

К 100-ЛЕТИЮ
Б.В. СЕСТРОРЕЦКОГО

УДК 621.396

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ИМПЕДАНСНОГО АНАЛОГА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРОСТРАНСТВА СЕСТРОРЕЦКОГО
ДЛЯ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЫ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ
НА ДИАГРАММУ НАПРАВЛЕННОСТИ БОРТОВОЙ АНТЕННЫ

© 2023 г. К. И. Конов^а, *, К. Н. Климов^а

^а Национальный исследовательский университет “Московский авиационный институт”,
Волоколамское шос., 4, Москва, 125993 Российская Федерация

*E-mail: konov.k.i@gmail.com

Поступила в редакцию 09.03.2023 г.

После доработки 09.03.2023 г.

Принята к публикации 15.05.2023 г.

Рассмотрена задача о влиянии плазмы факела ракетного двигателя (РД) на диаграмму направленности (ДН) бортовой антенны третьей ступени ракеты-носителя. Показана возможность использования метода импедансного аналога электромагнитного пространства Сестрорецкого для решения данной задачи. Приведена картина распределения плазменной частоты в шлейфе факела РД. Получены картины распределения амплитуды и фазы магнитного поля в исследуемой области. Представлены ДН антенной системы, показывающие существенное смещение направления главного лепестка и изменение его формы.

DOI: 10.31857/S0033849423080077, EDN: ZIUFGJ

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках данной работы исследовано влияние плазмы факела ракетного двигателя (РД) на диаграмму направленности (ДН) бортовой антенной системы (БАС) третьей ступени ракеты-носителя, предназначенной для вывода космического аппарата на орбиту. Выводимый аппарат помещали внутрь корпуса третьей ступени ракеты-носителя чтобы избежать повреждений, при прохождении плотных слоев атмосферы. На корпусе расположена антенная система, предназначенная для передачи телеметрии на наземные станции и в Центр управления полетами. Качество передачи телеметрии имеет важную роль при выводе космического аппарата на орбиту. При разработке БАС необходимо учитывать влияние корпуса 3-й ступени ракеты-носителя на ее ДН. Для этого может быть использован метод импедансного аналога электромагнитного пространства Сестрорецкого [1–8]. Кроме того, плазма факела РД 3-й ступени ракеты-носителя, как показано в работе [9], также оказывает влияние на распространение электромагнитных волн. Это явление рассмотрено в работах [9–17], а также исследовано экспериментально [18, 19]. Основное влияние на распространение радиосигнала оказывает плазма факела РД. Учитывая результаты работ [8, 20–22], отметим, что влияние плазмы факела РД и кон-

струкций ракеты-носителя хорошо описывается с помощью 2D-моделей.

Геометрия исследуемой задачи приведена на рис. 1.

Проведем численное 2D-моделирование во временной области рассеяния электромагнитной волны излученной с БАС третьей ступени ракеты-носителя от корпуса третьей ступени и переходного отсека разгонного блока сначала без учета плазмы факела РД, а затем с учетом и сравним полученные результаты. Для расчета воспользуемся методом импедансного аналога электромагнитного пространства Сестрорецкого [1, 3, 23], или метода импедансных сеток [2]. Такой выбор обусловлен тем, что указанный метод позволяет получить, по-видимому, самые эффективные процедуры электродинамического анализа [2, 8].

