

Измерение комплексной проводимости и диаграммы направленности одиночной продольной щели в прямоугольном волноводе

А. Д. Гладких¹, С. И. Иванов², А. П. Лавров³, В. Д. Купцов⁴

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

¹gladkih.ad@edu.spbstu.ru, ²ivanov_si@spbstu.ru

³lavrov_ap@spbstu.ru, ⁴kuptsov@spbstu.ru

Аннотация. Представлены результаты измерений комплексной проводимости продольной щели прямоугольного волновода Х-диапазона, закороченного на конце. Проведен анализ зависимости комплексной проводимости щели от ее длины. Результаты измерений сравниваются с теоретическими расчетами и результатами электродинамического моделирования.

Ключевые слова: щелевые антенны; прямоугольный волновод; комплексная проводимость щели; Х-диапазон

1. ВВЕДЕНИЕ

Волноводно-щелевые антенные решетки (ВЩАР) широко используются в современных устройствах различного назначения [1, 2]. Эти антенны демонстрируют высокую эффективность излучения, контроль низкого уровня боковых лепестков, малую перекрестную поляризацию [3, 4]. Антенны данного класса можно сделать относительно тонкими, компактными и прочными, по разумной цене. Такие преимущества ВЩАР делают возможным применение их в различных бортовых радиолокационных системах, в устройствах мобильной связи, в том числе миллиметрового диапазона 5G, в спутниковых радарх с синтезированием апертуры антенны [5] и др.

Расчет характеристик современных ВЩАР требует использование сложной электродинамической модели излучения щелей, взаимодействующих между собой как во внутреннем пространстве волновода, так и во внешнем пространстве самосогласованного электромагнитного поля [1, 6, 7]. Как правило, такие расчеты сопровождаются различными предположениями, упрощающими решение задачи и не всегда оправданными в инженерных приложениях. В связи с вышеизложенным, успешная разработка разного типа щелевых антенн с заданными оптимальными характеристиками сопряжена с необходимостью проведения как их экспериментального анализа, так и анализа в программных пакетах трехмерного моделирования электромагнитного поля, например, в среде моделирования ANSYS HFSS [8].

В основе теоретического анализа щелевой антенны лежит расчет входного импеданса прямоугольного волновода с использованием метода матриц линий передач (Transmission Line Matrix Method) (TLM) [1, 6, 9, 10]. Несмотря на возбуждение и распространение в прямоугольном волноводе только основной моды,

вблизи щели будут возбуждаться моды более высокого порядка. Хотя они не распространяются в волноводе, они будут влиять на величину проводимости и диаграмму направленности излучения щели [1, 6]. Техническая реализация щелевых антенных решеток показывает, что расчет входного импеданса прямоугольного волновода, закороченного на конце, представляет практический интерес. Точность расчета, моделирования и измерения параметров излучения щели определяет основные характеристики щелевой антенны, в том числе, уровень боковых лепестков диаграммы направленности (ДН) и диапазон рабочих частот и, следовательно, дальнейшее изучение эквивалентной комплексной проводимости Y_{slot} и ДН излучения щели также представляет практический интерес.

В работе в программном пакете 3-D моделирования ANSYS HFSS анализируется влияние размера продольной щели, размещенной на широкой стенке закороченного на конце прямоугольного волновода, на Y_{slot} и ДН излучения щели в Х-диапазоне частот. Полученные результаты моделирования сравниваются с результатами измерений и теоретическими расчетами.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ Y_{slot}

Следуя работе [9], продольная щель в широкой стенке волновода, закороченного на конце, представлена комплексной проводимостью Y_{slot} на эквивалентной линии передачи (Equivalent circuit with the transmission line model (TLM)) как показано на рис. 1. Нормализованная проводимость Y_2 в сечении 2-2', учитывающая Short Circuit в сечении 3-3', может быть рассчитана по формуле (1) [11]:

$$Y_2/Y_0 = \coth[\gamma_{10}L_2], \quad (1)$$

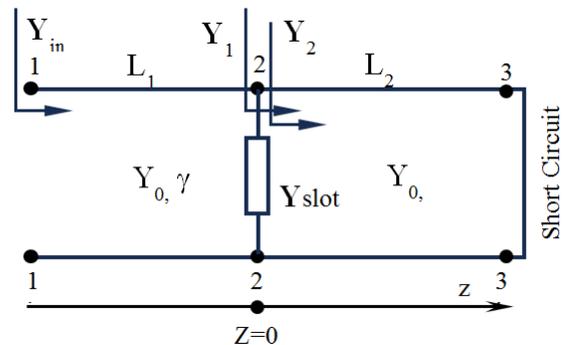


Рис. 1. Эквивалентная схема прямоугольного волновода, закороченного на конце

Представленное исследование финансировалось РФФИ, номер проекта 19-29-06034.

