доктор технических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Лившиц А. В.**, доктор технических наук, доцент (ИрГУПС)

**Максимов И. А.**, доктор технических наук (АО «ИСС»)

**Медведев А. В.**, доктор технических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Михеев А. Е.**, доктор технических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Москвичев В. В.**, доктор технических наук, профессор (СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН)

**Садовский В. М.**, доктор физико-математических наук, профессор (ИВМ СО РАН)

**Сафонов К. В.**, доктор физико-математических наук, доцент (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Сильченко П. Н.**, доктор технических наук, профессор (СФУ)

**Смирнов Н. А.**, доктор технических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Терсков В. А.**, доктор технических наук, профессор (КрИЖТ ИрГУПС)

**Чеботарев В. Е.**, доктор технических наук, доцент (АО «ИСС»)

**Шайдуров В. В.**, доктор физико-математических наук, профессор (ИВМ СО РАН)

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**Васильев С. Н.**, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Москва)

**Дегерменджи А. Г.**, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Красноярск)

**Дегтерев А. С.**, доктор технических наук, профессор (Красноярск)

**Калвода Л.**, кандидат наук, доцент (Прага, Чехия)

**Колмыков В. А.**, кандидат технических наук, профессор (Красноярск)

**Краточвилова И.**, доктор, доцент (Прага, Чехия)

**Краус И.**, профессор (Прага, Чехия)

**Лопатин А. В.**, доктор технических наук, профессор (Красноярск)

**Лю Т.**, профессор (Пекин, Китай)

**Минкер В.**, доктор, профессор (Ульм, Германия)

**Мионов В. Л.**, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Красноярск)

**Павера Р.**, доцент (Братислава, Словакия)

**Семенкин Е. С.**, доктор технических наук, профессор (Красноярск)

**Тестоедов Н. А.**, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор (Железногорск)

**Фошнер М.**, доктор, доцент (Марибор, Словения)

**Чжанг Ш.**, доктор (Тяньцзинь, Китай)

**Шабанов В. Ф.**, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Красноярск)

**Швиденко А.**, доктор инженерных наук, профессор (Лаксембург, Австрия)

**Эйя Х.**, доктор инженерных наук, профессор (Тронхейм, Норвегия)

# SIBERIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Vol. 19, No 2

---

*Chief Editor:*

**Kovalev I. V.**, Dr.Sc., Professor (Reshetnev University)

*Deputy Chief Editors*

**Loginov Y. Y.**, Dr.Sc., Professor (Reshetnev University)

**Senashov S. I.**, Dr.Sc., Professor (Reshetnev University)

**Murygin A. V.**, Dr.Sc., Professor (Reshetnev University)

---

## EDITORIAL BOARD

**Aplesnin S. S.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Galeev R. G.**, Dr.Sc.  
(JSC "NPP "Radiosvyaz")

**Golovenkin E. N.**, Dr.Sc., Professor  
(ISS-Reshetnev Company)

**Laptenok V. D.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Livshits A. V.**, Dr.Sc., Professor  
(Irkutsk State Transport University)

**Maksimov I. A.**, Dr.Sc.  
(ISS-Reshetnev Company)

**Medvedev A. V.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Mikheev A. E.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Moskvichev V. V.**, Dr.Sc., Professor  
(SDTB Nauka KSC SB RAS)

**Sadovsky V. M.**, Dr.Sc., Professor  
(ICM SB RAS)

**Safonov K. V.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Silchenko P. N.**, Doctor of Technical  
Sciences, Professor (SibFU)

**Smirnov N. A.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Terskov V. A.**, Dr.Sc., Professor  
(Irkutsk State Transport University)

**Chebotaev V. Y.**, Dr.Sc., Professor  
(ISS-Reshetnev Company)

**Shaidurov V. V.**, Dr.Sc., Professor  
(ICM SB RAS)

## EDITORIAL COUNCIL

**Vasiliev S. N.**, Academician of the Russian Academy  
of Sciences, Dr.Sc., Professor (Moscow)

**Degermendzhi A. G.**, Academician of the Russian  
Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

**Degterev A. S.**, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

**Kalvoda L.**, Cand.Sc.-Ing., Associate Professor  
(Prague, Czech Republic)

**Kolmykov V. A.**, Cand.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

**Kratochvilova I.**, Dr.-Ing., Associate Professor  
(Prague, Czech Republic)

**Kraus I.**, Sc.D., Professor (Prague, Czech Republic)

**Lopatin A. V.**, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

**Liu T.**, Ph.D., Professor (Beijing, China)

**Minker W.**, Dr.-Ing., Professor (Ulm, Germany)

**Mironov V. L.**, Corresponding Member  
of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc.,  
Professor (Krasnoyarsk)

**Pawera R.**, Associate Professor (Bratislava, Slovakia)

**Semenkin E. S.**, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

**Testoedov N. A.**, Corresponding Member  
of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc.,  
Professor (Zheleznogorsk)

**Fošner M.**, Ph.D. Associate Professor (Maribor, Slovenia)

**Zhang S.**, Ph.D. (Tianjin, China)

**Shabanov V. F.**, Academician of the Russian Academy  
of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

**Shvidenko A.**, Dr.-Ing., Professor (Laxenburg, Austria)

**Oye H.**, Dr.-Ing., Professor (Trondheim, Norway)

## К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

«Сибирский журнал науки и технологий» является научным, производственно-практическим рецензируемым изданием. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-70577 от 03.08.2017 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

ISSN 2587-6066.