Суть метода состоит в прямом сопоставлении анализируемой геометрии с электрической схемой с сосредоточенными (RLC) или распределенными ($R\tau$) параметрами, а затем исследование полученной эквивалентной схемы анализируемой геометрии с помощью любого (наиболее удобного в конкретном случае) способа [2, 8, 24]. К достоинству метода импедансного аналога электромагнитного пространства следует отнести наглядность оперирования с физической моделью исследуемой системы [1]. Данный метод является логическим продол-

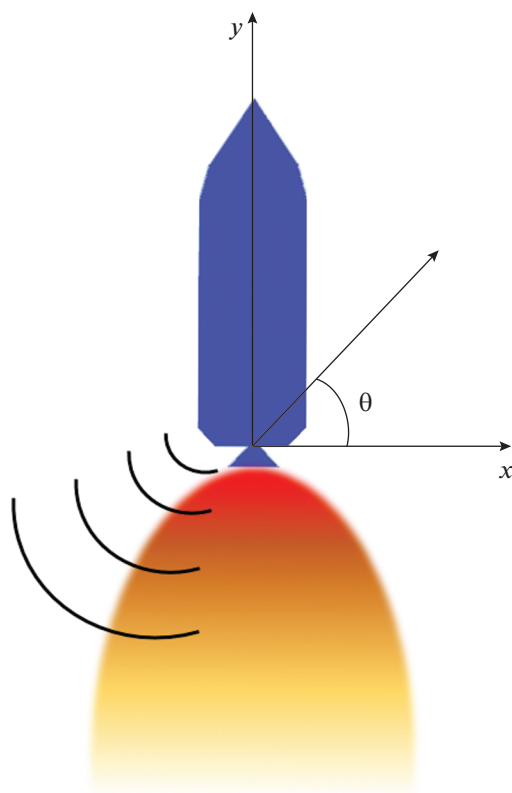


Рис. 1. Геометрия задачи: третья ступень ракеты-носителя и шлейф факела РД, система координат – оси абсцисс и ординат, а также угол θ .

жением метода прямого физического моделирования, развитого в работах [20, 21, 25–30].

В настоящее время исследуемая проблема решается в основном методом прямого макетирования, поэтому мы сможем сравнить результаты расчета ДН БАС с результатами эксперимента для случая без учета факела РД.

2. РАСЧЕТ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БЕЗ УЧЕТА ФАКЕЛА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Численное электродинамическое моделирование задачи было проведено в программном комплексе Tamic Rt-H [8, 23, 31]. Этот программный комплекс предназначен для решения задач 2D электродинамического анализа во временной области для произвольной зависимости диэлектрической проницаемости от координаты на основе метода импедансного аналога электромагнитного пространства Сестрорецкого [23, 24, 32–47].

Рассмотрим БАС, состоящую из активного и пассивного вибраторов и расположенную на переходной ферме головной части космического

аппарата. При моделировании размер анализируемой области составил 45.47×72.65 длин волн, отношение длины волны к дискрету сетки – 24.98, при этом область анализа состояла из 2064792 узлов сетки. Для вычислений потребовалось 95.23 Мб оперативной памяти. Расчет на компьютере с процессором AMD Ryzen 7 5800X 8-Core Processor 3.80 ГГц и 32 Гб оперативной памяти длился 1 мин 34 с.

На рис. 2а представлено амплитудное распределение магнитного поля системы вибраторов с учетом обтекателя головной части третьей ступени и переходного отсека разгонного блока ракеты для выбранной частоты f_0 . Как видно, система обладает ярко выраженной направленностью.

На рис. 2б представлено фазовое распределение магнитного поля системы вибраторов с учетом обтекателя головной части третьей ступени ракеты-носителя и переходного отсека разгонного блока ракеты для частоты f_0 . Как видно, фаза магнитного поля меняется линейно, за исключением области за головной частью ракеты-носителя.

На рис. 3 представлен экспериментальный макет переходного отсека разгонного блока [8, 22]. При сравнении ДН, рассчитанной с помощью программного комплекса Planar Rt-H с измеренной ДН, можно говорить о достаточно хорошем совпадении результатов расчета с экспериментальными данными [8].

