

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи
(РСС)

С. А. Подлиннов, А. В. Фатеев, Г. Г. Гошин

ИЗМЕРЕНИЕ ε И $\operatorname{tg}\delta$ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ РЕЗОНАТОРНЫМ МЕТОДОМ

Руководство к лабораторной работе
для студентов технических направлений подготовки и специальностей

Томск
2024

УДК 621.372.22
ББК 32.843
П 44

Рецензент:

Убайчин А. В., доцент кафедры радиоэлектроники
и систем связи ТУСУР, канд.техн. наук

Подлиннов С. А., Фатеев А. В., Гошин Г.Г.

П 44 Измерение ε и $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрических материалов резонаторным методом: Руководство к лабораторной работе. — Томск: Томский гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. — 14 с.

В руководстве содержится методический материал по измерению ε и $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрических материалов резонаторным методом. Отмечаются основные теоретические положения, расчётные формулы, математическую модель эксперимента, входной и выходной тестовый контроль, схемы лабораторных столов и порядок проведения эксперимента, шаблон отчёта, особенности работы программы управления прибором, порядок работы с прибором.

Одобрено протоколом на заседании кафедры протокол № 8 от 16.05.2024 г.

УДК 621.372.22

ББК 32.843

© Подлиннов С. А., 2024

© Фатеев А. В., 2024

© **Гошин Г.Г.**, 2024

© Томский гос. ун-т систем управления
и радиоэлектроники, 2024

Содержание

Введение	4
1. Краткие теоретические сведения.....	4
1.1. Структура поля в цилиндрическом объёмном резонаторе	4
1.2. Основные параметры объёмного резонатора	6
1.3. Расчёт диэлектрической проницаемости и потерь в диэлектрике	8
2. Домашнее задание.....	10
3. Экспериментальная часть.....	11
3.1 Описание установки и методики измерений.....	11
3.2 Порядок выполнения работы	11
3.3 Требования к оформлению отчёта	13
Список литературы	14

Введение

Целью лабораторной работы является:

- ознакомление с некоторыми вопросами теории объёмных цилиндрических резонаторов;
- расчёт основных параметров цилиндрического резонатора для колебаний типа E и типа H , возбуждаемых в резонаторе;
- изучение методики измерений, основанной на методе малых возмущений, применительно к цилиндрическому резонатору;
- проведение измерений образцов различных диэлектрических материалов.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Структура поля в цилиндрическом объёмном резонаторе

В радиотехнике сверхвысоких частот в качестве колебательных систем используются замкнутые металлические объёмы, называемые объёмными резонаторами. Замкнутый объём образован стенками волновода и короткозамыкающими металлическими пластинами на его торцах (рис. 1). В лабораторной работе используется цилиндрический объёмный резонатор с возбуждением посредством петли.

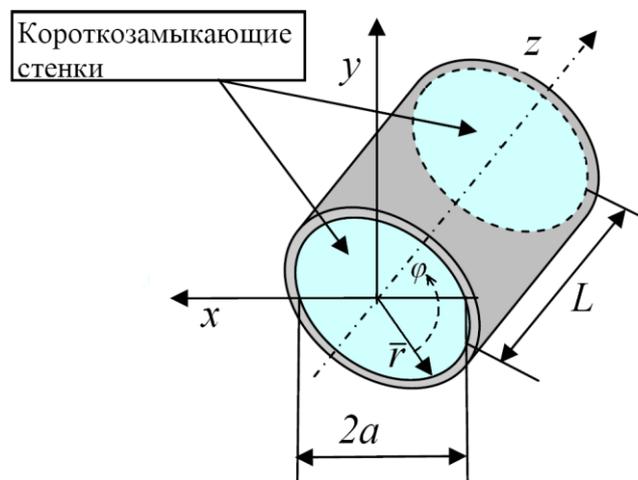


Рисунок 1 – Цилиндрический объёмный резонатор

Одним из основных отличий объёмного резонатора от колебательного контура с сосредоточенными параметрами является его многомодовость. Объясняется это тем, что в резонаторе, как и в волноводе, могут возбуждаться продольные магнитные и продольные электрические типы колебаний (моды), но в отличие от волноводов, кроме вариаций полей по поперечным координатам φ и r имеются вариации и по оси z , совпадающей с осью резонатора (рис. 1). Каждый тип колебания характеризуется собственной структурой поля и собственной резонансной частотой f_0 . Под структурой понимают распределение и форму электрических и магнитных силовых линий в резонаторе в фиксированный момент времени. Структуру поля можно построить, пользуясь выражениями для компонент векторов \vec{E} и \vec{H} , полученными путем решений уравнений Максвелла в цилиндрической системе координат для короткозамкнутого с двух торцов отрезка круглого волновода.