где γ_{10} – фазовая постоянная доминирующей моды TE_{10} волновода, $Z_0=1/Y_0$ – волновое сопротивление линии передачи. Для прямоугольного волновода

$$\gamma_{10} = \gamma_0 \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a} \right)^2 \right]^{0.5}; \quad Y_0 = \frac{\gamma_{10}}{\gamma_0} \frac{1}{120\pi}. \quad (2)$$

Здесь γ_0 и λ_0 – фазовая постоянная и длина волны в свободном пространстве соответственно, причем $\gamma_0 = i \cdot 2\pi/\lambda_0$, a – ширина широкой стенки волновода. Для волновода без потерь γ_{10} чисто мнимая величина, в то время как Y_0 – чисто действительная. Нормированная комплексная входная проводимость Y_{in} в сечении 1-1' равна [11]:

$$Y_{in}/Y_0 = \frac{Y_1/Y_0 + \tanh[\gamma_{10}L_1]}{1 + Y_1/Y_0 \cdot \tanh[\gamma_{10}L_1]}, \quad (3)$$

где комплексная проводимость Y_1 в сечении 2-2', определяется параллельно включенными проводимостями щели Y_{slot} и Y_2

$$Y_1 = Y_{slot} + Y_2 \cdot \coth[\gamma_{10}L_2], \quad (4)$$

здесь функции $\text{th}(x)$ и $\text{coth}(x)$ – тангенс и котангенс гиперболический.

Нормированная комплексная входная проводимость Y_{in} связана с измеряемым входным параметром рассеяния S_{11} однопортового щелевого модуля следующим соотношением [11]:

$$Y_{in}/Y_0 = \frac{1 - S_{11}}{1 + S_{11}}. \quad (5)$$

Таким образом, измерение параметра рассеяния S_{11} с помощью векторного анализатора цепей позволяет провести расчет и анализ эквивалентной комплексной проводимости щели Y_{slot} , что будет изложено в последующих разделах.

III. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 2 представлена волноводная секция с продольной щелью на широкой стенке волновода, характеристики которой исследовались в данной работе. Исследовалось пять секций прямоугольного волновода с поперечным сечением 23x5 мм и разной эквивалентной длиной щели L_{slot} : 14.8 мм, 15.3 мм, 15.8 мм, 16.3 мм и 16.8 мм. Ширина щели составляет $w=3$ мм, смещение продольной оси симметрии щели относительно оси симметрии широкой стенки волновода – 3.5 мм, толщина стенок волновода $t=1$ мм. Центр щели смещен относительно закороченного конца волновода на расстояние $L_2=11,1$ мм, смещение центра щели относительно фланца волновода составляет $L_1=22,3$ мм (см. рис. 2). На частоте $f_0=9.375$ ГГц длина основной поперечной моды TE_{10} волновода λ_{10} составляет $\lambda_{10}=44,5$ мм при длине волны в свободном пространстве $\lambda_0=32,0$ мм.

Измерение характеристик направленных свойств излучения (диаграммы направленности (ДН)) щели проводилось в безэховой камере с использованием автоматизированной системы (АС), включающей аппаратно-программные обеспечения и высокоточную

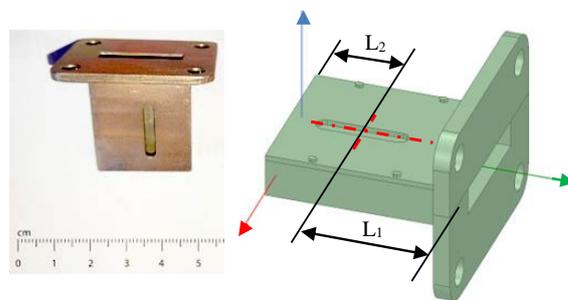


Рис. 2. Внешний вид прямоугольного волновода с продольной щелью и его 3-D модель

систему пространственного позиционирования от компании-производителя «ТРИМ» [12]. Внешний вид комплекса (фото с сайта компании [12]) и его функциональная схема измерений представлены на рис. 3а) и б) соответственно. Измерение проводилось методом ближнего поля, при котором фиксируется значения и амплитуды, и фазы поля вблизи апертуры антенны.