3. РАСЧЕТ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С УЧЕТОМ ФАКЕЛА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Проведем численное моделирование во временной области рассеяния электромагнитных (ЭМ) волн рассмотренной выше БАС с учетом конструкций головной части ракеты-носителя и плазмы факела РД. Модель для оценки влияния факела РД третьей ступени возьмем из работы [48]. В указанной работе описана модель зависимости массовой плотности заряженных частиц в факеле РД третьей ступени тяжелой межконтинентальной баллистической ракеты LGM-118. Данная модель исследована в работе [9], получено распределение плазменной частоты от координат (см. рис. 2а) и построены траектории лучей для трех характерных областей факела РД. На рис. 4 представлено сечение для значений плазменной частоты в факеле РД LGM-118, в плоскости XOZ в области, примыкающей к соплу. Как видно из рисунка, на расстоянии до 1 м наблюдается высокое значение плазменной частоты вплоть до 10^{16} Гц, распределение плазменной частоты симметрично относительно оси z . Приведенные результаты расчета, полученные в работе [9], позволяют провести оценку размеров области численного моделиро-

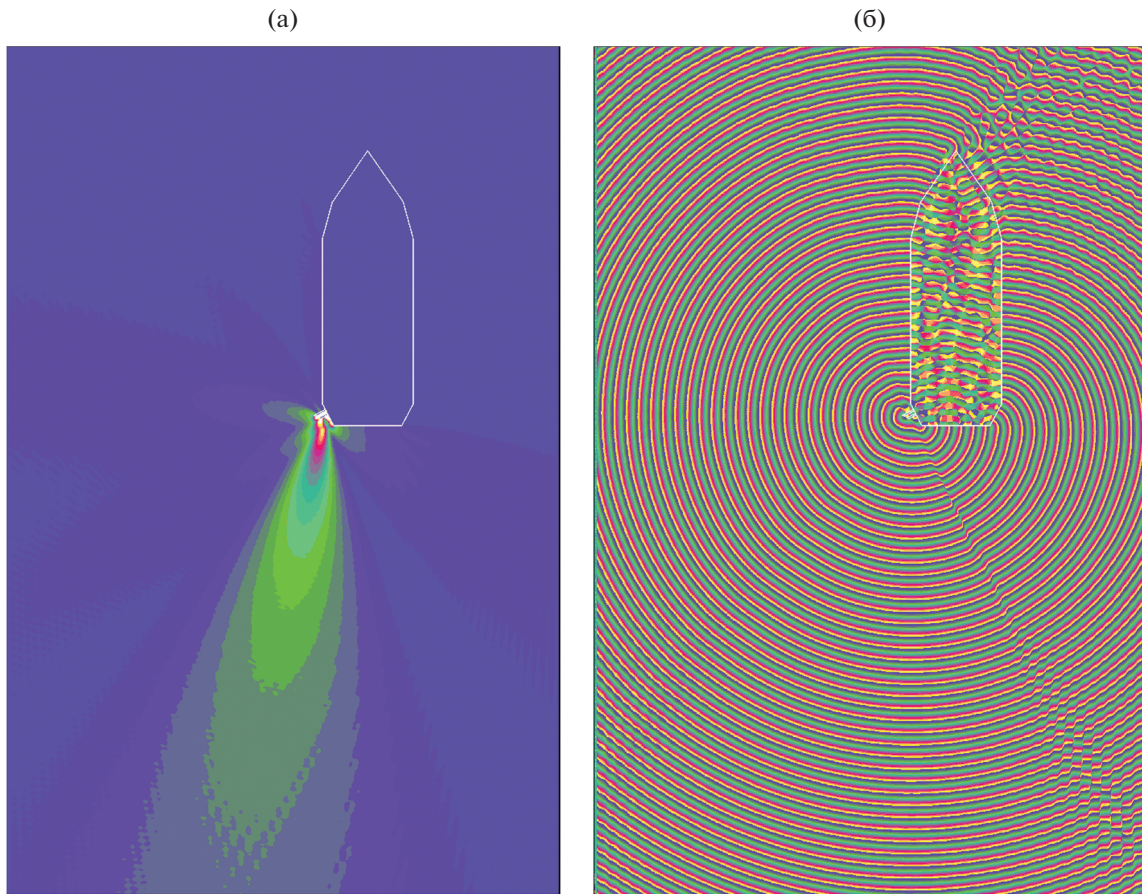


Рис. 2. Амплитудное (а) и фазовое (б) распределение магнитного поля системы вибраторов с учетом обтекателя головной части и переходного отсека разгонного блока ракеты для частоты f_0 .