Выражения, определяющие структуру поля колебаний H_{mnp} и E_{mnp} в цилиндрическом объёмном резонаторе, имеют следующий вид [1]:

колебания H_{mnp}

$$\begin{aligned}
 E_r &= \frac{j\omega_0\mu_0}{r} mD \cdot J_m\left(\frac{\mu_{mn} \cdot r}{a}\right) \sin(m\varphi) \sin\left(\frac{\pi pz}{L}\right); \\
 E_\varphi &= j\omega_0\mu_0 \frac{\mu_{mn}}{a} D \cdot J'_m\left(\frac{\mu_{mn} \cdot r}{a}\right) \cos(m\varphi) \sin\left(\frac{\pi pz}{L}\right); \\
 E_z &= 0; \\
 H_r &= \frac{\mu_{mn}}{a} \frac{\pi p}{L} D \cdot J'_m\left(\frac{\mu_{mn} \cdot r}{a}\right) \cos(m\varphi) \cos\left(\frac{\pi pz}{L}\right); \\
 H_\varphi &= -\frac{1}{r} \frac{m\pi p}{L} D \cdot J_m\left(\frac{\mu_{mn} \cdot r}{a}\right) \sin(m\varphi) \cos\left(\frac{\pi pz}{L}\right); \\
 H_z &= \frac{\mu_{mn}^2}{a^2} D \cdot J_m\left(\frac{\mu_{mn} \cdot r}{a}\right) \cos(m\varphi) \sin\left(\frac{\pi pz}{L}\right);
 \end{aligned} \tag{1}$$

колебания E_{mnp}

$$\begin{aligned}
 H_r &= -\frac{j\omega_0\varepsilon_0}{r} mC \cdot J_m\left(\frac{\nu_{mn} \cdot r}{a}\right) \sin(m\varphi) \cos\left(\frac{\pi pz}{L}\right); \\
 H_\varphi &= -j\omega_0\varepsilon_0 \frac{\nu_{mn}}{a} C \cdot J'_m\left(\frac{\nu_{mn} \cdot r}{a}\right) \cos(m\varphi) \cos\left(\frac{\pi pz}{L}\right); \\
 H_z &= 0; \\
 E_r &= -\frac{\nu_{mn}}{a} \frac{\pi p}{L} C \cdot J'_m\left(\frac{\nu_{mn} \cdot r}{a}\right) \cos(m\varphi) \sin\left(\frac{\pi pz}{L}\right); \\
 E_\varphi &= \frac{1}{r} \frac{m\pi p}{L} C \cdot J_m\left(\frac{\nu_{mn} \cdot r}{a}\right) \sin(m\varphi) \sin\left(\frac{\pi pz}{L}\right); \\
 E_z &= \frac{\nu_{mn}^2}{a^2} C \cdot J_m\left(\frac{\nu_{mn} \cdot r}{a}\right) \cos(m\varphi) \cos\left(\frac{\pi pz}{L}\right);
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$ – число вариаций поля по координате φ ;

$n = 1, 2, \dots$ – число вариаций поля по радиусу r ;

$p = 0, 1, 2, \dots$ – число вариаций поля по оси z ;

μ_{mn} – n -ый корень производной функции Бесселя $J'_m(\chi r)$ порядка m ;

ν_{mn} – n -ый корень функции Бесселя $J_m(\chi r)$ порядка m ;

$\omega_0 = 2\pi f_0$ – угловая резонансная частота;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная вакуума;

