

**РАЗРЕЖЕННАЯ ПАТЧ АНТЕННА С ПОМОЩЬЮ АППРОКСИМАЦИИ
ОПТИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ СЕТКОЙ****SPARSE PATCH ANTENNA USING OPTIMAL CURRENT GRID APPROXIMATION****М. Т. Нгуен¹, А. Ф. Алхадж Хасан¹**¹*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия***M. T. Nguyen¹, A. F. Alhaj Hasan¹**¹*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia*

Аннотация. Выполнено моделирование патч-антенны из проводной сетки в различных САПР и проведена верификация результатов при применении подхода аппроксимации оптимальной токовой сеткой для создания разреженной структуры. Полученные результаты в различных САПР сравнивались между собой и с результатами измерений для 3D-печатной патч-антенны из проводной сетки. Результаты сравнения показали, что полученные результаты в TALGAT хорошо согласуются с результатами, полученными в CST и измерений. После применения подхода аппроксимации оптимальной токовой сеткой к исходной структуре получена разреженная структура с меньшими массой, памятью и временем моделирования по сравнению с исходной структурой. Полученные основные характеристики для разреженной и исходной структур сравнивались между собой и демонстрировали хорошую согласованность. Кроме того, полученная разреженная структура патч-антенны имеет форму, которая может быть встроена в различные места без изменения ландшафта окружающей среды.

Ключевые слова: метод моментов, проводная сетка, аппроксимация оптимальной токовой сеткой, патч антенна, система автоматизированного проектирования, 3D-печать.

I. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие мобильные сети пятого поколения (5G) быстро развивались, открывая множество новых возможностей в области беспроводной связи. Появление сетей 5G позволило обеспечить более быстрый и надежный интернет, а также способность стать основой для современных технологических приложений, таких как интернет вещей, автономные автомобили и виртуальная реальность [1]. Для реализации всего потенциала одним из важнейших факторов является разработка антенн для сетей 5G [2, 3].

Антенны занимают важное место в процессе передачи и приема беспроводных сигналов. Для удовлетворения требований сети 5G антенна должна быть способна поддерживать одновременно несколько подключенных устройств. Учитывая популярность интернета вещей и интерактивных приложений с несколькими точками доступа, антенны 5G должны быть способны поддерживать большое количество одновременных подключений без снижения производительности. В сетях 5G используются частоты выше, чем в сетях предыдущих поколений, поэтому антенны должны быть способны работать в высокочастотных диапазонах без снижения производительности передачи данных. Кроме того, оптимизация размера и формы антенны при сохранении ее производительности также является непростой задачей для производителей [4]. Особенно установка антенн в городских средах или ограниченном пространстве приводит к необходимости уменьшения их размеров и массы [5]. Для решения этой задачи одним из подходов, которому уделяется большое внимание, является использование антенн из проводной сетки (ПС) [6, 7]. Они могут быть легко установлены на электрических столбах, окнах зданий или мобильных устройствах, таких как автомобили и автобусы, чтобы одновременно сохранить ландшафт и обеспечить непрерывное сетевое соединение.

Однако использование полной сетки является необязательным и приводит к тому, что масса антенны оказывается существенно неоптимизированной. Для уменьшения массы антенны в [8] был предложен подход к исключению ненужных проводов, получивший название аппроксимации оптимальной токовой сеткой (АОТС). Он позволяет создавать разреженные антенны с меньшей массой, сохраняя при этом необходимые характеристики. Однако данный подход был применен только к типичным антеннам, таким как рупорная,

коническая рупорная и рефлекторная антенны. Поэтому основной целью данной работы является верификация эффективности подхода АОТС для создания разреженной структуры ПС путем применения его к патч антенне из ПС с воздушным диэлектрическим заполнением.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения основной цели данной работы необходимо выполнить следующие задачи:

- провести моделирование патч антенны из ПС в различных САПР и сравнить полученные результаты между собой и с результатами измерений;
- применить подход АОТС к исходной структуре ПС для получения разреженной структуры;
- сравнить полученные основные характеристики для разреженной структуры с результатами исходной структуры ПС;
- провести обсуждение полученных результатов и сделать выводы.

III. ТЕОРИЯ

Согласно описанию в [8] использование АОТС в самом общем случае направлено на создание антенны с разреженной структурой, имеющей меньшую массу, чем исходная структура. Основная идея данного подхода заключается в том, выполняется не использовать провода с малым током, поскольку их вклад в излучение незначителен. Достичь этого возможно путем исключения из сетки тех проводов, нормированный модуль тока которых меньше определенного уровня, который называется допуском удаления элемента сетки (ДУЭС). Для этого сначала необходимо точно вычислить ток по каждому проводу сетки. Для этого одним из широко используемых методов является метод моментов (МоМ). Благодаря простому алгоритму он позволяет точно вычислить распределение тока по каждому проводу сетки при меньшем времени расчета, чем другие методы [7]. Затем по полученным значениям тока необходимо определить максимальное или среднее значение модуля тока в сетке. Далее модуль тока, полученный по каждому проводу, нормируется относительно максимального или среднего значения тока в сетке проводов. Выбор нормирования по среднему или максимальному значению зависит от расположения источника возбуждения. При расположении источника возбуждения отдельно от структуры можно нормировать по максимальному значению тока. Когда источник возбуждения непосредственно подключен к структуре ПС, то провода, непосредственно подключенные к нему, имеют модуль тока значительно больше, чем провода, расположенные на удалении от него. Поэтому необходимо провести нормирование по среднему значению, что позволит получить более конкретные результаты. После нормирования значений модуля тока всех проводов необходимо сравнить их с заданным значением ДУЭС. Выбор значения ДУЭС определяется конкретными требованиями производителя. Провода с нормализованным модулем тока меньше значения ДУЭС сохраняются в отдельном списке и исключаются. Процесс выполняется по всем проводам, в результате получается разреженная структура, содержащая только провода с модулем тока, превышающим значение ДУЭС. Полученная разреженная структура имеет меньшую массу, и затраты на моделирование также значительно уменьшились.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для выполнения поставленных задач в данной работе была выбрана патч антенна из ПС в работе [9]. Она разработана для сетей 5G и работает на частоте 2.6 ГГц ($\lambda=115.4$ мм). Антенна состоит из двух основных частей: сетки патча и сетки плоскости заземления. Их изометрический вид изображен на рис. 1, а их основные геометрические параметры приведены в табл. 1. Сетка патча и сетка заземления размещены в плоскости OXY на расстоянии $h=3$ мм вдоль оси OZ и закреплены диэлектрическими опорами, обеспечивающими механическую поддержку конструкции. Для обеспечения экранирования электромагнитного поля размер ячейки антенны из ПС должен составлять от 0.05λ до 0.1λ (5.77–11.54 мм) [10]. Поэтому сетка заземления разделена на 6 частей вдоль оси OX и 7 частей вдоль оси OY, что соответствует размерам $0.09\lambda \times 0.08\lambda$ (10.73×9.2 мм).