вания для решения задачи о рассеянии ЭМ-волны, излучаемой БАС, с учетом влияния факела РД, поэтому при моделировании выберем размер анализируемой области 45.47×72.65 длин волн в свободном пространстве [32–36]. Отношение длины волны к дискрету сетки составило 24.98, при этом область анализа состояла из 2064792 узлов сетки. Для вычислений использовалось 136.22 Мб оперативной памяти. Расчет на компьютере с процессором AMD Ryzen 7 5800X 8-Core Processor 3.80 ГГц и 32 Гб оперативной памяти длился 1 мин 36 с, время расчета не изменилось.

На рис. 5а представлено амплитудное распределение магнитного поля БАС с учетом обтекателя головной части третьей ступени ракеты-носителя, переходного отсека разгонного блока и факела РД для частоты f_0 . Также представлено пространственное распределение относительной диэлектрической проницаемости в плазме факела РД. Как видно из рисунка, ЭМ-волна отражается от плазмы факела РД, при этом формируется несколько направлений, в которых наблюдается максимумы магнитного поля. Отметим, что в

этом случае не наблюдается максимума в том же направлении по сравнению с рис. 2.

На рис. 5б приведено распределение фазы магнитного поля БАС с учетом обтекателя головной части третьей ступени ракеты-носителя, переход-

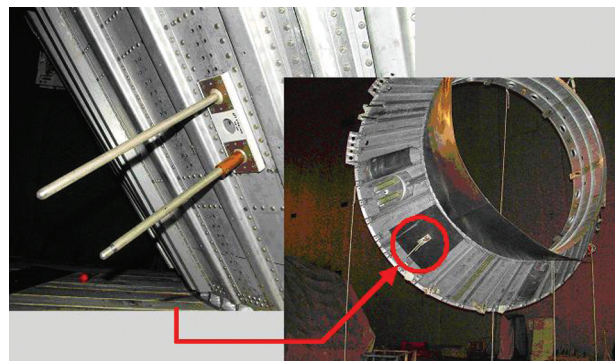


Рис. 3. Система двух вибраторов на антенном макете переходного отсека разгонного блока ракеты.