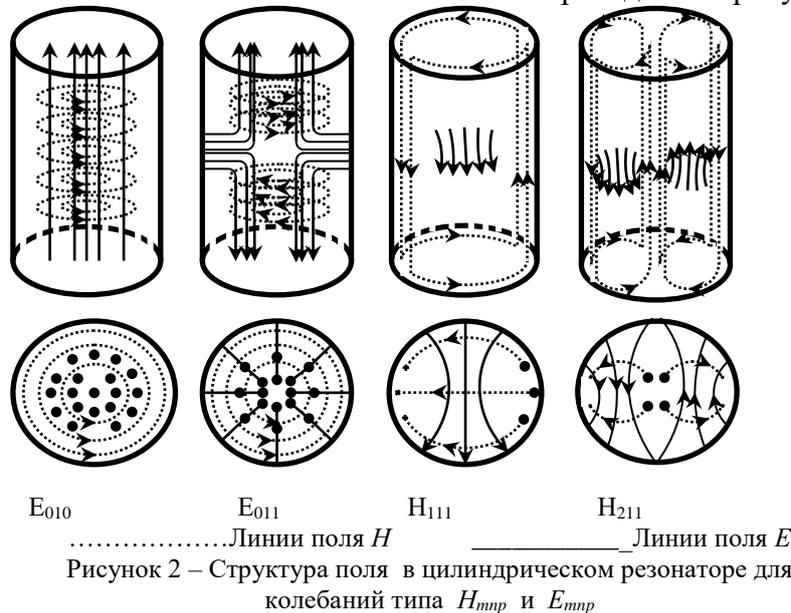
$\varepsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная вакуума.

Несколько первых значений этих корней приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения корней функции Бесселя и её производной

μ_{mn}				ν_{mn}			
$n \backslash m$	1	2	3	$n \backslash m$	1	2	3
0	3,832	7,016	10,174	0	2,405	5,52	8,654
1	1,84	5,335	8,536	1	3,832	7,016	10,173
2	3,054	6,705	9,965	2	5,135	8,417	11,620

Как следует из уравнений (1) и (2), каждая компонента поля в резонаторе зависит от трех координат φ, r, z . В нем возбуждаются только такие колебания, у которых на определенной резонансной частоте вдоль координатных линий укладывается целое число полуволн. Структура поля для нескольких низших типов колебаний приведена на рисунке 2.



1.2 Основные параметры объёмного резонатора

Основными параметрами объёмного резонатора, представленного эквивалентным колебательным контуром на определённом типе колебаний, являются:

- резонансная частота f_0 или резонансная длина волны $\lambda_0 = c/f_0$,

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

- собственная добротность резонатора Q_0 , определяющая его качество как колебательного контура.

Резонансная частота

Резонансные частоты определяются по формулам [2]:

$$f_0^H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\mu_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{L}\right)^2}, \quad (3)$$

$$f_0^A = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{v_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{L}\right)^2}, \quad (4)$$

где a – радиус резонатора;
 L – высота (осевая длина) резонатора.

Добротность цилиндрического резонатора

Собственные добротности цилиндрического резонатора для колебаний типа H_{mnp} и E_{mnp} рассчитываются по методике, изложенной в [3]. Если стенки резонатора и диэлектрик не обладают магнитными свойствами, то искомое выражение имеет вид:

$$Q_0 = \frac{2}{\Delta^0} \frac{V_0 \int H_{mnp}^2 dV}{\int_S H_{mnp}^2 dS}, \quad (5)$$

где Δ^0 – толщина скин-слоя или глубина проникновения поля в корпус резонатора (для латуни $\Delta^0 = 127 f_0^{-1/2}$ мм);

V_0 – объем резонатора без диэлектрика;

S – площадь основания резонатора.

После нахождения интегралов формулы для собственной добротности резонатора на колебаниях H_{mnp} и E_{mnp} примут вид:

$$Q_0^{H_{mnp}} = \frac{1}{\Delta^0} \frac{aL \left[1 - \left(\frac{m}{\mu_{mn}} \right)^2 \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{\pi p}{\mu_{mn}} \right)^2 \left(\frac{a}{L} \right)^2 \right]}{\left[L \left(1 + \left(\frac{\pi p}{\mu_{mn}^2} \right)^2 \left(\frac{am}{L} \right)^2 \right) + 2 \left(\left(\frac{\pi p}{\mu_{mn}} \right)^2 \left(\frac{a}{L} \right)^2 a \left(1 - \frac{m^2}{\mu_{mn}^2} \right) \right] \right]}, \quad (6)$$

$$Q_0^{E_{mnp}} = \frac{1}{\Delta^0} \frac{aL}{(L + 2a)}. \quad (7)$$

Нагруженная добротность определяется как

$$Q_n = \frac{f_0}{\Delta f_n}, \quad (8)$$

где $\Delta f_n = (f_2 - f_1)$ – полоса частот резонатора на уровне -3дБ (рис. 1.3).

