

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ
АНТЕННЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПОЛЯ В ДАЛЬНОЙ И БЛИЖНЕЙ ЗОНАХ**

Руководство к лабораторной работе
для студентов технических направлений подготовки и специальностей

Томск
2024

УДК 53.17 + 53.08
ББК 22.3
Ж43.2

Авторы:

Е. С. Жечев, В. А. Трубченинов, А. В. Фатеев

Жечев Евгений Сергеевич

Исследование диаграммы направленности параболической антенны по измерениям поля в дальней и ближней зонах / Е. С. Жечев, В. А. Трубченинов, А. В. Фатеев — Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 13 с.

В руководстве содержится методический материал по исследованию диаграммы направленности параболической антенны по измерениям поля в дальней и ближней зонах. Представлен теоретический материал по изучению методики измерения диаграммы направленности параболической антенны в дальней и ближней зонах.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим направлениям подготовки и специальностям.

Одобрено на заседании каф. СВЧиКР, протокол №4 от 20.11.2023

УДК 53.17 + 53.08

ББК 22.3

© Жечев Е. С., Трубченинов В. А.,
Фатеев А. В. 2024

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ.....	6
1.1 Измерение ДН в дальней и ближней зонах.....	6
1.2 Измерение поляризационной диаграммы.....	7
1.3 Описание экспериментальной установки.....	8
2 Содержание работы.....	9
2.1 Расчетное задание.....	9
2.2 Требования к оформлению отчёта.....	10
3 Контрольные вопросы.....	12
Список литературы.....	13

ВВЕДЕНИЕ

Зеркальные антенны являются широко распространённым типом антенн в диапазоне СВЧ. Это объясняется относительной простотой их конструкции, возможностью получения высокой направленности излучения, возможностью сканирования луча в пространстве, наличием у них иных, ценных для практического использования свойств. Наибольшее распространение получили металлические зеркала с параболической формой поверхности (параболоид вращения, параболический цилиндр); однако широкое применение находят и зеркала другой формы.

Основными элементами параболической антенны являются зеркало и облучатель, фазовый центр которого совмещён с фокусом параболического зеркала. При работе антенны в режиме передачи излученная облучателем волна распространяется в сторону зеркала. Достигнув его, она возбуждает на поверхности зеркала высокочастотные токи, которые в окружающем пространстве создают электромагнитное поле. Если фазовый центр облучателя совмещён с фокусом зеркала, отражённая от зеркала волна в раскрыве антенны формирует плоский синфазный фронт, обеспечивающий наиболее узкую диаграмму направленности.

По отношению к точке приёма, находящейся в дальней зоне, любая антенна является источником поперечной сферической волны, амплитуда напряжённости поля которой убывает обратно пропорционально расстоянию, а фазовый фронт волны при увеличении расстояния стремится к плоскому. Если принять, что максимальное отклонение сферического фазового фронта от плоского составляет $\pi/8$, то расстояние до дальней зоны равно

$$R_{\min} = 2 \frac{D^2}{\lambda}$$

где D – диаметр парабоида, λ – длина волны. Для более грубой оценки, например с фазовой погрешностью, равной $\pi/4$, в формуле вместо коэффициента 2 будет стоять 1.

Деление пространства, окружающего антенну, на дальнюю и ближнюю зоны или области в значительной степени условно. В дальней зоне лучи, идущие из разных точек антенны в точку наблюдения, приближённо можно считать параллельными. Это облегчает вычисление таких параметров антенны, как диаграмма направленности, коэффициент усиления и других. Электромагнитное поле передающей антенны в дальней зоне представляет поперечную сферическую волну. В ближней зоне, где лучи не параллельны, поля E и H имеют сложную структуру и зависимость от поперечных и продольной координат. Между ближней и дальней зонами выделяют промежуточную область (зона Френеля).