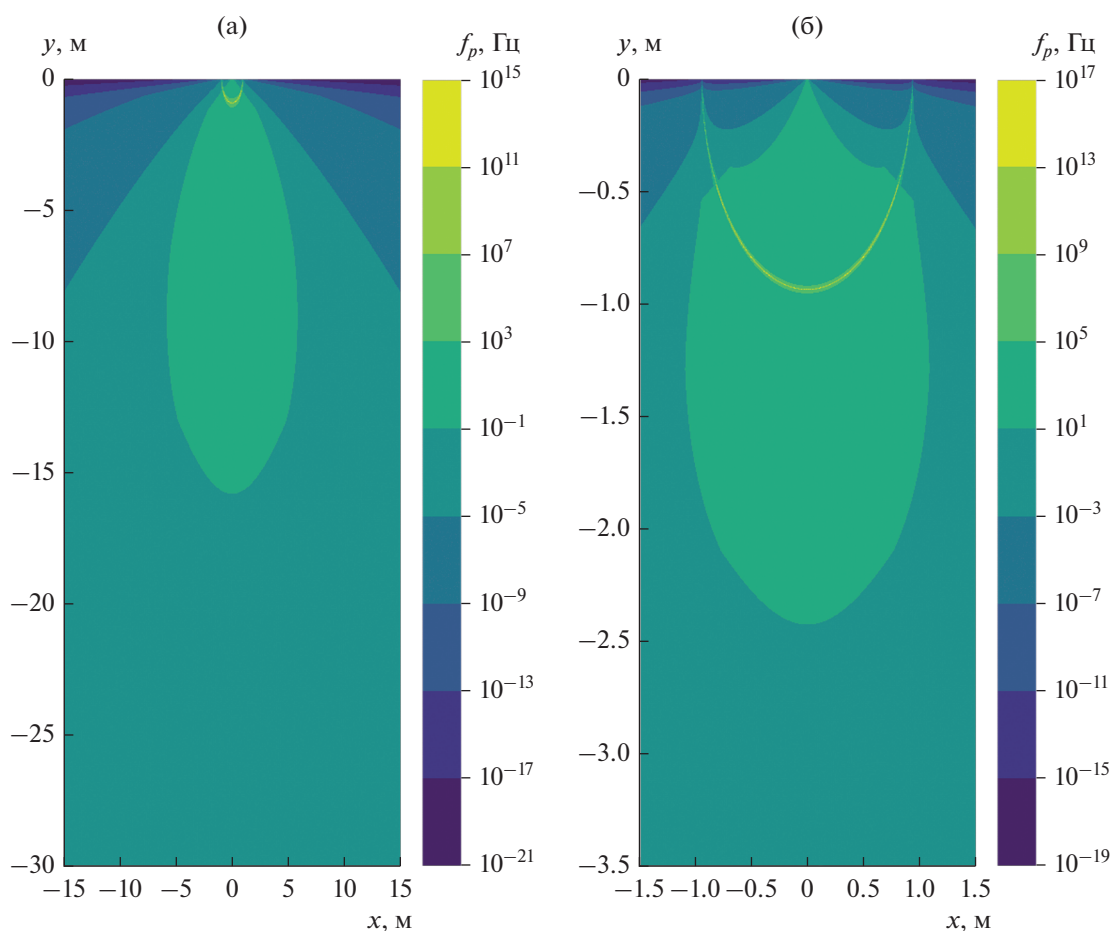


Рис. 4. Сечение для значения плазменной частоты f_p в факеле рассматриваемого РД, в плоскости XOZ в области, прилегающей к соплу на расстоянии до 400 (а) и до 4 м (б).

ного отсека разгонного блока и факела ракетного двигателя для частоты f_0 . Как видно из рисунка, в области факела ракетного двигателя наблюдается перераспределение фазы магнитного поля, вызванное отсутствием бегущей волны.

На рис. 6 представлены ДН БАС с учетом обтекателя головной части третьей ступени ракеты-носителя и переходного отсека разгонного блока, построенные на основании полученных данных о распределении ЭМ-поля в рамках исследуемой задачи с учетом и без учета плазмы факела РД. Из рис. 6 следует, что главный лепесток ДН БАС для случая без учета плазмы факела РД по уровню 6 дБ ориентирован в направлении -101.66 град, а уровень боковых лепестков составляет -5.18 дБ. Главный лепесток ДН, рассчитанной с учетом факела РД сместился на -78.34 град и ориентирован в направлении -180 град (см. рис. 6). При этом форма главного лепестка стала более изрезанной, в ней наблюдается пять локальных максимумов, которые соответствуют максимумам

амплитуды магнитного поля на рис. 5а. Отметим, что ширина главного лепестка по уровню -3 дБ увеличилась на 6.6 град: с 29.1 до 35.7 град.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена задача о влиянии плазмы факела РД на ДН БАС. Приведена картина распределения плазменной частоты в шлейфе факела РД. Проведено численное электродинамическое моделирование задачи в программном комплексе Planar Rt-N. Получены картины распределения амплитуды и фазы магнитного поля в исследуемой области. Показано смещение направления максимального излучения БАС третьей ступени ракеты-носителя на -78.34 град и увеличение ширины главного лепестка ДН на 6.6 град в случае учета факела РД, а также перераспределение фазы магнитного поля в исследуемой области. Таким образом, показано, что необходимо учитывать влияние факела РД на ДН бортовых антенн и использовать для этого метод