Для измерений амплитуды и фазы поля используется векторный анализатор цепей. По известному расположению центра щели, подвижная высокоточная механическая система проводит пространственное сканирование и последовательные измерения электромагнитного поля зондом на расстоянии 3λ от апертуры (в ближней зоне).

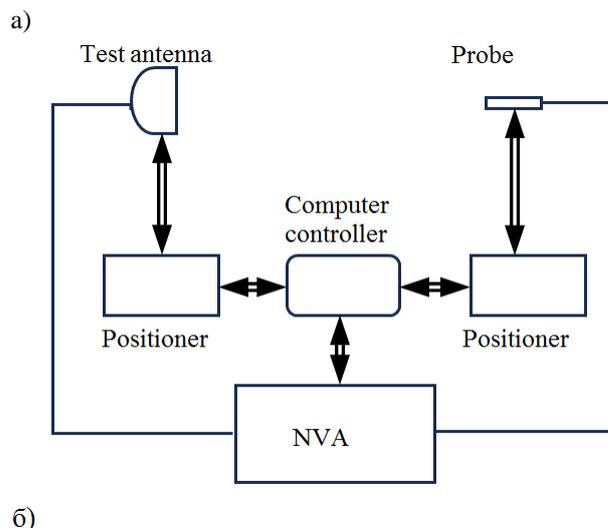
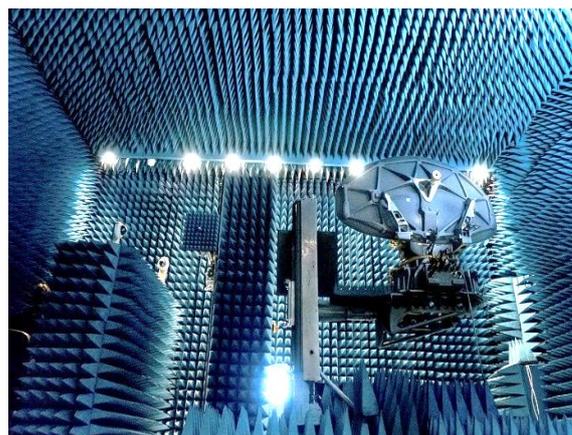


Рис. 3. Автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс для измерения параметров антенн (компания «ТРИМ» [12]); а) внешний вид, б) функциональная схема.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И АНАЛИЗ

На рис. 4 представлены результаты измерений с использованием векторного анализатора цепей и сравнение с результатом моделирования. Зависимость модуля параметра рассеяния S_{11} волноводной секции от нормированной длины щели на фиксированной частоте f_0 . Наилучшее согласование волноводной секции, закороченной на конце, происходит при резонансной длине щели равной $\lambda_0/2$. Фаза параметра рассеяния при резонансной длине щели равна нулю, т. е. входное сопротивление секции чисто активно.

Данные измерений позволили рассчитать комплексную проводимость щели по методике, описанной в разделе II. Результаты рассчитанных по данным измерений и по данным 3-D электродинамического моделирования в пакете Ansys HFSS представлены графиками на рис. 5–8. На рис. 5 и рис. 6 также приведены графики соответствующих теоретических расчетов комплексной проводимости щели, выполненных по методике, изложенной в [1,7]. Полученные результаты находятся в удовлетворительном согласии.

Анализ зависимостей нормированной комплексной проводимости щели от ее нормированной длины на фиксированной частоте f_0 , представленных на рис. 5 и рис. 6 показывает резонансный характер влияния L_{slot} на Y_{slot} .