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» – 39263.

Зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Включен в базу данных Ulrich's Periodicals Directory американского издательства Bowker.

Входит в перечень журналов ВАК по следующим группам научных специальностей:

- 05.02.00 – машиностроение и машиноведение;
- 05.07.00 – авиационная и ракетно-космическая техника;
- 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление.

Выпускается с 2000 года. До 2002 года журнал носил название «Вестник Сибирской аэрокосмической академии имени академика М. Ф. Решетнева» («Вестник САА»), до мая 2017 года – «Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева».

Каждый выпуск журнала включает три раздела:

1 раздел. Информатика, вычислительная техника и управление.

2 раздел. Авиационная и ракетно-космическая техника.

3 раздел. Технологические процессы и материалы.

Статьи публикуются бесплатно после обязательного рецензирования и при оформлении их в соответствии с требованиями редакции ([www.vestnik.sibsau.ru](http://www.vestnik.sibsau.ru)). Журнал выходит 4 раза в год.

Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки (<http://www.elibrary.ru>) и сайте журнала ([www.vestnik.sibsau.ru](http://www.vestnik.sibsau.ru))

При перепечатке или цитировании материалов из журнала «Сибирский журнал науки и технологий» ссылка обязательна.

### Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

АДРЕС РЕДАКЦИИ, УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ:

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Российская Федерация, 660037, Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31, П-416. Тел./ факс (391)291-90-19

E-mail: [vestnik@sibsau.ru](mailto:vestnik@sibsau.ru)

Отпечатано в редакционно-издательском центре СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.

Дата выхода в свет: 20.07.2018. Свободная цена

## INFORMATION FOR AUTHORS AND SUBSCRIBERS

*Siberian Journal of Science and Technology* is a research, production and practical peer-reviewed journal. Included by the Higher Attestation Commission of the Russian Federation in the Index of Leading Russian Peer-Reviewed Journals and Periodicals, in which significant scientific dissertation results should be published when applying for a Dr.Sc. degree.

The journal is the official periodical of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

Certificate of Registration as a Mass Media Resource. Certificate: PI No. FC 77-50577, dated 03 August 2017, given by Federal Supervision Agency for Information Technology, Communications and Mass Media.

The Journal is included in the following subscription catalogue 39263 – Pressa Rossii.

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI). The journal is indexed in the database of Ulrich's Periodicals Directory.

The journal was first published in 2000. Prior to 2002 it had the title *Vestnik Sibirskoi aerokosmicheskoi akademii imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SAA)*, prior to may 2017 it had the title *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SibGAU)*.

The Journal is recommended for publishing the main results of research when applying for Cand. Sc. degree and Dr. Sc. degree upon the following specialties:

- 05.02.00 – machine engineering and science of mechanics;
- 05.07.00 – aviation and spacecraft engineering;
- 05.13.00 – informatics, computer technology and management.

Each issue consists of three parts:

- Part 1. Informatics, computer technology and management.
- Part 2. Aviation and Spacecraft Engineering.
- Part 3. Technological Processes and Material Science.

Papers prepared in accordance with the editorial guidelines ([www.vestnik.sibsau.ru](http://www.vestnik.sibsau.ru)) are published free of charge after being peer reviewed.

The journal is published four times a year.

An online version can be viewed at <http://www.elibrary.ru>

*Siberian Journal of Science and Technology* should be cited when reprinting or citing materials from the journal.

CONTACTS. Website: [www.vestnik.sibsau.ru](http://www.vestnik.sibsau.ru)

Address: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation.

Tel./fax (391)291-90-19; e-mail: [vestnik@sibsau.ru](mailto:vestnik@sibsau.ru)

Editor O. A. PLEKHOVA, Editor (English Language) S. G. EFA

Layout original M. A. SVETLAKOVA

Signed (for printing): 25.06.2018. Format 70×108/16.

Offset Paper. Print flat. 21,6. Published sheets 28,4.

1000 copies. Order 37 . С 205/18.

Printing and Publication Department

Reshetnev University.

Printed in the Department of copying and duplicating equipment Reshetnev University.

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation.

Date of publication: 20.07.2018. Free price

## СОДЕРЖАНИЕ

### РАЗДЕЛ 1. ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<b>Богоявленский А. И., Каменев А. А., Полуян М. М., Солуянов А. А.</b> Моделирование спектроэнергетических характеристик космических объектов в оптическом диапазоне .....	200
<b>Колесников С. Г.</b> О необходимых и достаточных условиях просто приводимости сплетения конечных групп .....	212
<b>Кузнецов А. А., Кишкан В. В.</b> Исследование графов Кэли конечных двупорожденных бернсайдовых групп периода семь .....	217
<b>Паращук И. А., Сенашов В. И.</b> Восстановление информации о группе по нижнему слою .....	223
<b>Сенашов С. И., Савостьянова И. Л., Филюшина Е. В.</b> Использование законов сохранения для решения задачи о волне нагрузки в упруго-пластическом стержне .....	227
<b>Танасиенко Ф. В., Шевченко Ю. Н., Делков А. В., Кишкин А. А., Мелкозеров М. Г.</b> Вычислительный эксперимент по получению характеристик моделируемой системы терморегулирования космического аппарата .....	233

### РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

<b>Акзигитов А. Р., Андронов А. С., Акзигитов Р. А., Перемышленников В. В., Дмитриев Д. В.</b> Повышение эффективности передачи данных при спутниковом мониторинге воздушных судов .....	242
<b>Акзигитов А. Р., Стаценко Н. И., Писарев Н. С., Ефимова А. Н.</b> Разработка трёхточечного авиационного топливомера .....	246
<b>Бутин А. М., Дубровский Е. Ю., Добышев Е. В., Ефремов С. В., Сунцов С. Б.</b> Методика автоматизированного формирования сборочного чертежа кабельной сети .....	251
<b>Генералов А. Г., Гаджиев Э. В.</b> Миниатюрные антенны для малых космических аппаратов CubeSat .....	259
<b>Двирный Г. В., Шевчук А. А., Двирный В. В., Елфимова М. В., Крушенко Г. Г.</b> Анализ возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной отработки космических аппаратов .....	271
<b>Копылов Е. А., Лобанов Д. К., Мизрах Е. А.</b> Анализ абсолютной устойчивости процессов управления зарядно-разрядным устройством с нагрузочным преобразователем в режиме стабилизации мощности .....	281
<b>Латынцев С. В., Мурыгин А. В.</b> Математическая модель определения возмущающих моментов геостационарного космического аппарата .....	293
<b>Сагиева И. Е., Газизов Т. Р.</b> Боковые заземленные проводники, углубленные в подложку микрополосковой линии, как средство контроля её характеристик .....	303
<b>Слыщенко Е. В., Наумова А. А., Лебедев А. А., Генали М. А., Вагапова Н. Т., Жалнин Б. В.</b> Обзор современных фотоэлектрических преобразователей космического назначения на основе соединений АПВВ .....	308
<b>Тихомиров Р. Е., Максимов И. А., Трофимчук Д. А., Иванов В. В., Балашов С. В.</b> Исследование зарядно-разрядных процессов на отрывном разъеме космического аппарата .....	325
<b>Топильская С. В., Бородулин Д. С., Корнюхин А. В.</b> Повышение стойкости к механическим воздействиям модернизированного малогабаритного гироскопического измерителя угловых скоростей .....	332

### РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

<b>Еремин Н. В.</b> Анализ микроструктуры слоистого полимерного композиционного материала металлокомпозитного бака высокого давления .....	346
<b>Козлова Н. И., Гордеев Ю. И., Анистратенко Н. Е.</b> Возможности использования групповых технологий для изготовления деталей универсально-сборных приспособлений .....	355
<b>Михеев А. Е., Гирн А. В., Раводина Д. В., Якубович И. О.</b> Плазмотрон для нанесения покрытий из тугоплавких дисперсных материалов .....	365
<b>Сведения об авторах</b> .....	373

## CONTENTS

### PART 1. INFORMATICS, COMPUTER TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

<b>Bogoyavlenskiy A. I., Kamenev A. A., Poluyan M. M., Soluyanov A. A.</b> Modeling of spectroenergetic characteristics of space objects in the optical range .....	200
<b>Kolesnikov S. G.</b> On necessary and sufficient conditions of simply reducibility of wreath product of finite groups .....	212
<b>Kuznetsov A. A., Kishkan V. V.</b> The Cayley graphs of finite two-generator Burnside groups of exponent 7 .....	217
<b>Parashchuk I. A., Senashov V. I.</b> Restoration of information on the group by the bottom layer .....	223
<b>Senashov S. I., Savostyanova I. L., Filyushina E. V.</b> Use of conservation laws to solve the problem of load wave in an elastoplastic rod .....	227
<b>Tanasienko F. V., Shevchenko Y. N., Delkov A. V., Kishkin A. A., Melkozerov M. G.</b> Computational experiment on obtaining the characteristics of a thermal control system of spacecraft .....	233