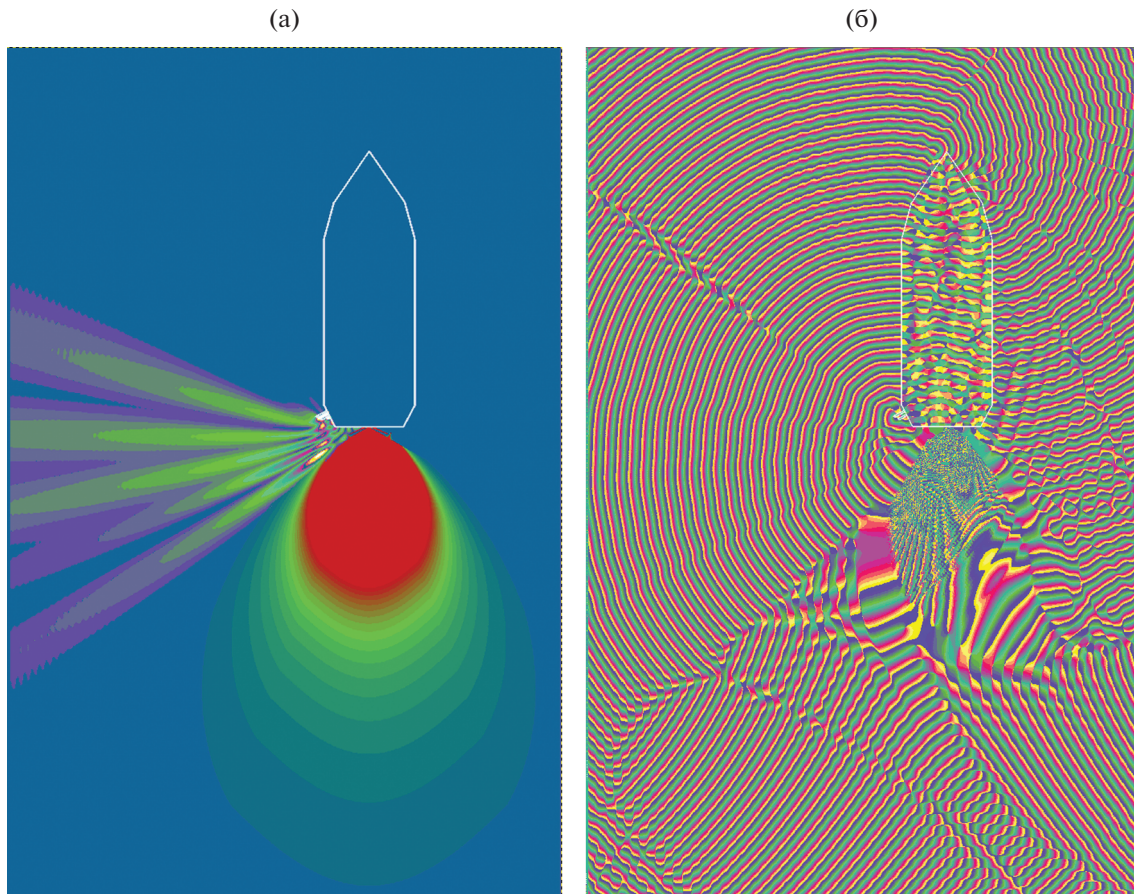


Рис. 5. Амплитудное (а) и фазовое (б) распределение магнитного поля системы вибраторов с учетом обтекателя головной части и переходного отсека разгонного блока ракеты и факела ракетного двигателя для частоты f_0 .