Для моделирования патч-антенны из ПС были использованы известные САПР с различными численными методами, такие как CST [11] с методами конечных разностей во временной области (МКРВО) и конечных элементов (МКЭ), 4NEC2 [12] с методом моментов (МоМ) и треугольными базисными функциями, TALGAT [13] с МоМ и ступенчатыми базисными функциями. Для моделирования в TALGAT и 4NEC2 радиус провода

R_w принят равным половине толщины металлической сетки t и равен 0.5 мм. Для возбуждения антенны провод с разностью потенциалов 1 В размещается вдоль оси OZ и непосредственно соединяет сетку патча с сеткой заземления в точке возбуждения. Он имеет длину h и радиус $r_s=0.46$ мм. Провод возбуждения и все провода сетки представлены одним сегментом. Моделирование антенны с проводимостью $\sigma=5e^5$ См/м в CST подробно описано в [9]. Патч-антенны из ПС, изготовленные с помощью технологии 3D-печати и моделированные в различных САПР, представлены на рис. 2. Для проверки результатов моделирования основные характеристики антенны, полученные в каждой САПР, сравнивались между собой, а также с результатами измерений для изготовленной патч-антенны. Основные характеристики антенны рассмотрены в диапазоне частот 2–3 ГГц, такие как коэффициент отражения ($|S_{11}|$) и максимальный коэффициент усиления (KU_{\max}) с учетом потерь на рассогласование ($1-|S_{11}|^2$) (рис. 3 и 4). В табл. 2 представлено подробное сравнение характеристик антенн, полученных из рис. 3 и 4. Кроме того, диаграммы направленности (ДН) патч-антенны, полученные в различных САПР на частотах 2.5, 2.6, 2.7 ГГц в плоскостях E и H , сравнены между собой и показаны на рис. 5–7 соответственно.

Результаты сравнения демонстрируют, что результаты моделирования патч-антенны в TALGAT хорошо согласуются с измерениями с приемлемым расхождением. Поэтому структура ПС в TALGAT была выбрана в качестве исходной структуры для создания разреженной антенны путем применения подхода АОТС. Общее количество проводов исходной структуры ПС составляет $N=158$ проводов. Распределение тока по проводам в ПС представлено на рис. 8а. В качестве примера подход АОТС при ДУЭС=30% применен на исходной структуре. Разреженная структура, полученная после применения подхода АОТС, приведена на рис. 8б, а её количество оставшихся проводов составляет $N_s=105$ проводов. В результате применения АОТС масса антенны уменьшилась в $(N/N_s)=1.50$ раза, память в $(N/N_s)^2=2.26$ раза, а время на решения СЛАУ (здесь методом Гаусса) в $(N/N_s)^3=3.41$ раза. Для проверки работоспособности разреженной структуры ее основные характеристики сравнивались с характеристиками исходной структуры, такие как $|S_{11}|$ и KU_{\max} с учетом потерь на рассогласование (рис. 9 и 10). Кроме того, диаграммы направленности (ДН) излучения разреженной структуры также сравнивались с диаграммой направленности исходной структуры на частотах 2.5, 2.6, 2.7 ГГц в плоскостях E и H и представлены на рис. 11–13 соответственно. Основные характеристики исходной и разреженной антенн ПС после применения АОТС и их расхождения представлены в табл. 3I, такие как $|S_{11}|$ и KU_{\max} на резонансной частоте и ширина лучи (ШЛ) и коэффициент защитного действия (КЗД) на разных частотах.

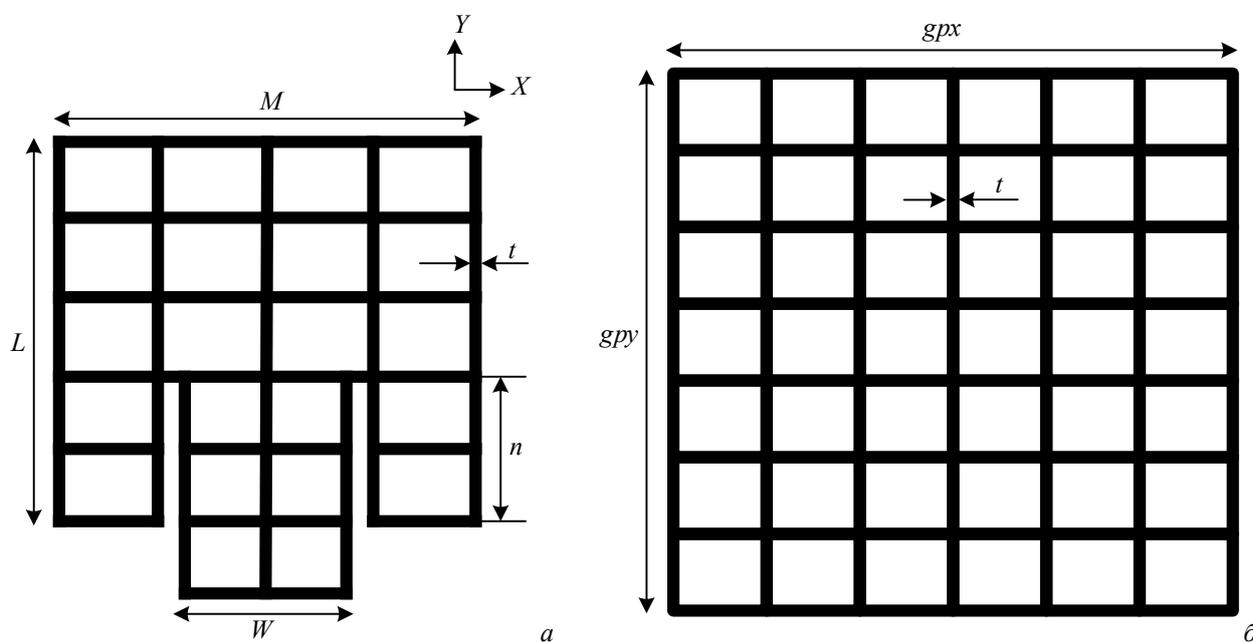


Рис. 1. ПС патча (а) и плоскости заземления (б)