### PART 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

<b>Akzigitov A. R., Andronov A. S., Akzigitov R. A., Peremishlennikov V. V., Dmitriev D. V.</b> Increase of data transmission efficiency in aircraft satellite monitoring .....	242
<b>Akzigitov R. A., Statsenko N. I., Pisarev N. S., Efimova A. N.</b> Development of three-point aviation fuel quantity gauge .....	246
<b>Butin A. M., Dubrovskiy E. U., Dobyshev E. V., Efremov S. V., Suntsov S. B.</b> The method of automated development of an assembly drawing of a cable network .....	251
<b>Generalov A. G., Gadzhiev E. V.</b> Miniature antennas for CuberSat .....	259
<b>Dvirniy G. V., Shevchuk A. A., Dvirniy V. V., Elfimova M. V., Krushenko G. G.</b> Analysis of led-based solar simulator development capability for spacecraft ground testing applications .....	271
<b>Kopylov E. A., Lobanov D. K., Mizrakh E. A.</b> Control process absolute stability analysis of charge-discharge device with load converter in constant power mode .....	281
<b>Latyntsev S. V., Murygin A. V.</b> Mathematical model for geostationary spacecraft disturbing torques determination .....	293
<b>Sagiyeva I. Ye., Gazizov T. R.</b> Side grounded conductors dipped in a substrate of a microstrip line, as a tool of line characteristics control .....	303
<b>Slyshchenko E. V., Naumova A. A., Lebedev A. A., Genali M. A., Vagapova N. T., Zhalnin B. V.</b> The review of modern solar cells for space application based on AIIIbV materials .....	308
<b>Tikhomirov R. E., Maximov I. A., Trofimchuk D. A., Ivanov V. V., Balashov S. V.</b> Investigation of charge-discharge processes in the spacecraft detachable connector .....	325
<b>Topilskaya S. V., Borodulin D. S., Kornuhin A. V.</b> Protecting modern compact gyroscopic angular rate measurement from mechanical influence .....	332

### PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIAL SCIENCE

<b>Eremin N. V.</b> Analysis of microstructure of laminated polymer composite material of metal composite overwrapped pressure vessel .....	346
<b>Kozlova N. I., Gordeev Y. I., Anistratenko N. E.</b> The possibilities of using of group technologies for manufacturing the parts of universal-assembled devices .....	355
<b>Mikheev A. E., Girn A. V., Ravodina D. V., Yakubovich I. O.</b> Plasmotron for coatings application from fuel-dispersed materials .....	365
<b>Information about the authors</b> .....	376

### SIDE GROUNDED CONDUCTORS DIPPED IN A SUBSTRATE OF A MICROSTRIP LINE, AS A TOOL OF LINE CHARACTERISTICS CONTROL

I. Ye. Sagiyeva\*, T. R. Gazizov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation  
\*E-mail: indira\_sagieva@mail.ru

*Electrical design of on-board radio-electronic equipment is an important stage in spacecraft design. High characteristics of printed circuit boards (PCBs) are essential for miniature units that have reliability, speed, stability of electrophysical parameters, electromagnetic compatibility. In order to do that, new design and technological solutions are necessary, in particular transmission lines with stable characteristics of per-unit-length delay ( $\tau$ ) and wave impedance ( $Z$ ). One of the main lines, realized on a PCB is a microstrip line (MSL). In multi-layer PCBs it is often used with polygons. However, their influence on the stability of characteristics is investigated insufficiently.*

*The purpose of the work is to investigate the dependence of  $\tau$  and  $Z$  of MSL on the distance between the side grounded conductors as they are dipped in a substrate.*

*In the TALGAT software we built a geometric model of the line cross-section and calculated (using the method of moments) the matrices ( $3 \times 3$ ) of per-unit-length coefficients of electrostatic induction taking into account the dielectric as well as ignoring it. We calculated the values for the change of distance between side conductors ( $s$ ), dipped in a substrate, for different values of the height of the side conductors ( $h1$ ). We revealed that for large values of  $s$  (unlike small ones), approaching of the side conductors to the air-substrate boundary does not increase but it decreases the value of  $\tau$ . When  $s = 0.38$  mm, the change of the value of  $h1$  in the whole range almost doesn't change the values of  $\tau$  and, therefore zero sensitivity of  $\tau$  to changes of  $h1$  is possible. Thus we can obtain the required  $Z$  value in the range from 48 to 59 Ohms by changing the value of  $h1$ .*

*These results are obtained for particular values of the parameters of the line. However it is easy to obtain similar dependencies for other values of parameters. The results can be used to design transmission lines with stable delay under control of the impedance value.*

*Keywords: printed circuit board, microstrip line, per-unit-length delay, impedance, polygons, zero sensitivity.*

Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 2. С. 303–307

### БОКОВЫЕ ЗАЗЕМЛЕННЫЕ ПРОВОДНИКИ, УГЛУБЛЕННЫЕ В ПОДЛОЖКУ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ, КАК СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ ЕЁ ХАРАКТЕРИСТИК

И. Е. Сагиева\*, Т. Р. Газизов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40  
\*E-mail: indira\_sagieva@mail.ru

*Электрическое проектирование бортовой радиоэлектронной аппаратуры является важным этапом создания космических аппаратов. Высокие характеристики печатных плат (ПП) важны для миниатюрных узлов, обладающих надежностью, быстродействием, стабильностью электрофизических параметров, электромагнитной совместимостью. Для этого необходимы новые конструкторско-технологические решения, в частности, линии передачи со стабильными характеристиками погонной задержки ( $\tau$ ) и волнового сопротивления ( $Z$ ). Одной из основных линий, реализуемых на ПП, является микрополосковая линия (МПЛ). В многослойных ПП она часто используется с полигонами. Однако их влияние на стабильность характеристик мало исследовано.*

*Цель статьи – исследовать зависимости  $\tau$  и  $Z$  МПЛ от расстояния между боковыми заземленными проводниками при их углублении в подложку.*