Диаграммой направленности (ДН) передающей антенны называется зависимость напряжённости электрического поля от угловых координат точки наблюдения при постоянном расстоянии до неё от точки источника. При этом предполагается, что точка наблюдения находится в дальней зоне, на расстоянии

$R \geq R_{\min}$. Диаграмма направленности приёмной антенны – это зависимость ЭДС, возникающей в приёмной антенне, от направления прихода волны. В общей теории антенн доказывается, что диаграммы антенн, работающих на передачу и на приём, совпадают. Это означает, что ДН антенны не зависит от режима, в котором она используется (передача или приём).

Если фазовый центр облучателя вынести из фокуса параболического зеркала или если точку приёма расположить на расстоянии $R < R_{\min}$ (в ближней или промежуточной зоне), то в раскрыве антенны поле становится несинфазным, возникают фазовые ошибки, которые приводят к искажению формы ДН, зависимости её от расстояния и уменьшению напряжённости поля в точке приёма. Поэтому ДН антенны измеряют в дальней зоне, а фазовый центр облучателя располагают в фокусе зеркала.

Однако в ряде случаев бывает невозможно или неудобно проводить измерения в дальней зоне (лабораторные исследования параметров антенн в условиях ограниченного пространства; остронаправленные радиоастрономические антенны, для которых дальняя зона находится в космическом пространстве). В этом случае можно измерить ДН антенны в ближней зоне, т.е. на расстояниях $R < R_{\min}$, но при этом следует вынести облучатель из фокуса вдоль оси зеркала на некоторую величину Δz и такую, чтобы фазовые ошибки за счёт расположения передающей и приёмной антенн в ближней зоне скомпенсировались фазовыми ошибками в раскрыве за счёт выноса фазового центра облучателя из фокуса. Результирующая ДН антенны при этом должна получаться такой же, какой она была бы, если бы фазовый центр облучателя находился в фокусе, а приёмная антенна – в дальней зоне. Лабораторная работа посвящена проверке этого факта, а также изучению методики измерения диаграммы направленности параболической антенны в дальней и ближней зонах.

Целью лабораторной работы является измерение диаграмм направленности параболической антенны в ближней и дальней зонах и измерение поляризационной диаграммы антенны (дальняя зона).

В постановке лабораторной работы принимали участие следующие сотрудники кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники: Замотринский В.А., Никифоров А.Н., Гошин Г.Г.

1 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

1.1 Измерение ДН в дальней и ближней зонах

Для исследования ДН параболической антенны в дальней зоне передающая параболическая антенна устанавливается на расстоянии $R \geq R_{min}$ от приёмной рупорной антенны. Фазовый центр облучателя параболической антенны устанавливается в фокусе зеркала, имеющего фокусное расстояние $f = 22$ см. Схема параболической антенны изображена на рисунке 1.1.

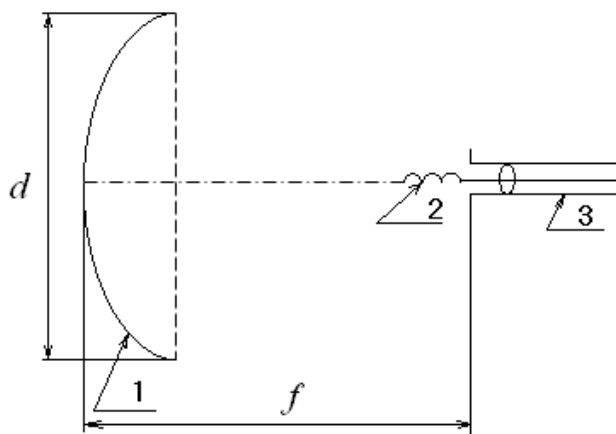


Рисунок 1.1 – Схема параболической антенны: 1– параболическое зеркало, 2 – облучатель (спиральная антенна), 3 – коаксиальный фидер

Ход лучей в параболической антенне при облучателе, находящемся в фокусе зеркала, изображён на рисунке 1.2.