ТАБЛИЦА 1
ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАТЧ-АНТЕННЫ ИЗ ПС

L , мм	M , мм	W , мм	n , мм	t , мм	gpx , мм	gpy , мм
46.2	46.2	15.6	16.3	1	64.4	64.4

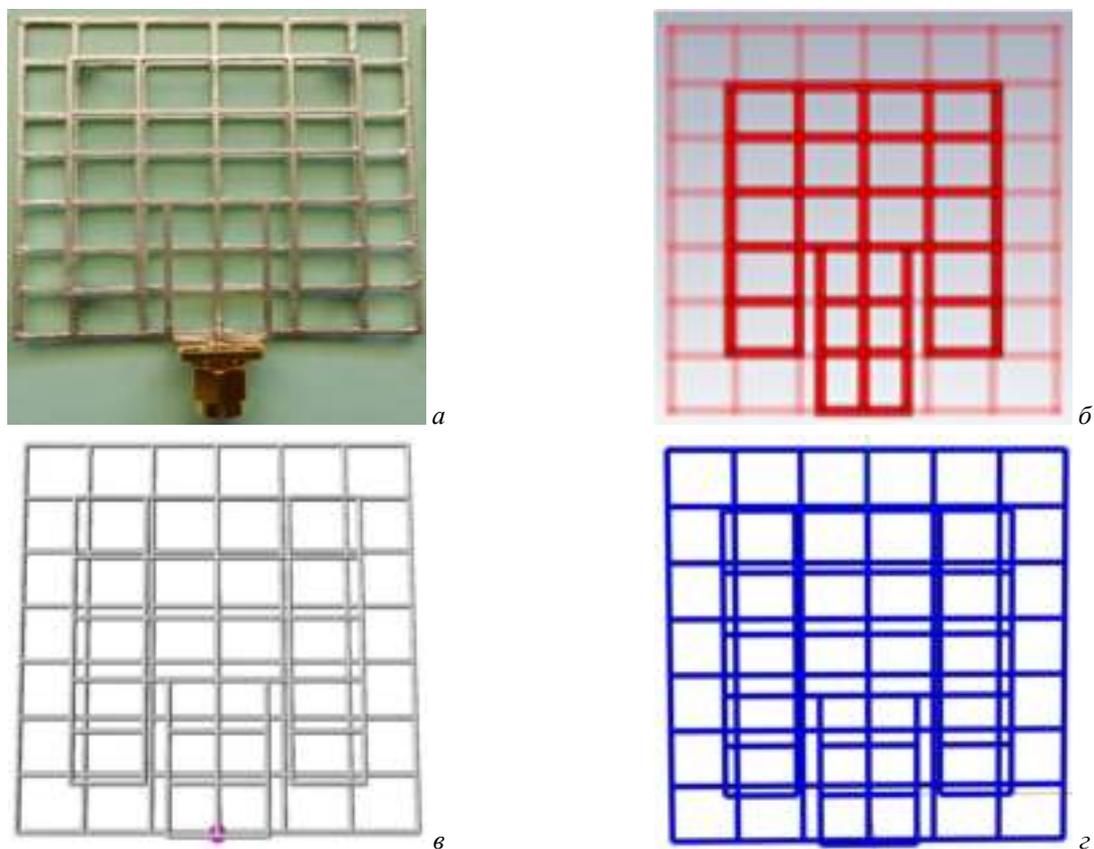


Рис. 2. Патч-антенны из ПС, изготовленные с помощью технологии 3D-печати [9] (а) и моделированные в CST [9] (б), 4NEC2 (в) и TALGAT (г)

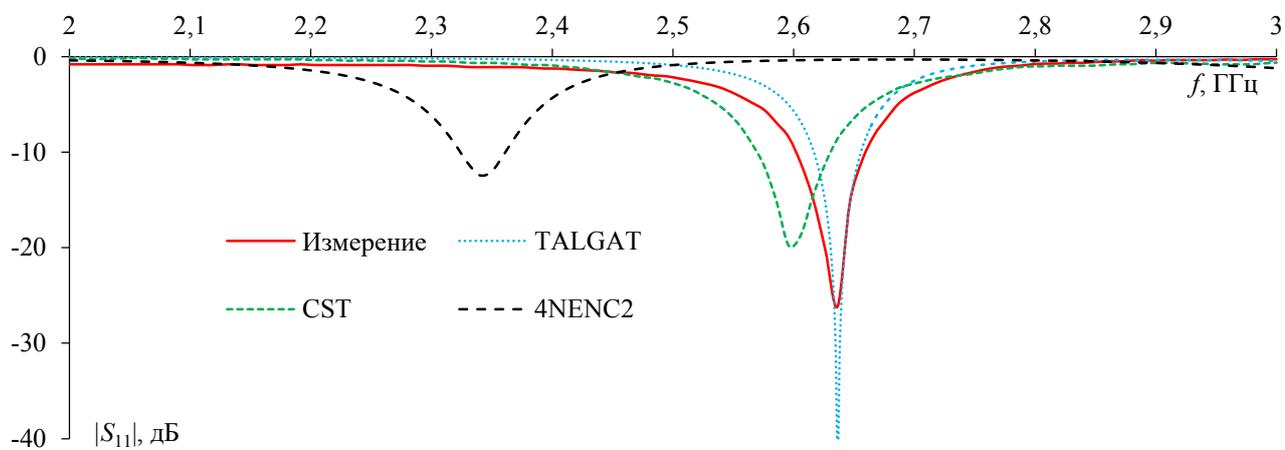


Рис. 3. Частотные зависимости $|S_{11}|$ антенны, полученные измерением [9] и моделированием в CST [9], TALGAT и 4NEC2