*В системе TALGAT построена геометрическая модель поперечного сечения линии и методом моментов вычислены матрицы (порядка  $3 \times 3$ ) погонных коэффициентов электростатической индукции с учетом диэлектрика и без него. Выполнены вычисления при изменении расстояния между боковыми проводниками ( $s$ ), углубленными в подложку, для разных значений высоты боковых проводников ( $h1$ ). Выявлено, что при больших значениях  $s$ , в отличие от малых, приближение боковых проводников к границе «воздух–подложка» не увеличивает, а уменьшает значения  $\tau$ . При  $s = 0,38$  мм изменение значения  $h1$  во всем диапазоне почти не меняет значения  $\tau$ , а значит, возможна нулевая чувствительность  $\tau$  к изменению  $h1$ . При этом изменением значения  $h1$  можно получить требуемое значение  $Z$  в диапазоне от 48 до 59 Ом.*

Данные результаты получены для конкретных значений параметров линии. Однако легко получить аналогичные зависимости при других значениях параметров. Результаты работы могут быть использованы для проектирования линий передачи со стабильным значением задержки при контроле волнового сопротивления.

Ключевые слова: печатная плата, микрополосковая линия, погонная задержка, волновое сопротивление, полигоны, нулевая чувствительность.

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-2-303–307

**Introduction.** Electrical design of on-board radio-electronic equipment is an important stage in the spacecraft design [1]. High characteristics of printed circuit boards (PCBs) are important for miniature units [2; 3] that have reliability [4], speed, stability of electrophysical parameters [5], electromagnetic compatibility [6]. In order to do that, new design and technological solutions are necessary, in particular transmission lines with stable characteristics of per-unit-length delay ( $\tau$ ) and wave impedance ( $Z$ ). Thus the research of these characteristics is relevant [7–10].

One of the main lines, realized on PCB is MSL. Various modifications of MSL are the most interesting, for example, suspended and inverted strip lines which make it possible to obtain zero sensitivity of the per-unit-length delay and wave impedance to the change in the thickness of dielectric layers [11]. A similar pattern was found in MSL coated with a grounded conductor, shielded MSL [12] and MSL with side grounded conductors placed above [13]. There is a detailed analysis of modifications and variances in such a line and its varieties. Multilayer PCBs use a variety of MSL, for example, MSL with polygons on different layers that allows to obtain a stable value of the per-unit-length delay [14]. Meanwhile, it is useful to study the characteristics of MSL with side conductors grounded only on one layer located near the boundary of two environments.

The purpose of the work is to investigate the dependence of  $\tau$  and  $Z$  of MSL on the distance between the side grounded conductors as they are dipped in a substrate.

To achieve the objective, we investigated the structure of MSL with side conductors dipped in the substrate (fig. 1). We chose the following cross-sectional parameters (they are close to typical): the width of the signal conductor is  $w = 0.3$  mm, the thickness of the signal and side grounded conductors is  $t = 18$   $\mu\text{m}$ , the width of the side conductors is  $w_1 = 1$  mm, the thickness of the dielectric substrate is  $h = 1$  mm, the relative permittivity of the substrate is  $\epsilon_r = 4.5$ .

**Line modeling.** In the TALGAT [15] software we built the geometric model of the line cross-section and calculated (using the method of moments) the matrices (3\*3) of per-unit-length coefficients of electrostatic induction taking into account the dielectric as well as ignoring it.

From the matrices we took the values (hereinafter  $C$  and  $C_0$ ) of the diagonal element corresponding to the signal conductor and calculated the values of  $\tau$  and  $Z$  ( $v_0$  is the speed of light in vacuum):

$$\tau = (C/C_0)^{0.5}/v_0, \quad Z = 1/(v_0(CC_0)^{0.5}).$$

We calculated the values for change of distance between the side conductors  $s$ , dipped in a substrate, for the height of the side conductors  $h_1 = 0.1$ – $0.9$  mm (fig. 2). Fig. 2 shows that when  $s$  increases, the value of  $\tau$  decreases smoothly, and  $Z$  increases. At small values of  $h_1$ , the changes of  $\tau$  and  $Z$  are small, but the growth of  $h_1$  leads to an increase in the value of  $\tau$  and a decrease in the value of  $Z$ , and at small values of  $s$  the changes of  $\tau$  and  $Z$  are more significant.

Approaching of the side conductors to the air-substrate boundary has a special effect on the characteristics being studied. Therefore, we performed simulation with a smaller step at the air-substrate boundary: at  $h_1 = 0.8; 0.82; 0.84; 0.86; 0.88; 0.9$  mm (fig. 3). The analysis of fig. 3 shows a similar behavior of dependencies, but it reveals its specificity as well. It is expressed in the amplification of the influence of the side conductors when they approach the air-substrate boundary for small values of  $s$ . When  $s = 0.1$  mm, the value of  $\tau$  increases from 5.56 to 5.82 ns/m. We noticed that for large values of  $s$ , approaching of the side conductors to the air-substrate boundary does not increase but it decreases the values of  $\tau$ . When  $s = 0.6$  mm this decrease is maximal and is from 5.33 ns/m to 5.29 ns/m. When  $s = 0.38$  mm, the change of the value of  $h_1$  in the whole range almost doesn't change the values of  $\tau$  and, therefore zero sensitivity of  $\tau$  to changes of  $h_1$  is possible. Thus we can obtain the required  $Z$  value in the range from 48 to 59 Ohms by changing the value of  $h_1$ .