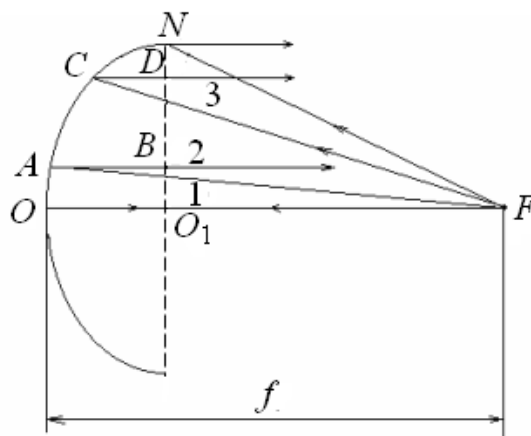


Рисунок 1.2 – Ход лучей в параболической антенне (фазовый центр облучателя совмещён с фокусом зеркала)

Известно свойство параболы: $FO + OO_1 = FA + AB = FC + CD = FN$. Следовательно, время, затрачиваемое лучами 1, 2, 3 на прохождение пути от фокуса до поверхности зеркала и от поверхности зеркала до его раскрыва, должно быть одинаково для всех лучей. Поэтому и фазы всех лучей в раскрыве будут одинаковы. Таким образом, когда фазовый центр облучателя совмещён с фокусом зеркала параболической антенны, поле в её раскрыве синфазно. А из общей теории антенн известно, что синфазный раскрыв формирует наиболее узкую ДН.

Процедура измерения или снятия ДН заключается в том, что передающую параболическую антенну поворачивают вокруг вертикальной оси, фиксируя угол поворота, и определяют коэффициент передачи между приёмной и передающей

антеннами, пропорциональный уровню сигнала, принятого антенной с разных направлений. График полученной таким образом зависимости и есть ДН антенны.

В случае измерения ДН в ближней зоне параболическая антенна устанавливается от рупорной на расстоянии R_{opt} меньше R_{min} , а её облучатель выносится из фокуса вдоль оси зеркала на расстояние (рисунок 1.3). Фазовая компенсация в раскрыве антенны достигается при выполнении соотношения:

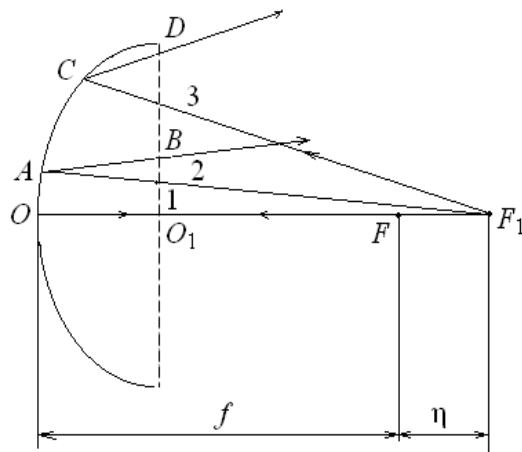


Рисунок 1.3 – Ход лучей в параболической антенне при вынесенном из фокуса облучателя

$$R_{opt} = \frac{1}{\eta} \cdot (f + D^2 / 64f)^2 + f$$

где R_{opt} – расстояние между передающей и приёмной антеннами; η – величина выноса фазового центра облучателя; f – фокусное расстояние; d – диаметр зеркала.

Поворачивая параболическую антенну вокруг оси, определяют величину сигналов, принятых антенной с разных направлений. Полученная таким образом ДН должна совпадать с ДН, снятой в дальней зоне без выноса облучателя. Следует отметить, что экспериментально снимаемые ДН – это ДН по амплитуде.

1.2 Измерение поляризационной диаграммы

Вид поляризации излучаемого или принимаемого антенной поля определяется ориентацией вектора электрического поля в пространстве. Если вектор электрического поля колеблется в плоскости, проходящей через направление распространения волны, то такое поле называется линейно поляризованным. Если конец вектора электрического поля за один период колебания описывает эллипс в плоскости, нормальной направлению распространения волны, то такое поле называют эллиптически поляризованным. Частным случаем поля с эллиптической поляризацией является поле с круговой поляризацией. Поляризационные свойства антенны характеризуются эллипсом поляризации (рис. 4).