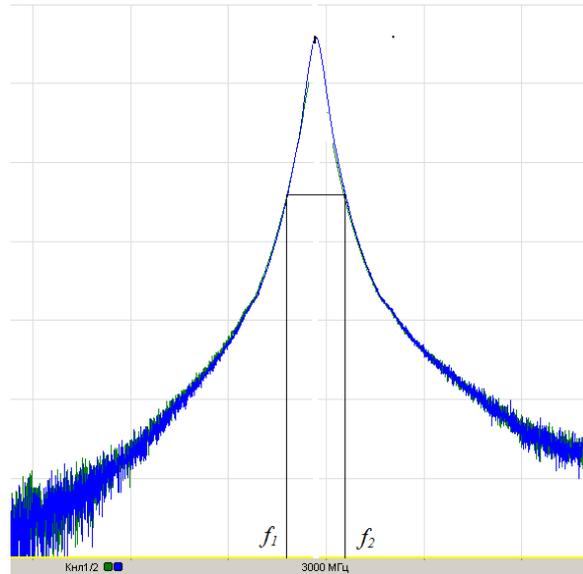


Рисунок 3 – Резонансная кривая колебания E_{010}

1.2 Расчёт диэлектрической проницаемости и потерь в диэлектрике

Диэлектрическая проницаемость образца диэлектрика цилиндрической формы рассчитывается по формуле [4]:

$$\varepsilon = 1 + 2 \frac{\Delta f}{f_0} \frac{\int_{V_0} E^2 dV}{\int_{V_\varepsilon} E^2 dV}, \quad (9)$$

где $\Delta f = (f_0 - f_\varepsilon)$ – смещение резонансной частоты при внесении диэлектрика,
 V_ε – объём исследуемого диэлектрика.

Рассмотрим резонатор цилиндрической формы с осесимметричным колебанием E_{010} , имеющим продольную компоненту E_z . Электрическое поле на оси резонатора постоянно и не зависит от φ (см. рис. 2), имеет там максимальное значение напряжённости электрического поля E_0 , определяемое подводимой мощностью, и достигает нулевого значения на стенке резонатора в силу выполнения граничного условия $J_0(\chi a) = 0$.

Помещая в резонатор высотой L и радиусом a вдоль его оси образец в виде тонкого цилиндрического стержня радиуса b и высотой h , можно считать, что при выполнении условий $b \ll a$ и $L = h$ поле в образце будет однородным. Необходимо только, поместив образец на дно резонатора, как можно точнее его спозиционировать, совместив оси образца и резонатора, чтобы не нарушить симметрию. Тогда при расчете можно использовать метод малых возмущений [4]. Его применение оправдано при выполнении условия

$$b \leq a/10\sqrt{\varepsilon}. \quad (10)$$

Взяв интеграл по объёму резонатора и по объёму диэлектрика, для колебания E_{010} получим:

$$\varepsilon = 1 + 2 \frac{a^2 L}{b^2 h} \frac{\Delta f}{f_0} \frac{J_1^2(\nu_{01})}{J_0^2\left(\frac{\nu_{01} b}{a}\right) + J_1^2\left(\frac{\nu_{01} b}{a}\right)}, \quad (11)$$

где $\nu_{01} = 2,405$ – первый корень производной функции Бесселя нулевого порядка;

$\frac{a^2 L}{b^2 h} = \frac{V_0}{V_\varepsilon}$ – отношение объёма пустого резонатора к объёму исследуемого диэлектрика.