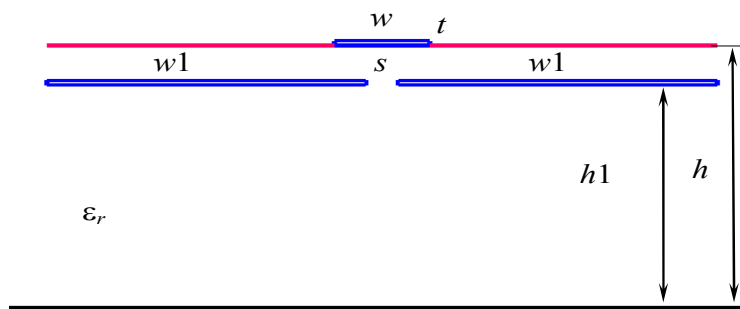


Fig. 1. Cross-section of MSL with side grounded conductors, dipped in a substrate

Рис. 1. Поперечное сечение МПЛ с боковыми заземленными проводниками, углубленными в подложку



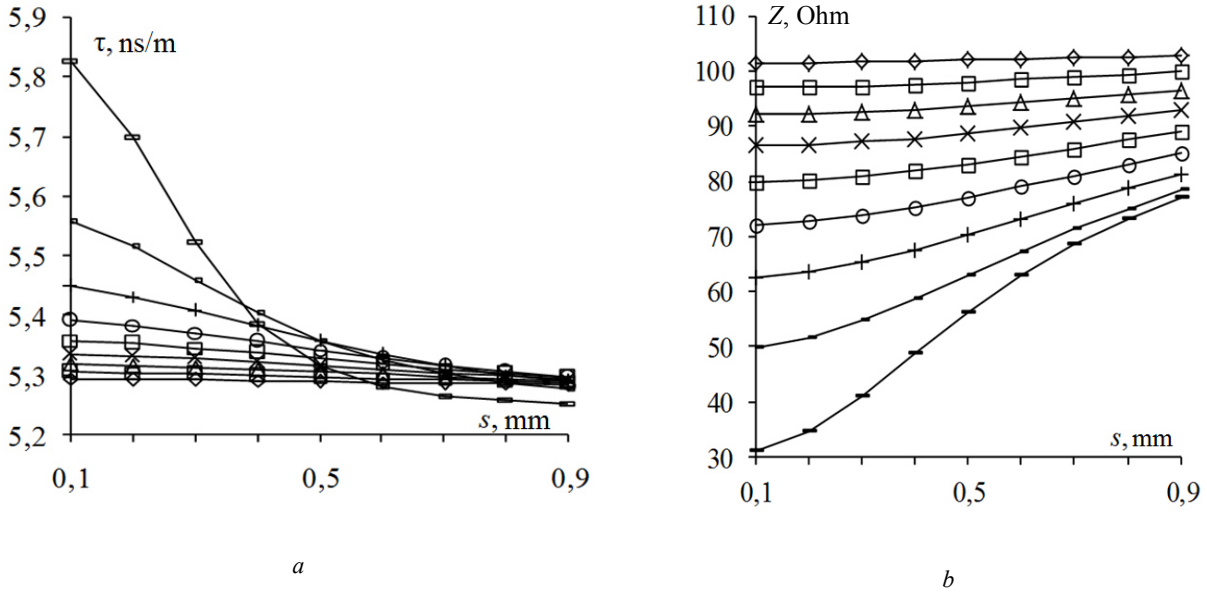


Fig. 2. Dependences of  $\tau$  (a) and  $Z$  (b) on  $s$  at  $h1 = 0.1$  ( $\diamond$ );  $0.2$  ( $\square$ );  $0.3$  ( $\Delta$ );  $0.4$  ( $\times$ );  $0.5$  ( $\square$ );  $0.6$  ( $\circ$ );  $0.7$  ( $+$ );  $0.8$  ( $-$ );  $0.9$  ( $-$ ) mm

Рис. 2. Зависимости  $\tau$  (a) и  $Z$  (б) от  $s$  при  $h1 = 0.1$  ( $\diamond$ );  $0.2$  ( $\square$ );  $0.3$  ( $\Delta$ );  $0.4$  ( $\times$ );  $0.5$  ( $\square$ );  $0.6$  ( $\circ$ );  $0.7$  ( $+$ );  $0.8$  ( $-$ );  $0.9$  ( $-$ ) мм