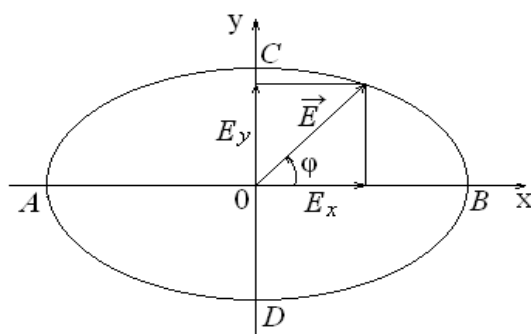


Рисунок 1.4 – Эллипс поляризации

При любой ориентации вектора \vec{E} в декартовой системе координат его можно разложить на вертикальную и горизонтальную составляющие

$$\vec{E} = \vec{i} \cdot E_x + \vec{j} \cdot E_y.$$

Эллипс поляризации описывает соотношение между компонентами E_x и E_y поля антенны при различных ориентациях антенны. Эллипс поляризации характеризуется коэффициентом эллиптичности:

$$\frac{E_y}{E_x} = \sqrt{\frac{1 + m^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}{m^2 + \operatorname{tg}^2 \varphi}},$$

где $m=AB/CD$ отношение полуосей эллипса поляризации, φ – угол между осью x и вектором E .

1.3 Описание экспериментальной установки

Структурная схема экспериментальной установки изображена на рис. 5.

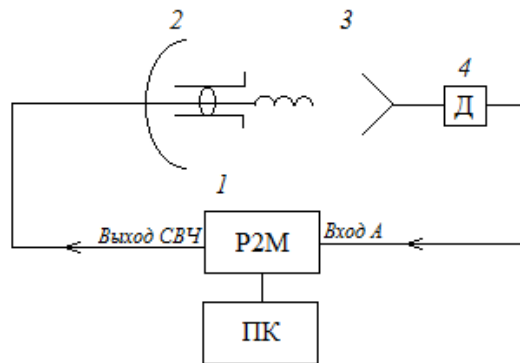


Рисунок 1.5 – Структурная схема экспериментальной установки: 1 – измеритель коэффициента передачи Р2М-18, 2 – передающая параболическая антенна, 3 – рупорная антенна; 4 – детектор

Генератор, находящийся внутри измерителя коэффициента передачи Р2М-18, формирует сигнал, который подаётся на передающую параболическую антенну и излучается ею. Рупорная антенна, принимает излучённый сигнал. Затем сигнал по прямоугольному волноводу поступает на детектор. Продетектированный сигнал по коаксиальному кабелю поступает на приёмник измерителя коэффициента передачи Р2М-18. В качестве облучателя в данной конструкции используется цилиндрическая спиральная антенна, закрытая прозрачным для радиоволн обтекателем из пенопласта.

Измеритель модуля коэффициента передачи Р2М-18 работает под управлением внешнего ПК с установленным программным обеспечением Graphit Р2М, который проводит обработку измеренных данных и обеспечивает отображение измеренных амплитуд в децибелах.

2 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

2.1 Расчетное задание

1. Вычислить ДН параболической антенны по формуле

$$F(\theta) = \frac{2J_1(kr \cdot \sin \theta)}{kr \cdot \sin \theta},$$

где $J_1(kr \sin \theta)$ – функция Бесселя; $k=2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны; $r=20$ см – радиус зеркала; θ – угол между нормалью к раскрыву и направлением на точку пространства, где определяется поле.

Формула (4) предполагает равномерное распределение не только фазы, но и амплитуды поля по раскрыву зеркала. В действительности амплитуда поля спадает к краю зеркала, что приводит к расширению ДН. Поэтому формула дает более узкую ДН.

3. Оценить ширину ДН.
4. Вычислить по формуле (1) радиус дальней зоны R_{min} .
5. Вычислить по формуле (2) оптимальное расстояние R_{opt} , при котором происходит компенсация фазовых ошибок в раскрыве зеркала для случая выноса облучателя из фокуса на расстояние $\eta=3$ см.