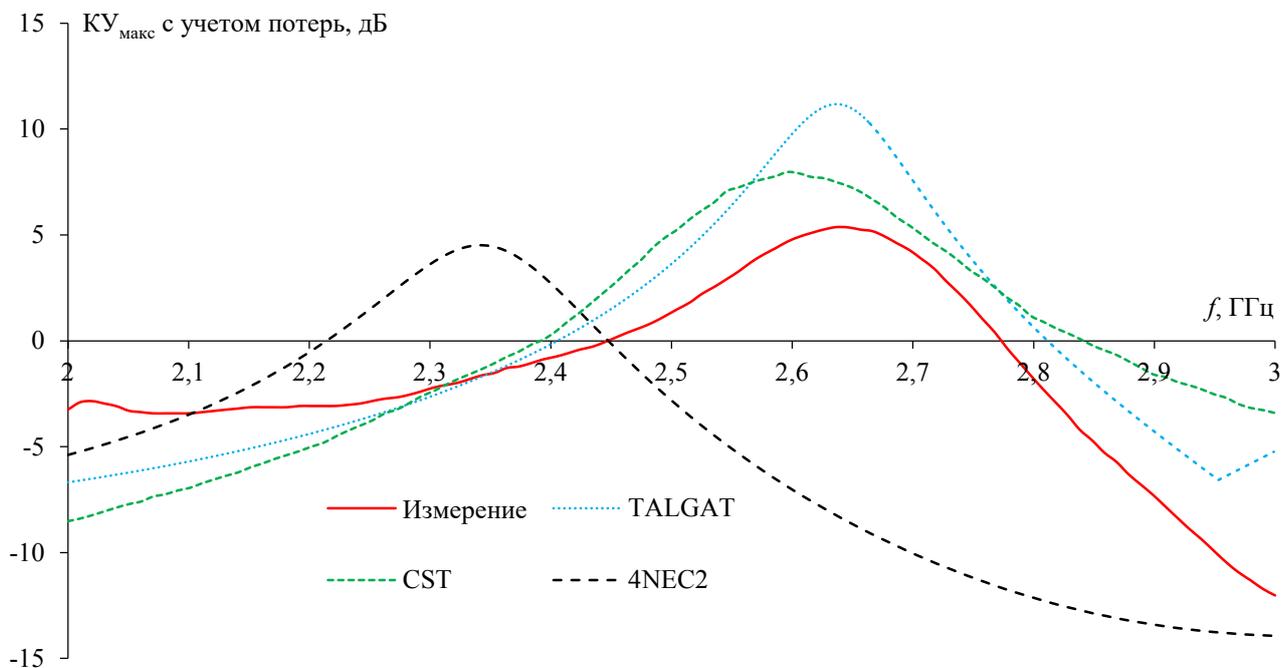


Рис. 4. Частотные зависимости $KU_{\text{макс}}$ антенны с учетом потерь на рассогласование, полученные измерением [9] и моделированием в CST [9], TALGAT и 4NEC2

ТАБЛИЦА 2
СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫ

Источник данных	На резонансной частоте		На частоте 2,6 ГГц		Сдвиг резонансной частоты, МГц	
	$ S_{11} $, дБ	$KU_{\text{макс}}$, дБ	$ S_{11} $, дБ	$KU_{\text{макс}}$, дБ	от резонансной частоты измерения	от частоты 2,6 ГГц
TALGAT	-40.10	11.18	-5.69	9.78	1	37
Измерение [9]	-26.16	5.37	-11.21	4.92	-	36
4NEC2	-12.42	4.51	-0.38	-7.03	296	260
CST [9]	-19.80	7.97	-18.66	7.90	40	4

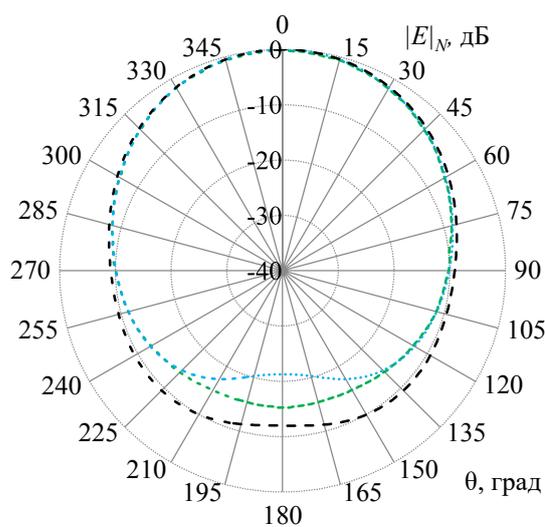
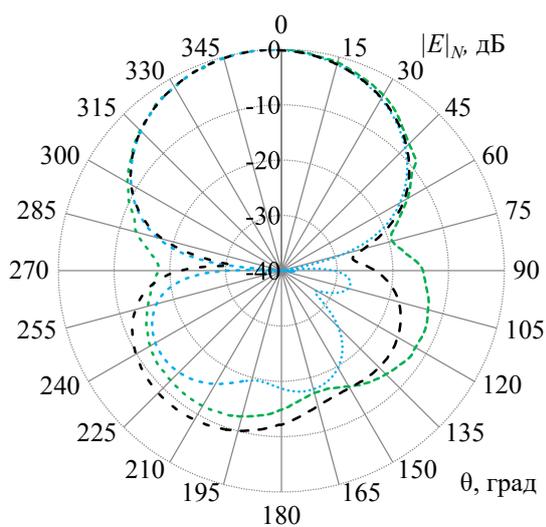
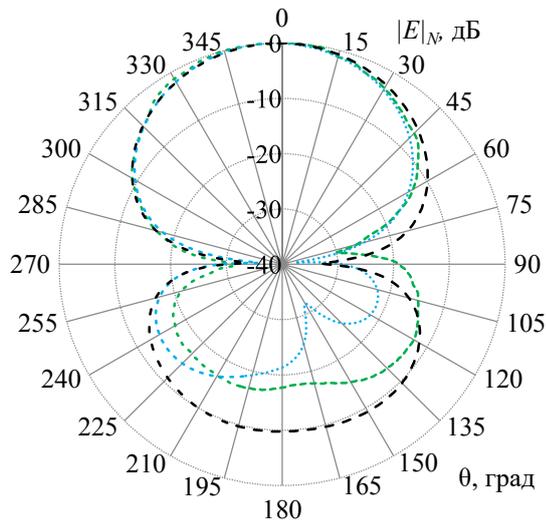
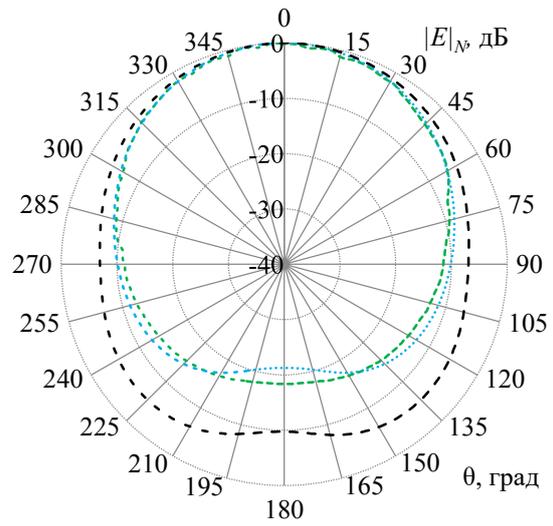