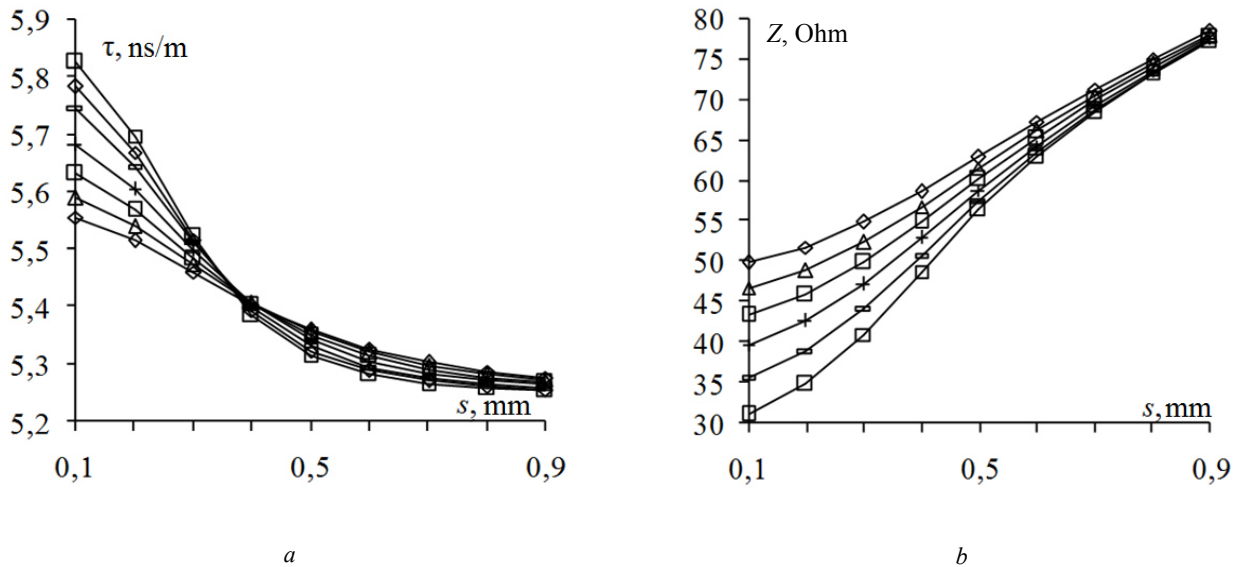


Fig. 3. Dependences of (a) and  $Z$  (b) on  $s$  at  $h1 = 0.8$  ( $\diamond$ );  $0.82$  ( $\Delta$ );  $0.84$  ( $\square$ );  $0.86$  ( $+$ );  $0.88$  ( $-$ );  $0.9$  ( $\square$ ) mm

Рис. 3. Зависимости  $\tau$  (a) и  $Z$  (б) от  $s$  при  $h1 = 0.8$  ( $\diamond$ );  $0.82$  ( $\Delta$ );  $0.84$  ( $\square$ );  $0.86$  ( $+$ );  $0.88$  ( $-$ );  $0.9$  ( $\square$ ) мм

**Conclusion.** We modeled MSL with side grounded conductors dipped in a substrate. We calculated the dependence of the per-unit-length delay and the wave impedance on the distance between the grounded conductors when the depth changes. We found out that zero sensitivity of per-unit-length delay to depth changes is possible

while obtaining the required wave impedance. These results are obtained for the particular values of line parameters.

However it is easy to obtain similar dependencies for other values of parameters. The results can be used to design transmission lines with stable characteristics.

**Acknowledgments.** This research was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation RFMEFI57417X0172.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

### References

1. Kochura S. G., Maksimov I. A., Maslov E. P., Pervuhin A. V. [Studying the impact of electromagnetic radiation on spacecraft with permeable instrument unit]. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovместимости*. 2017, No. 3(62), P. 3–10 (In Russ.).
2. Gazizov T. R., Zabolockij A. M., Orlov P. E. [The influence of the length and the number of coils on the delay of a microstrip line]. *Infokommunikacionnye tehnologii*. 2014, Vol. 13, No. 4, P. 93–96 (In Russ.).
3. Surovcev R. S. [Impulse signal propagation in a meander line with heterogeneous dielectric filling without deformation by cross coupling]. *Doklady TUSURa*. 2014, No. 4(34), P. 34–38 (In Russ.).
4. Orlov P., Gazizov T., Zabolotsky A. Comparative electromagnetic and quasi-static simulations of a short-pulse propagation along microstrip meander delay lines with design constraints. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*. 2016, Vol. 67, No. 5, P. 387–389. DOI: 10.1515/jee-2016-0056.
5. Gazizov R. R., Zabolockij A. M., Gazizov T. T. [Studying volts peak of ultra short signal impulse in a meander line in the case of the change of its geometric parametres]. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovместимости*. 2016, No. 3(58), P. 11–17 (In Russ.).
6. Surovcev R. S., Gazizov T. R. [Evaluating signal integrity in printed circuit boards of autonomous navigation systems of spacecraft]. *Trudy MAI*. 2015, No. 83 (In Russ.). Available at: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62204>.
7. Hamood M. K. Line thickness for various characteristic impedance of microstrip line. *Tikrit Journal of Pure Science*. 2013, Vol. 18, No. 3, P. 140–144.
8. Akhunov R. R., Kuksenko S. P., Gazizov T. R. Acceleration of Multiple Iterative Solution of Linear Algebraic Systems in Computing the Capacitance of a Microstrip Line in Wide Ranges of Its Sizes. *Journal of mathematical sciences*. 2015, Vol. 207, No. 5, P. 686–692.
9. Surovtsev R. S., Kuksenko S. P., Gazizov T. R. Analytic Evaluation of the Computational Costs for Solving Systems of Linear Algebraic Equations in Multiple Computing of the Capacitance Matrix in a Range of the Dielectric Permittivity of Dielectrics. *Journal of mathematical sciences*. 2015, Vol. 207, No. 5, P. 795–802.
10. Gazizov T. R., Kuksenko S. P., Akhunov R. R. Acceleration of Multiple Solution of Linear Systems for Analyses of Microstrip Structures. *International journal of mathematical models and methods in applied sciences*. 2015, Vol. 9, P. 721–726.
11. Gazizov T. R. [Characteristics of suspended strip line and reversed strip line]. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 1996, Vol. 39, No. 2, P. 126–128 (In Russ.).
12. Sagiyeva I. [Studying characteristics of shielded microstrip line]. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2017, Vol. 60, No. 12/2, P. 103–107 (In Russ.).
13. Sagiyeva I. Ye. [Modeling characteristics of a microstrip line with side grounded conductors]. *Materialy XIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya", posvyashchennaya 55-letiyu TUSURa* [Materials of the XIII International Scientific and Practical Conference "Electronic Tools and Control Systems", dedicated to the 55th anniversary of TUSUR,]. Tomsk, November 29 – December 1, 2017, Part 2, P. 19–20 (In Russ.).
14. Gazizov T. R., Salov V. K., Kuksenko S. P. Stable delay of microstrip line with side grounded conductors. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2017, Vol. 2017, 5 p. DOI:10.1155/2017/1965739.
15. Kuksenko S. P., Zabolotskiy A. M., Melkozzerov A. O., Gazizov T. R. [New capacities of the system of modeling electromagnetic compatibility]. *Doklady TUSURa*. 2015, No. 2 (36), P. 45–50 (In Russ.).