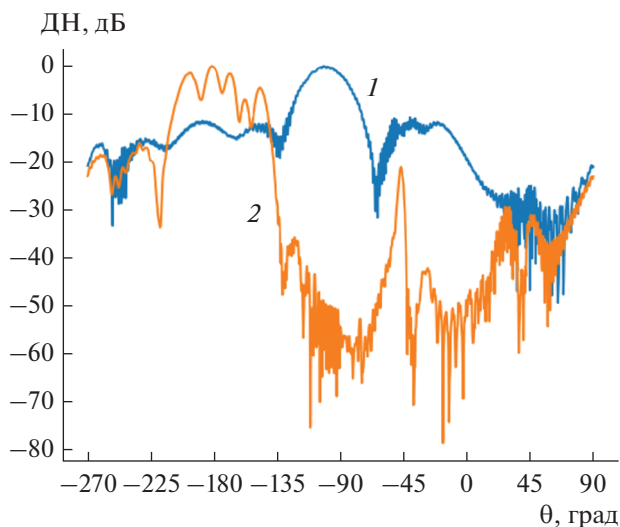


Рис. 6. Диаграмма направленности системы вибраторов с учетом обтекателя головной части и переходного отсека разгонного блока ракеты без учета (кривая 1) и с учетом факела ракетного двигателя (кривая 2) для частоты f_0 .

импедансного аналога электромагнитного пространства Сестрорецкого.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сестрорецкий Б.В.* // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. 1976. Вып. 2. С. 113.
2. *Сестрорецкий Б.В.* // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. 1983. Вып. 5. С. 56.
3. *Середов В.М.* // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. 1983. Вып. 5. С. 34.
4. *Сестрорецкий Б.В.* // Межвуз. сб. науч. тр. "Машинное проектирование устройств и систем СВЧ". М.: МИРЭА, 1977. С. 127.
5. *Кустов В.Ю.* Импедансная интерпретация метода конечных элементов для электродинамического анализа планарных волноводных устройств. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МФТИ, 1988. 210 с.
6. *Шлепнев Ю.О.* Применение метода прямых для математического моделирования планарных элемен-