При резонансной длине щели приблизительно равной $\lambda_0/2$ проводимость щели становится вещественной и

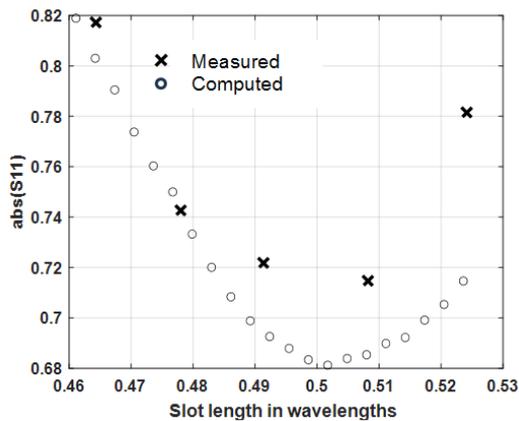


Рис. 4. Зависимость модуля параметра рассеяния S_{11} волноводной секции от нормированной длины щели L_{SLOT}/λ_0 на фиксированной частоте f_0 .

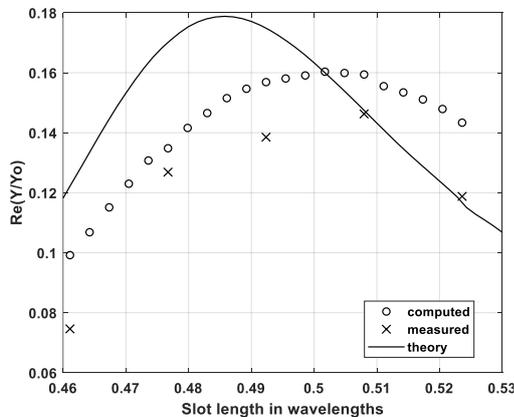


Рис. 5. Зависимость реальной части нормированной проводимости щели от ее нормированной длины L_{SLOT}/λ_0 на фиксированной частоте f_0 .

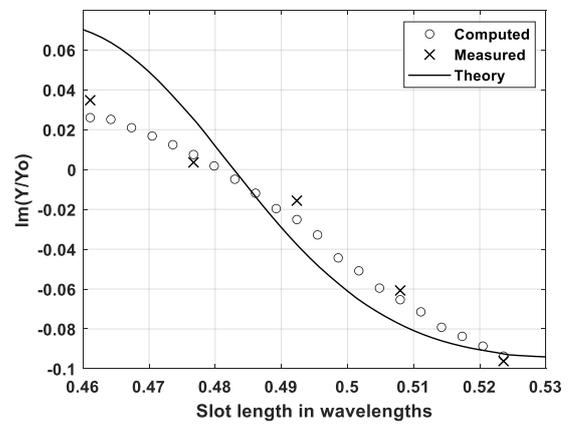


Рис. 6. Зависимость мнимой части нормированной проводимости щели от ее нормированной длины L_{SLOT}/λ_0 на фиксированной частоте f_0 .

достигает максимума, что совпадает с результатами других работ [1,10].

Зависимость проводимости щели Y_{slot} от частоты при фиксированной длине $L_{SLOT} = 15.8$ мм также указывает на резонанс комплексной проводимости (см. рис. 7 и рис. 8). Зависимости $ReY_{slot}(f)$ и $ImY_{slot}(f)$ позволяют вычислить параметры параллельного эквивалентного LCR колебательного контура для комплексной проводимости [11]: $R_{EQ} = 3.1$ кОм, $C_{EQ} = 0.3$ фФ и $L_{EQ} = 1$ мкГ. Приведенные параметры приводят к небольшой добротности Q одиночной щели и, следовательно, к ее широкой относительной полосе частот.

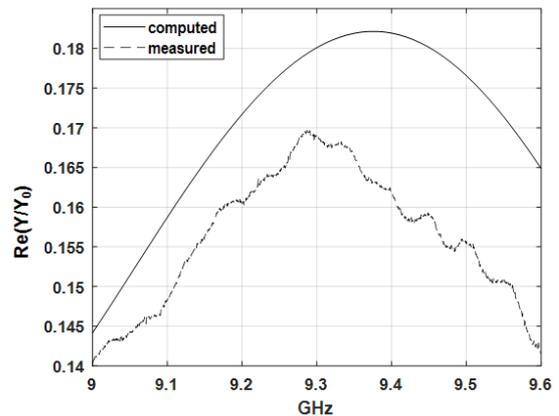


Рис. 7. Зависимость реальной части нормированной комплексной проводимости щели от частоты для $L_{SLOT} = 15.8$ мм.