Рис. 5. ДН антенны ПС, полученные в CST [9] (---), TALGAT (····) и 4NEC2 (---) на частоте 2.5 ГГц в E (а) и H (б) плоскостях

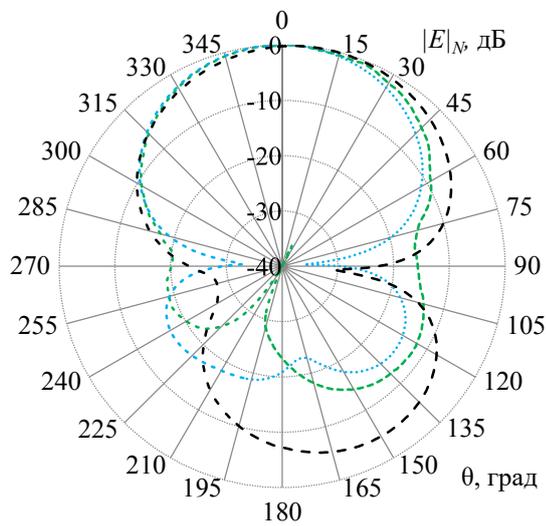


a

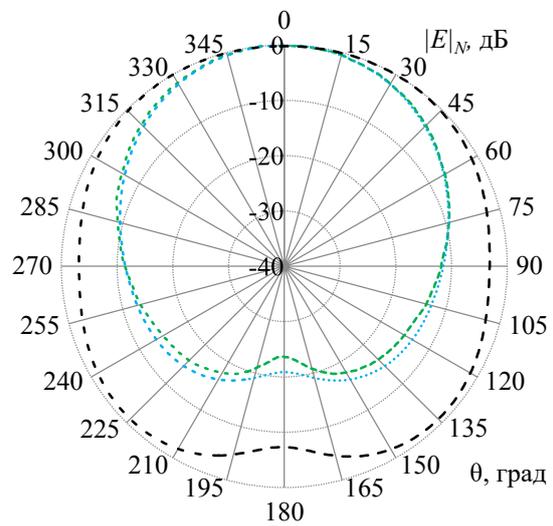


б

Рис. 6. ДН антенны ПС, полученные в CST [9] (---), TALGAT (.....) и 4NEC2 (-.-) на частоте 2.6 ГГц в E (a) и H (б) плоскостях

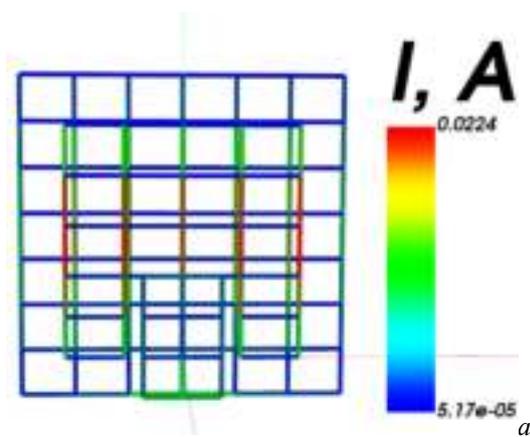


a

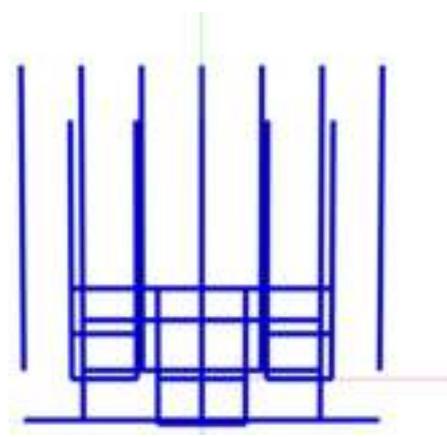


б

Рис. 7. ДН антенны ПС, полученные в CST [9] (---), TALGAT (.....) и 4NEC2 (-.-) на частоте 2.7 ГГц в E (a) и H (б) плоскостях



a



б

Рис. 8. Исходная структура ПС с распределением тока по проводам (a) и разреженная структура, полученная после применения АОТС при ДУЭС=30% (б)