Тангенс угла диэлектрических потерь для колебания типа E_{010} рассчитывается по формуле [4]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{J_1^2(v_{01})}{\varepsilon} \frac{L}{h} \left(\frac{a}{b} \right)^2 \left(\frac{1}{Q_\varepsilon} - \frac{1}{Q_0} \right), \quad (12)$$

где Q_ε – добротность резонатора с помещенным в него образцом.

2 Домашнее задание

1. Рассчитать резонансные частоты для типов колебаний, которые могут возбуждаться в резонаторе с заданными размерами и диапазоном частот, используя формулы (3) и (4).
2. Изобразить структуру электромагнитного поля для всех возбуждаемых в резонаторе колебаний.
3. Рассчитать собственные добротности резонатора для E_{010} типа колебаний, измеряемые в ходе эксперимента.

3. Экспериментальная часть

3.1 Описание установки и методики измерений

На рисунке 4 приведена структурная схема экспериментальной установки, включающая программно-управляемый измеритель модуля коэффициента передачи и отражения P2M-18 диапазона до 18 ГГц. Приведённая схема предполагает проведение измерений коэффициента прохождения.

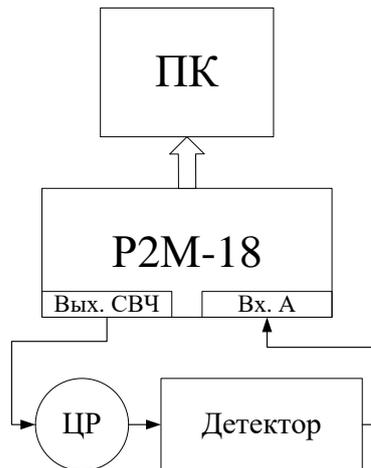


Рисунок 4 – Структурная схема установки для измерения электродинамических параметров резонатора

На высокочастотном выходе измерителя P2M-18 формируется сигнал и поступает на цилиндрический резонатор (ЦР). Используемый резонатор выполнен из латуни, имеет высоту 35 мм и радиус 22,2 мм. Связь резонатора с внешними цепями осуществляется посредством петель. После прохождения ЦР, сигнал поступает на детектор, затем на вход приёмника P2M-18. По отношению мощности выходного сигнала к входному в ПК строиться АЧХ коэффициента передачи.

3.2 Порядок выполнения работы

1. Собрать установку в соответствии с рис. 4 и включить ПК.
2. Включить скалярный анализатор цепей P2M-18, установив переключатель ВКЛ на панели измерителя в положение « I » на панели прибора, дать приборам прогреться не менее 5 минут.
3. Для старта ПО Graphit, нажать «Пуск\ВсеПрограммы\Приборы\Микран\Graphit P2M\Graphit P2M».
4. Подключиться к прибору с IP адреса 192.168.1.248.
5. Загрузить профиль «MUT.grg» (см. рис. 5 №1).
6. Задать диапазон частот от 3 ГГц до 20 ГГц. Для подтверждения измерения параметра необходимо нажать клавишу «Enter» (см. рис. 5 №3).
7. Запустить (см. рис. 5 №2).
8. Провести измерения первых десяти резонансных, настроив и установив автоматически маркеры для каждого резонанса (см. рис. 5 №4).
9. Сохранить отчёт измерений в формате rtf
10. Удалить все маркеры

11. Задать верхнюю частоту диапазона 6 ГГц.
12. Настроить маркер на поиск резонансной частоты основного типа колебаний.
13. Настроить маркеры и связь между ними на поиск и расчёт добротности резонанса основного типа колебаний.
14. «Запомнить» измерительную трассу и повторить п.12 и п. 13 для сохранённой трассы.
15. Провести измерения диаметра и высоты цилиндрического образца материала. С целью повышения точности измерение каждого образца следует проводить три – четыре раза, добиваясь достоверности результатов за счёт лучшего позиционирования образца на оси резонатора. Провести усреднение с оценкой доверительных интервалов.
16. Открыть резонатор и поместить в максимум поля колебания типа E_{010} исследуемый образец с известными размерами. Закрыть резонатор.
17. Установить связь между маркерами резонансных частот измерительной и запомненной трассами для вычисления разницы частот между ними.
18. Сохранить отчёт измерений в формате rtf
19. Результаты внести в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты измерений

Размер образца, мм (диаметр/высота)	Резонансная частота f_0 , МГц	Резонансная частота f_ϵ , МГц	Нагруженная добротность Q_n	Нагруженная добротность $Q_{n\epsilon}$	Диэлектрическая проницаемость ϵ	$tg\delta$

20. Повторить п.15 – п.18 по требованию преподавателя.
21. Выключить прибор, остановив процесс измерений, закрыв программное обеспечение Graphit P2M и установив переключатель ВКЛ на панели измерителя в положение « 0 ».