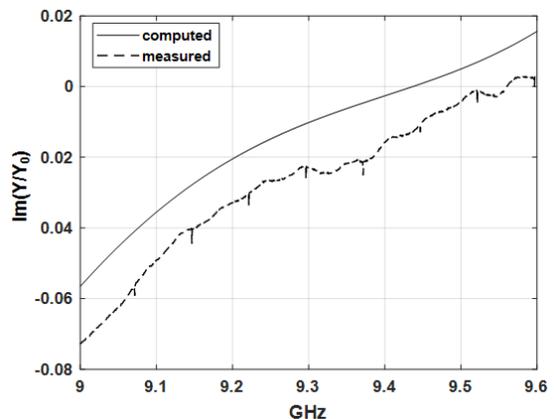


Рис. 8. Зависимость реальной части нормированной комплексной проводимости щели от частоты для $L_{SLOT} = 15.8$ мм.

На рис. 9–11 приведены характеристики направленности исследуемых щелей и распределения электромагнитного поля излучения щели во внешнее пространство и внутрь волновода. Важнейшая характеристика щели как антенны является ее диаграмма направленности (ДН). На рис. 9 представлена 3-D ДН (амплитудное распределение) излучения щели $L_{\text{SLOT}} = 15.8$ мм во внешнее пространство, измеренная АС «ТРИМ» на частоте f_0 . Выбор геометрического размера области планарного сканирования в ближней зоне излучателя для измерения амплитудно-фазового распределения поля равного 60×60 см позволяет с малыми ошибками восстановить слабонаправленную ДН щели в диапазоне углов ± 35 град. в дальней зоне [13, 14]. На рис. 10 приведена круговая ДН в Н-плоскости излучения щели $L_{\text{SLOT}} = 15.8$ мм во внешнее пространство на частоте f_0 . В диапазоне углов ± 35 град. представленные результаты электромагнитного моделирования и данные измерений находятся в удовлетворительном согласии. Ширина ДН щели по результатам измерений составляет 50 град, результат моделирования – 48 град. Симметричная форма ДН с низким уровнем боковых лепестков указывает на симметричное спадающее распределения поля в щели. На рис. 11 представлен результат 3-D (a) и 2-D (b) моделирования электромагнитного поля излучения щели во внешнее и внутреннее пространство волновода, подтверждающий резонансный характер излучения щели.

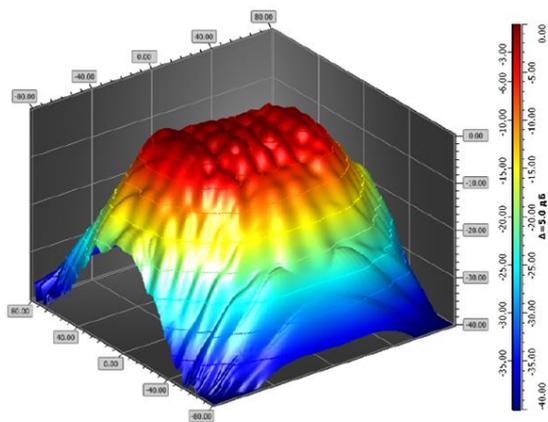


Рис. 9. 3-D диаграмма амплитудного распределения щели $L_{\text{SLOT}} = 15.8$ мм во внешнее пространство измеренная на АС «ТРИМ» на частоте f_0 .

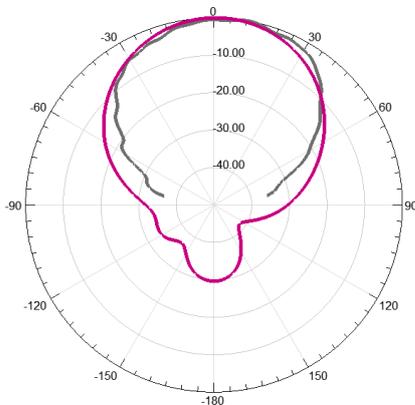


Рис. 10. Круговая диаграмма направленности в Н-плоскости излучения щели $L_{\text{SLOT}} = 15.8$ мм во внешнее пространство на частоте f_0 : красная линия – результат моделирования, черная – данные измерения.