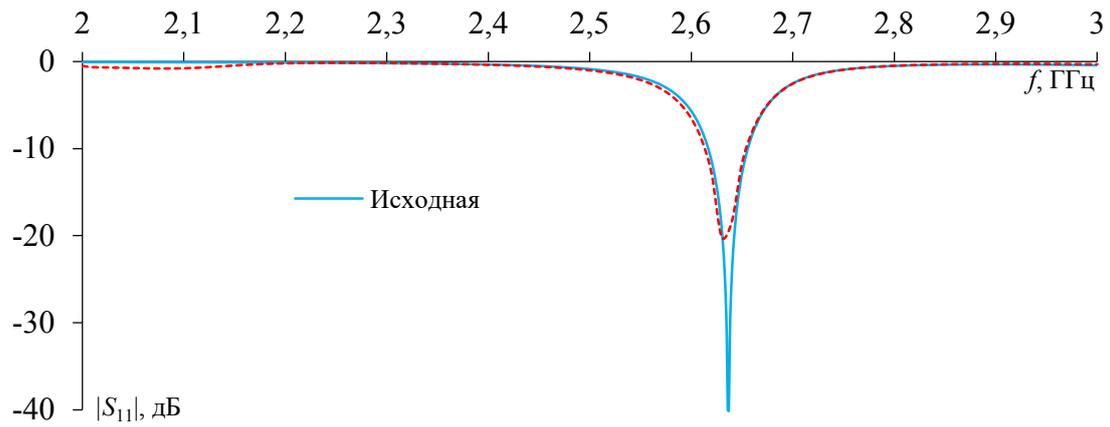


Рис. 9. Полученные $|S_{11}|$ исходной и разреженной антенн ПС после АОТС в диапазоне частот

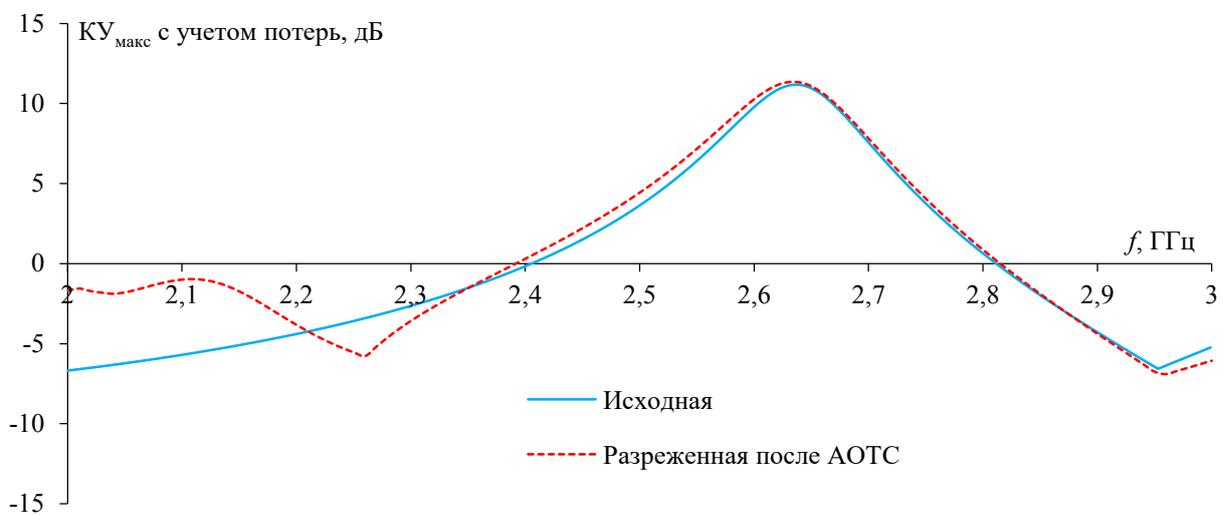


Рис. 10. Полученные KU_{\max} с учетом потерь на рассогласование исходной и разреженной антенн ПС после АОТС в диапазоне частот

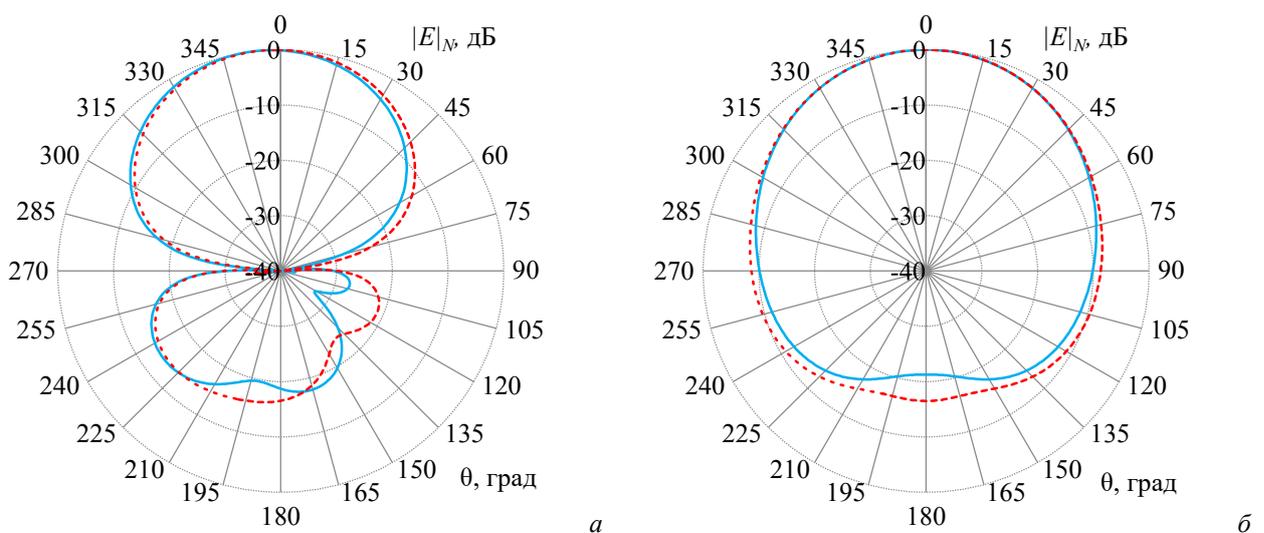
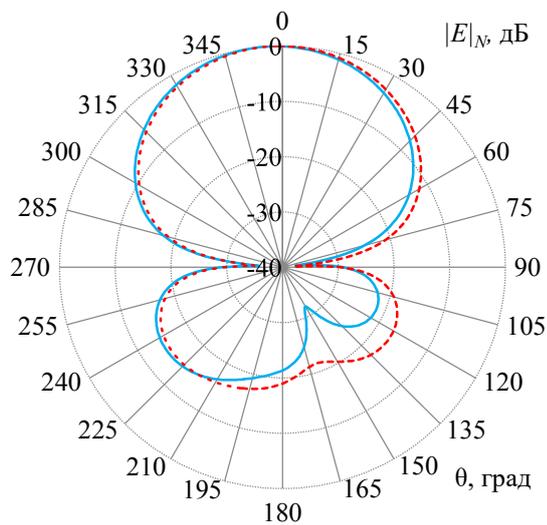
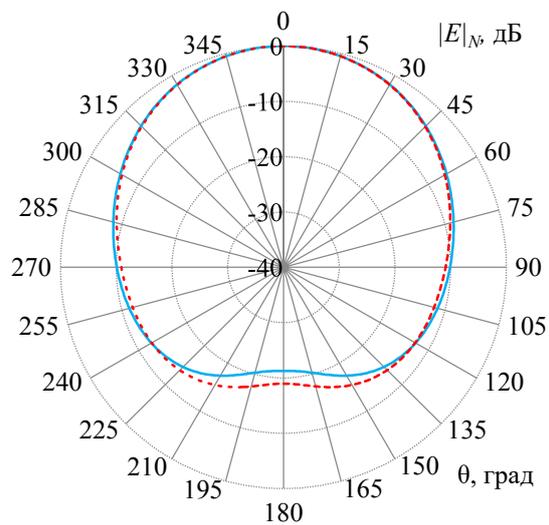