- тов интегральных схем СВЧ. Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: НЭИС, 1990. 194 с.
7. Карцев И.Ю. Метод импедансно-сеточной функции Грина для решения двумерных задач дифракции. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1991. 138 с.
 8. Климов К.Н. Методология численного анализа во временной области двумерных импедансносеточных моделей антенных систем и электродинамических объектов большой размерности. Дис. ... д-ра техн. наук. М.: МИЭМ, 2007. 402 с.
 9. Конов К.И., Климов К.Н. // РЭ. 2022. Т. 67. № 8. С. 745.
 10. McIver D.E. // Proc. NASA Conf. on Communicating Through Plasmas of Atmospheric Entry and Rocket Exhaust. Hampton. 14–15 Jan. 1964. Washington: NASA, 1964. P. 167.
 11. Smoot L.D., Seliga T.J. // J. Spacecraft and Rockets. 1967. V. 4. № 6. P. 774.
<https://doi.org/10.2514/3.28950>
 12. Kinefuchi K., Funaki I., Ogawa H. et al. // Proc. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2009. P. 1386.
<https://doi.org/10.2514/6.2009-1386>
 13. Kinefuchi K., Funaki I., Shimada T., Abe T. // J. Spacecraft and Rockets. 2010. V. 47. № 4. P. 627.
 14. Kinefuchi K., Funaki I., Abe T. // IEEE Trans. 2010. V. AP-58. № 10. P. 3282.
 15. Kinefuchi K., Funaki I., Abe T. // J. Spacecraft and Rockets. 2013. V. 50. № 1. P. 150.
<https://doi.org/10.2514/1.A32223>
 16. McCargar R.K., Siegrist K.M., Reuster J.G. et al. // IEEE Trans. 2020. V. AP-66. № 12. P. 6531.
<https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2845545>
 17. Dieudonné É., Kamení A., Pichon L., Monchaux D. // Acta Astronautica. 2019. V. 158. P. 334.
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.032>
 18. Coutu N., Barrot W., Engblom W., Perrell E. // Proc. IEEE Southeastcon. 4–7 Apr. 2013. Jacksonville, USA. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/SECON.2013.6567408>
 19. Sun B., Xie K., Shi L. et al. // IEEE Trans. 2020. V. AP-68. № 12. P. 8021.
<https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2999661>
 20. Климов К.Н. // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 1–10 октября 2021. Сочи, 2021. С. 254.
 21. Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В. // Журн. радиоэлектроники. 2001. № 2. С. 3.
 22. Ruchenkov V.A., Klimov K.N., Sestoretiskii B.V. // 6th Intern. Conf. Antenna Theory and Techniques. 17–21 сентября 2007. Севастополь, 2007. P. 312.
 23. Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В. // РЭ. 2001. Т. 46. № 4. С. 389.
 24. Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В. // РЭ. 2007. Т. 52. № 1. С. 5.
 25. Гершгорин С.А. // ЖПФ. 1929. Т. 4. Вып. 3–4. С. 3.
 26. Гутенмахер Л.И. Электрическое моделирование. М.: Изд-во АН СССР, 1943.
 27. Венников В.А. Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике. М.: Госэнергоиздат, 1949.
 28. Иванов С.А., Сестрорецкий Б.В., Боголюбов А.Н. // Журн. радиоэлектроники. 2008. № 5. <http://jre.cplire.ru/jre/may08/6/text.pdf>.
 29. Тетельбаум И.М. // Сб. ст. Электрическое моделирование. М.: Физматлит, 1959. С. 320.
 30. Крон Г. Исследование сложных систем по частям (диакоптика). М.: Наука, 1972. С. 542.
 31. Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В., Вершков В.А. и др. Электродинамический анализ двумерных неоднородных сред и плазмы. М.: МАКС Пресс, 2005.
 32. Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В. // РЭ. 2001. Т. 46. № 1. С. 30.
 33. Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В. // РЭ. 2001. Т. 46. № 3. С. 271.
 34. Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В. // РЭ. 2001. Т. 46. № 10. С. 1223.
 35. Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В., Годин С.М., Рошин В.В. // РЭ. 2004. Т. 49. № 11. С. 123.
 36. Уразбаев А.О., Вершков В.А., Солдатов С.В., Шелухин Д.А. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 6. С. 483.
 37. Сестрорецкий Б.В. // Радиотехнические тетради. 2004. № 30. С. 11.
 38. Климов К.Н. // Радиотехнические тетради. 2004. № 30. С. 15.
 39. Рученков В.А. // Радиотехнические тетради. 2004. № 30. С. 20.
 40. Рученков В.А. // Радиотехнические тетради. 2004. № 30. С. 23.
 41. Камышев Т.В. // Радиотехнические тетради. 2004. № 30. С. 26.
 42. Камышев Т.В. // Радиотехнические тетради. 2004. № 30. С. 31.
 43. Камышев Т.В., Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В. // РЭ. 2005. Т. 50. № 4. С. 415.
 44. Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В. // РЭ. 2001. Т. 46. № 6. С. 645.
 45. Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В. // РЭ. 2001. Т. 46. № 9. С. 1048.
 46. Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В. // РЭ. 2005. Т. 50. № 6. С. 647.
 47. Климов К.Н., Камышев Т.В., Рученков В.А., Сестрорецкий Б.В. // РЭ. 2006. Т. 51. № 7. С. 773.
 48. Senol A.J., Romine G.L. // J. Spacecraft and Rockets. 1986. V. 23. № 1. P. 39.
<https://doi.org/10.2514/3.25081>
 49. Kinefuchi K., Yamaguchi H., Minami M. et al. // Acta Astronautica. 2019. V. 165. P. 373.
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.09.025>