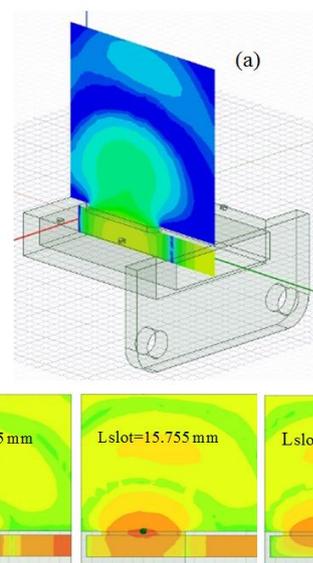


Рис. 11. Результат 3-D (a) и 2-D (b) моделирования электромагнитного поля излучения щели во внешнее и внутреннее пространство волновода.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ зависимости комплексной проводимости продольной щели в широкой стенке прямоугольного волновода от ее длины показал удовлетворительное совпадение с результатами электродинамического моделирования. Измерение диаграммы направленности щели также согласуется с результатами 3-D и 2-D моделирования электромагнитного поля излучения щели во внешнее и внутреннее пространство волновода и показывает резонансный характер комплексной проводимости щели в волноводе, закороченном на конце.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] L. Josefsson, S.R. Rengarajan. Slotted Waveguide Array Antennas Theory, Analysis and Design, The Institution of Engineering and Technology, SciTech Publishing, Herts, SG1 2AY, UK. 2018, Ch. 6, pp. 93-134, Ch. 8, pp. 175-220, Ch. 8, pp. 331-338.
- [2] S.R. Rengarajan, R.E. Hodges. Waveguide-Fed Slot Arrays in Space Application: A Review // 2021 Intern. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications, Honolulu, HI, USA. 2021. DOI: 10.1109/ICEAA52647.2021.9539836.
- [3] M. Zhang, J. Hirokawa, M. Ando. A Four-Corner-Fed Double-Layer Waveguide Slot Array With Low Sidelobes Developed for a 40 GHz-Band DDD System // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2016. vol. 64, № 5. pp. 2005-2010. DOI: 10.1109/TAP.2016.2539375.
- [4] A.D. Gladkikh, S.I. Ivanov, A.P. Lavrov, V.V. Gnezdin. Slotted Waveguide Antenna Array in X-Band With Low Level of Side Lobes // Proc. of 2023 Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech-2023, pp. 99–102 DOI: 10.1109/EExPolytech58658.2023.10318595.
- [5] E. Aparna, G. Ram, G. A. Kumar. Review on Substrate Integrated Waveguide Cavity Backed Slot Antennas // IEEE Access. 2022, vol. 10, pp. 133504-133525. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3231984.
- [6] R.S. Elliott, Antenna Theory and Design. Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall. 1982.
- [7] Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. М.: Радиотехника. 2012. Гл. 2, сс. 140-163.
- [8] T. Latha, G. Ram, G. A. Kumar, M. Chakravarthy. Compact Wideband E-Slotted E-Shaped Patch Antenna for Ku-Band Phased Array Applications // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 2024, pp. 1-11. DOI: 10.1109/TAES.2024.3374275.
- [9] H. Dashti Mohammad, H. Neshati. Input Impedance of Rectangular Substrate Integrated Waveguide (SIW) Cavity Backed Slot Antennas.

- In 25th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). 02-04 May 2017, Tehran, Iran. DOI: 10.1109/IranianCEE.2017.7985316.
- [10] B. N. Das, M. Sinha. The Admittance Characteristics of Longitudinal Shunt Slots in the Broad Face of Rectangular Waveguide // IETE Journal of Research. 1975. Vol. 21, № 1, pp. 32-37. DOI: 10.1080/03772063.1975.11450604.
- [11] David M. Pozar, Microwave engineering, 4th ed. by John Wiley & Sons. 2012, Ch. 2-4, pp. 48-227.
- [12] Комплексы для измерения параметров антенн. https://trimcom.ru/main-page/goods_category/izmer-complex . last accessed 2024/06/29.
- [13] Antenna Measurement Theory. Introduction to Antenna Measurement. Available: [http://keysight.com/upload/cmc_upload/All/ORFR-Theory .pdf](http://keysight.com/upload/cmc_upload/All/ORFR-Theory.pdf). last accessed 2024/06/30.
- [14] Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements (Electromagnetic Waves). 2 nd Ed/ Vol/ 2 / C. Parini [et al.]. London: The Institution of Engineering & Technology, 2021.