Порядок выполнения работы

1. Собрать установку для измерения.
2. Включить ПК.
3. Включить измеритель коэффициента передачи P2M-18, установив переключатель ВКЛ на панели измерителя в положение «I» на панели прибора.
4. Выдержать измеритель в течение времени установления рабочего режима.
5. Для старта ПО Graphit, нажать «Пуск\Программы\Микран\Graphit P2M 2.2rc3 \Graphit P2M».

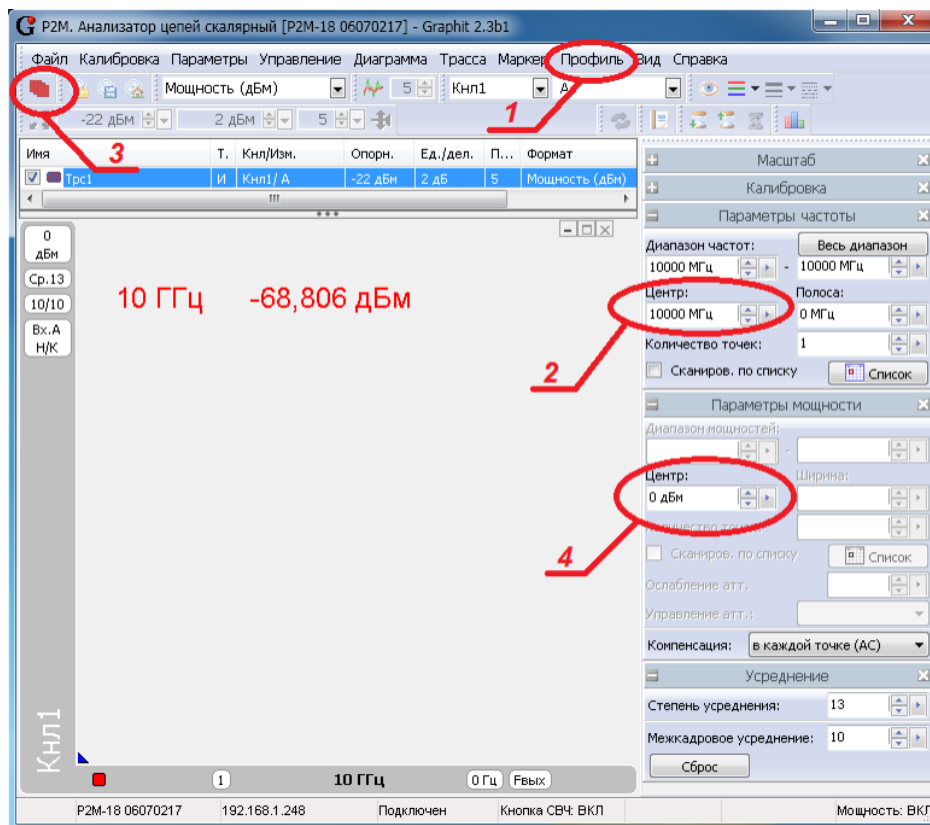


Рисунок 2.1 – Окно программы Graphit

6. Подключиться к прибору с IP 192.168.1.248.