Рис. 11. ДН исходной и разреженной антенн ПС после АОТС на частоте 2.5 ГГц в E (а) и H (б) плоскостях

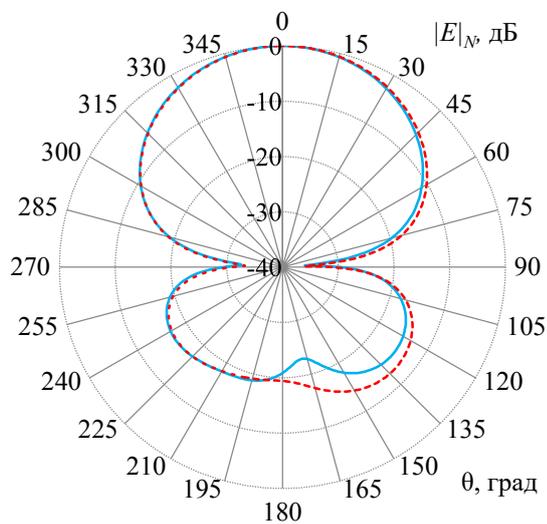


a

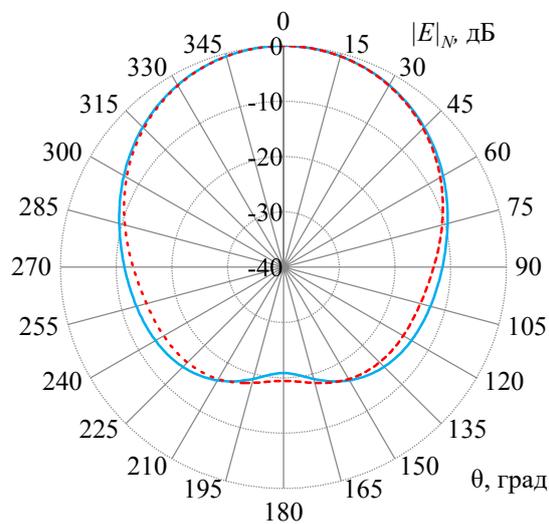


б

Рис. 12. ДН исходной и разреженной антенн ПС после АОТС на частоте 2.6 ГГц в E (a) и H (б) плоскостях



a



б

Рис. 13. ДН исходной и разреженной антенн ПС после АОТС на частоте 2.7 ГГц в E (a) и H (б) плоскостях

ТАБЛИЦА 3
ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСХОДНОЙ И РАЗРЕЖЕННОЙ СТРУКТУР ПАТЧ-АНТЕННЫ

Структура	Частота резонанса, ГГц	На частоте резонанса		На частоте 2.5 ГГц		На частоте 2.6 ГГц		На частоте 2.7 ГГц	
		$ S_{11} $, дБ	$KУ_{\text{макс}}$, дБ	ШЛ (E/H), °	КЗД, дБ	ШЛ (E/H), °	КЗД, дБ	ШЛ (E/H), °	КЗД, дБ
Исходная ПС	2.64	-40.10	11.18	62/80	18.70	62.5/77	21.34	63/73	20.86
Разреженная АОТС	2.63	-20.20	11.34	63/78	16.53	63.5/76	18.97	64.5/71	19.44
Расхождение	-0.01	19.90	0.16	1/-2	-2.17	1/-1	-2.37	1.5/-2	-1.42

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из рис. 3 можно заметить, что полученные результаты в CST демонстрируют рабочую частоту, центрированную на 2.6 ГГц. Результаты измерения и моделирования антенны в TALGAT близки и дают резонанс (на частоте 2,64 ГГц) с небольшим расхождением от рабочей частоты. В 4NEC2 резонанс оказался на частоте

2,34 ГГц и имеет наибольшее расхождение с результатами измерений. На рис. 4 результаты $KU_{\text{макс}}$ демонстрируют небольшое расхождение результатов моделирования в CST и TALGAT с результатами измерения, а более заметное расхождение наблюдается в 4NEC2. Результаты $KU_{\text{макс}}$ при моделировании в CST и TALGAT приемлемы, а их расхождение с измеренными объясняется отличием модели антенны, изготовленной по технологии 3D-печати, от созданной моделированием. По данным в табл. 2 заметно, что большинство лучших результатов (выделены курсивом) были получены при моделировании в TALGAT, а затем в CST.