### Библиографические ссылки

1. Исследование воздействия электромагнитного излучения на космический аппарат с негерметичным приборным отсеком / С. Г. Кочура [и др.] // Технологии электромагнитной совместимости. 2017. № 3(62). С. 3–10.
2. Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М., Орлов П. Е. Влияние длины и количества витков на задержку микрополосковой линии // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 13, № 4. С. 93–96.
3. Распространение импульса в меандровой линии с неоднородным диэлектрическим заполнением без искажений его формы перекрестными наводками / Р. С. Суровцев [и др.] // Доклады ТУСУРа. 2014. № 4(34). С. 34–38.
4. Orlov P., Gazizov T., Zabolotsky A. Comparative electromagnetic and quasi-static simulations of a short-pulse propagation along microstrip meander delay lines with design constraints // *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*. 2016. Vol. 67, no. 5. P. 387–389. DOI: 10.1515/jee-2016-0056.
5. Газизов Р. Р., Заболоцкий А. М., Газизов Т. Т. Исследование максимума напряжения сверхкороткого импульса в микрополосковой меандровой линии при изменении ее геометрических параметров // Технологии электромагнитной совместимости. 2016. № 3(58). С. 11–17.
6. Суровцев Р. С., Газизов Т. Р. Оценка целостности сигналов в печатных платах системы автономной навигации космического аппарата [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62204> (дата обращения: 5.10.2015).
7. Hamood M. K. Line thickness for various characteristic impedance of microstrip line // *Tikrit Journal of Pure Science*. 2013. Vol. 18, No. 3. P. 140–144.
8. Akhunov R. R., Kuksenko S. P., Gazizov T. R. Acceleration of Multiple Iterative Solution of Linear Algebraic Systems in Computing the Capacitance of a Microstrip Line in Wide Ranges of Its Sizes // *Journal*

of mathematical sciences. 2015. Vol. 207, № 5. P. 686–692.

9. Surovtsev R. S., Kuksenko S. P., Gazizov T. R. Analytic Evaluation of the Computational Costs for Solving Systems of Linear Algebraic Equations in Multiple Computing of the Capacitance Matrix in a Range of the Dielectric Permittivity of Dielectrics // *Journal of mathematical sciences*, 2015. Vol. 207, № 5. P. 795–802.

10. Gazizov T. R., Kuksenko S. P., Akhunov R. R. Acceleration of Multiple Solution of Linear Systems for Analyses of Microstrip Structures // *International journal of mathematical models and methods in applied sciences*. 2015. Vol. 9. P. 721–726.

11. Газизов Т. Р. Характеристики подвешенной и обращенной полосковых линий // *Известия вузов. Физика*. 1996. Т. 39, № 2. С. 126–128.

12. Сагиева И. Исследование характеристик экранированной микрополосковой линии // *Известия вузов. Физика*. 2017. Т. 60, № 12/2. С. 103–107.

13. Сагиева И. Е. Моделирование характеристик микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками сверху // *Электронные средства и системы управления : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 55-летию ТУСУРа (29 нояб.–1 дек. 2017, г. Томск)*. Томск, 2017. Ч. 2. С. 19–20.

14. Gazizov T. R., Salov V. K., Kuksenko S. P. Stable delay of microstrip line with side grounded conductors // *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2017. Vol. 2017, Article ID 1965739. 5 p. DOI: 10.1155/2017/1965739.

15. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С. П. Куксенко [и др.] // *Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники*. 2015. № 2(36). С. 45–50.

© Sagiyeva I. Ye., Gazizov T. R., 2018