7. Загрузить профиль «РПА.gpr» (см. рис. 6 №1).
8. Задать частоту, на которой будет проводиться эксперимент в поле «центральная частота» (см. рис.6 №2). Для подтверждения изменения параметра необходимо нажать клавишу «Enter».
9. Запустить измерения (см. рис. 6 №3).
10. Установить передающую антенну на расстоянии, равном или большем R_{min} .
11. Для стабильности измеряемой величины модуля коэффициента передачи можно увеличить значение параметра мощности выходного сигнала до 15 дБм.
12. Совместить с фокусом зеркала фазовый центр облучателя ($f=22$ см) при этом оси передающей и приёмной антенн должны находиться на одной прямой. Контроль проводить визуально и по максимальному значению коэффициента передачи.
13. Снять ДН параболической антенны в дальней зоне при вертикальной и горизонтальной поляризациях передающей антенны. Диаграммы направленности снимать через 1° в пределах главного и одного бокового лепестков. Вид поляризации определяется ориентацией рупорной антенны. Вертикальной поляризации соответствует горизонтальное положение широкой стенки раскрыва рупора.
14. Сместить облучатель из фокуса вдоль оси зеркала на расстояние $\eta = 3$ см и снять ДН параболической антенны в дальней зоне при вертикальной поляризации облучателя. Убедиться в искажении ДН при смещении облучателя из фокуса.
15. Совместить с фокусом зеркала фазовый центр облучателя и повернуть облучатель на угол не более 10° от оси зеркала. Снять ДН для вертикальной поляризации. Обратит внимание на положение максимума излучения.
16. Поставить облучатель параболической антенны в фокус и, вращая вокруг горизонтальной оси приёмную рупорную антенну, снять поляризационную диаграмму параболической антенны. Измерения проводить через 20° , антенну поворачивать сначала в одну сторону до 180° , затем в другую.
17. Установить передающую рупорную антенну на расстоянии R_{opt} и снять ДН параболической антенны для вертикальной поляризации при облучателе, находящимся в фокусе. Убедиться в искажении в этом случае ДН при снятии её в ближней зоне.
18. Сместить облучатель параболической антенны из фокуса на расстояние $\eta=3$ см и снять ДН. При этом рупорная антенна должна находиться на расстоянии R_{opt} . Снять ДН при вертикальной поляризации и сравнить с диаграммой, снятой в дальней зоне, когда облучатель находился в фокусе зеркала.
19. Выключить прибор, т.е. остановив процесс измерений, закрыв программное обеспечение Graphit P4M и установив переключатель ВКЛ на панели измерителя в положение «О».
20. Экспериментально снятые ДН на вертикальной поляризации для параболической антенны, измеренной в дальней зоне с облучателем, находящимся в фокусе, и в ближней зоне с вынесенным облучателем из фокуса вдоль оси зеркала на расстояние $\eta=3$ см сравнить с расчётной ДН. Обработка экспериментальных ДН сводится к двум действиям: переводу измеренных значений из децибелов в разы и нормировке. При нормировке все показания для данной диаграммы делятся на их максимальное значение. В результате максимумы всех диаграмм становятся равными 1. Это облегчает сравнение экспериментальных ДН между собой и с расчётными.

2.2 Требования к оформлению отчёта

1. Отчёт должен быть оформлен в соответствии с общими требованиями и правилами оформления отчётов по лабораторным работам, принятыми в ТУСУРе.
2. В отчёте должна быть изложена цель работы, методика измерений и краткое описание экспериментальной установки.

3. Отчёт должен содержать таблицы измерений, расчётные и экспериментально снятые ДН в декартовой системе координат с указанием ширины ДН, поляризационную диаграмму в полярной системе координат, определение вида поляризации антенны, коэффициента эллиптичности и угла наклона эллипса поляризации.

4. В отчёте должны быть представлены выводы по существу проделанной работы.

3 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое дальняя зона?
2. Как снимается ДН в дальней зоне?
3. В чём заключается методика определения ДН по измерениям в ближней зоне?
4. Почему возникает необходимость измерения ДН антенн в ближней зоне?
5. Как и почему изменится ДН при смещении облучателя из фокуса *a*) вдоль фокальной оси, *б*) поперёк фокальной оси?
6. Что такое эллипс поляризации и поляризационная диаграмма антенны?
7. Чем определяется тип поляризации параболической антенны: зеркалом или облучателем?
8. Какой вид имела бы измеренная поляризационная диаграмма, если поляризация параболической антенны была бы линейная?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для вузов/ Д.И. Воскресенский и др. – М.: Радиотехника, 2006. – 375с.
2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 432с.
3. Ерохин Г.А. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 491с.
4. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Ред. Н.М. Цейтлин. – М.: Радио и связь, 1985. – 368с.
5. Антенны: Учебное пособие / Гошин Г.Г. – Томск: ТУСУР, 2012. – 145с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/2794> (дата обращения 15.11.2023).
6. ОС ТУСУР 01-2013 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.tusur.ru/export/sites/ru.tusur.new/ru/education/documents/inside/tech_01-2013_new.pdf (дата обращения 15.11.2023).