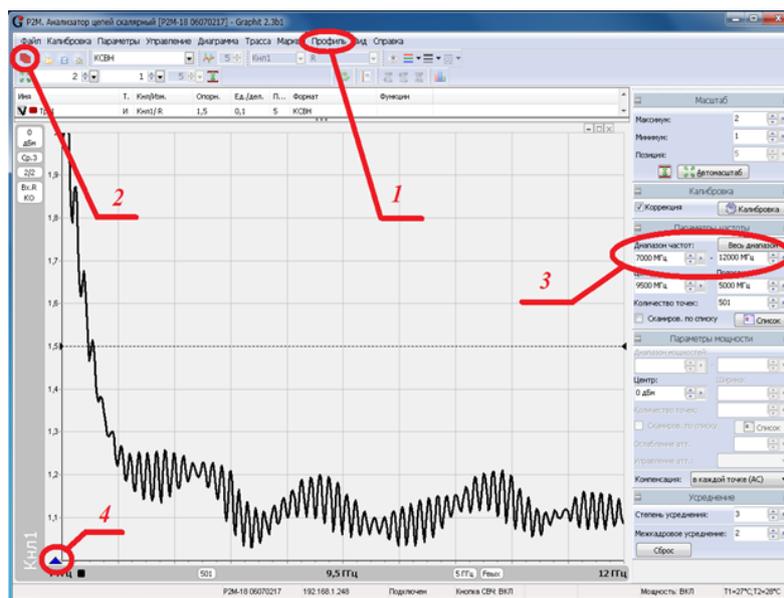


Рисунок 5 – Окно программы Graphit

3.3 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. Таблицу данных, полученных по п.9 порядка выполнения работ, дополнить расчётными, указав тип резонанса.
4. В отчёте должны быть представлены выводы по существу проделанной работы.

4. Список литературы

1. Ж.М. Соколова, Е.В. Падусова. К расчёту резонаторов СВЧ: методические указания по курсовому проектированию и к практическим занятиям для студентов. – Томск: ТАСУР, 1994. – 111с.
2. Н.Н. Федоров. Основы электродинамики. – М.: Высшая школа, 1980. – 399с.
3. В.В. Никольский. Теория электромагнитного поля. – М.: Высшая школа, 1964. – 383с.
4. А.А. Брандт. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Государственное издательство физ.-мат. литературы, 1963. – 403с.
5. Руководство по эксплуатации Р2М-18 часть I : сайт / АО НПФ “Микран”. – Томск: Микран. 2011. – http://download.micran.ru/kia/Manual/Library/R2M/User_Manual/R2M-18-UM-001_part1.pdf (дата обращения 16.04.2024). – Режим доступа: свободный.
6. Руководство по эксплуатации Р2М-18 часть II : сайт / АО НПФ “Микран”. – Томск: Микран. 2011. – http://download.micran.ru/kia/Manual/Library/R2M/User_Manual/R2M-18-UM-001_part1.pdf (дата обращения 17.04.2024). – Режим доступа: свободный.
7. Руководство по эксплуатации Р2М-18 часть III : сайт / АО НПФ “Микран”. – Томск: Микран. 2011. – http://download.micran.ru/kia/Manual/Library/R2M/User_Manual/R2M-18-UM-001_part1.pdf (дата обращения 18.04.2024). – Режим доступа: свободный.
8. Общие требования и правила оформления : сайт / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – Томск: ТУСУР. 2019 – [https://regulations.tusur.ru/storage/150499/ОС_ТУСУР_01-2021_\(согласовано\).pdf](https://regulations.tusur.ru/storage/150499/ОС_ТУСУР_01-2021_(согласовано).pdf) (дата обращения 02.04.2024). – Режим доступа: свободный.