Результаты сравнения ДН на разных частотах на рис. 5–7 показали, что полученные результаты в TALGAT и CST хорошо согласуются между собой на всех частотах. Полученные ДН в 4NEC2 хорошо согласуются с результатами TALGAT и CST только на частоте 2.5 ГГц, а на частотах 2.6 и 2.7 ГГц имеются большие расхождения, особенно в H плоскости. При рассмотрении заднего направления излучения полученные ДН в TALGAT имеют самые низкие уровни заднего лепестка на всех частотах, далее CST и 4NEC2. Все результаты сравнения демонстрировали работоспособность МоМ с ступенчатыми базисными функциями для моделирования антенн из ПС.

По распределению тока на проводах в сетке на рис. 8а заметно, что они симметричны вдоль оси OY , и провода с большим модулем тока также в основном распределены вдоль оси OY . Поэтому после применения подхода АОТС такие провода еще остались и образуют разреженную структуру, симметричную вдоль оси OY . Кроме того, разреженная структура на рис. 8б демонстрирует, что подход АОТС работает корректно, поскольку были удалены все провода с нормированным модулем тока менее $ДУЭС=30\%$. Основные характеристики исходной и разреженной структуры после АОТС практически не имеют существенных расхождений, таких как резонансная частота, $KU_{\text{макс}}$ и ШЛ. На резонансной частоте полученный $|S_{11}|$ для разреженной структуры немного выше, чем для исходной структуры. Однако это значение приемлемо, так как оно все ещё намного меньше приемлемого уровня ($-20.20 < -10$ дБ).

По полученным ДН на разных частотах на рис. 11–13 можно заметить, что практически не существует значительных расхождений, они наблюдались только под некоторыми определенными углами в задних направлениях излучения. Полученный ШЛ для разреженной структуры немного больше, чем у исходной структуры в плоскости E , но меньше в плоскости H . Кроме того, КЗД разреженной структуры также немного меньше, чем у исходной структуры. Однако такие незначительные расхождения допустимы, поскольку масса разреженной антенны, а также память и время на ее моделирование уменьшились по сравнению с исходной структурой. Кроме того, полученная разреженная структура также позволяет спрятать антенну в городских ландшафтах, таких как рекламные стенды или оконные рамки, сохраняя при этом необходимые характеристики.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе проведено моделирование патч-антенны из ПС в различных САПР и применен подход АОТС для создания разреженной структуры из исходной структуры ПС. Полученные результаты в различных САПР сравнивались между собой и с результатами измерений для 3D-печатной патч-антенны из ПС. Результаты сравнения показали, что полученные результаты в TALGAT хорошо согласуются с результатами в CST и измерений. Кроме того, результаты сравнения также демонстрируют эффективность использования МоМ с ступенчатыми базисными функциями для моделирования антенн из ПС. После применения АОТС к исходной структуре получена разреженная структура с меньшей массой, а также уменьшены память и время для последующего моделирования. Полученная разреженная структура подтвердила работоспособность подхода АОТС за счет исключения всех проводов с нормированными модулями тока меньше $ДУЭС$. Полученные характеристики разреженной структуры хорошо согласуются с характеристиками исходной структуры, расхождение незначительно и приемлемо. Кроме того, разреженная структура немного отличается по форме от исходной, поэтому она также способна вписываться в различные места, не влияя на ландшафт окружающей среды.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2023-0014.

Научный руководитель: профессор, д.т.н. Газизов Тальгат Рашитович, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роевков Д. Н., Плеханов П. А. Мобильные сети поколения 5G: перспективы применения // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 10. С. 2–7. DOI: 10.34649/AT.2020.10.10.001.
2. Гурский С. М., Баев В. А., Дьяков А. В. Анализ и основные технологии стандарта мобильной сети пятого поколения // Современные наукоемкие технологии. 2020. Т. 4, № 2. С. 201–209. DOI: 10.17513/snt.37997.
3. Лукьянчиков А. В., Коцур Е. О., Мединский А. А. Адаптивная антенна для систем 5G // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2021. № 4. С. 106.
4. Бурханова А. Д. Особенности проектирования антенн для базовых станций 5G // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы - 2022 : материалы IX Молодежной международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Казань, 28–30 апреля 2022 года. – Казань: ИП Сагиева А.Р., 2022. С. 52–53.
5. Рогов В. Ю. Тенденции в эволюции антенного хозяйства городов // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 1. С. 44–51. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-1-44-51.
6. Капитонов В. А., Клюев Д. С., Мальцев А. С. [и др.]. Характеристики двухзаходных конических логспиральных антенн с сеточным и киральным рефлекторами // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22, № 4–1. С. 33–43. DOI: 10.18469/1810-3189.2019.22.4.33-43.
7. Алхадж Хасан А. Ф., Нгуен М. Т., Газизов Т. Р. Моделирование антенн методом моментов: аппроксимация поверхности проводниками // Доклады ТУСУР. 2023. Т. 26, № 2. С. 51–71. DOI:10.21293/1818-0442-2023-26-2-51-71.
8. Alhaj Hasan A. F., Nguyen M. T., Kuksenko S. P., Gazizov T. R. Wire-grid and sparse MoM antennas: Past evolution, present implementation, and future possibilities // Symmetry. 2023. Vol. 15, no. 2. P. 378. DOI: 10.3390/sym15020378.
9. Inclán-Sánchez L. Performance evaluation of a low-cost semitransparent 3D-printed mesh patch antenna for urban communication applications // Electronics. 2024. Vol. 13, no. 1. P. 153. DOI: 10.3390/electronics13010153
10. Kang S. H., Jung C. W. Transparent patch antenna using metal mesh // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66, no. 4. P. 2095–2100. DOI: 10.1109/TAP.2018.2804622
11. CST Studio Suite. URL: <https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/simulia/produkty/cst-studio-suite/> (дата обращения: 15.03.2024)
12. NEC based antenna modeler and optimizer. URL: <https://www.qsl.net/4nec2/> (дата обращения: 15.03.2024)
13. Куксенко С. П., Газизов Т. Р., Квасников А. А. [и др.]. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУРе // Наноиндустрия. 2023. Т. 16, № S9–1(119). С. 170–178. DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.170.178.