

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 520.68

**МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА**

©2025 г. К. Е. Воронов^а, М. П. Калаев^а, А. М. Телегин^{а, *}, Д. М. Рязанов^а

^аСамарский национальный исследовательский университет

им. академика С.П. Королева

Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34

**e-mail: talex85@mail.ru*

Поступила в редакцию 02.04.2025 г.

После доработки 20.05.2025 г.

Принята к публикации 09.06.2025 г.

Представлен многопараметрический датчик, предназначенный для контроля загрязнения поверхности космического аппарата. Описаны конструкция и структурная схема устройства, включающего кварцевые микровесы для измерения массовых отложений, и импедансный датчик для оценки толщины осажденной пленки и диэлектрических свойств загрязнений. Приведены методы измерения, а также результаты лабораторных испытаний, подтверждающие эффективность предложенного решения. Разработка позволяет оперативно отслеживать степень загрязнения и его характер, что важно для обеспечения надежности работы космических аппаратов в условиях воздействия внешних факторов.

1. ВВЕДЕНИЕ

На космический аппарат (КА) в процессе полета воздействует много негативных факторов [1–5]. Одним из таких факторов является вакуум, который во многом обуславливает негативное воздействие остальных факторов космического пространства, а именно: резких перепадов температуры, метеорных потоков, галактических и солнечных космических лучей, заряженных частиц радиационных поясов, плазмы. Также вакуум способствует появлению вторичного эффекта, влияющего на КА, – образованию вокруг него газового слоя, известного как собственная внешняя атмосфера (СВА) КА. Эта атмосфера, обладая значительно более высокой плотностью (иногда в несколько раз превышающей плотность окружающего космического пространства) и принципиально иным химическим составом по сравнению с естественной средой, рассматривается как отдельный фактор воздействия на КА.

Причинами возникновения СВА являются:

- процессы газовой выделенной с поверхности и из объема материалов;
- утечки газов из внутренних отсеков КА;
- работа ракетных двигателей;
- внешние воздействия в процессе космического полета (солнечное излучение, электромагнитные поля, потоки заряженных частиц, температурный режим и т.п.);
- предварительная обработка материалов, загрязненность помещений при производстве и во время подготовки к запуску и условия транспортировки к месту старта.

Возникновение СВА приводит к следующим негативным процессам [1]:

- загрязнение поверхности осаждающимися на нее продуктами СВА;
- увеличение вероятности возникновения электрических разрядов на КА при повышении давления в его окрестности;
- появление дополнительного светового фона из-за рассеяния солнечного света на частицах СВА.

Отметим, что первый пункт имеет очень большое значение, так как загрязнение поверхности КА приводит к снижению КПД солнечных батарей, а также к ухудшению характеристик оптических приборов (стекло телескопов и иллюминаторов) и терморегулирующих покрытий.

2. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

С целью получения экспериментальных данных по динамике газовой выделенной конструкционных материалов КА разработан и изготовлен многопараметрический датчик для измерения параметров загрязнения поверхности космического аппарата (ЗП-1) (рис. 1, табл. 1). Датчик имеет малые габариты и может быть установлен в различных точках КА (в том числе и на CubeSat), что позволяет оценивать вклад тех или иных поверхностных материалов в формирование СВА. Для повышения информативности и расширения функциональности устройства используются два метода: метод кварцевого микровзвешивания и метод измерения импеданса компланарных структур. Датчик предназначен для установки на малые космические аппараты и CubeSat, поэтому в целях снижения стоимости он выполнен с использованием элементной базы категории качества industrial.

Рис. 1. Фотография многопараметрического датчика

Таблица 1. Основные характеристики многопараметрического датчика

Параметр	Значение
Габариты с учетом креплений, мм ³	98 × 45 × 47.5
Масса, кг	0.25
Рабочий диапазон температур, °С	–40–+85
Напряжение питания, В	12
Потребляемая мощность, не более, Вт	1
Время анализа, с	4
Интерфейс	CAN

На рис. 2 приведена 3D-модель датчика со снятой боковой крышкой. Корпус выполнен из сплава АМгб. Для повышения плотности упаковки электроника внутри датчика разделена на 5 микромодулей, размещенных в виде этажерки.

Рис. 2. Внутренняя компоновка датчика

В устройстве можно выделить пять функциональных частей (рис. 3):

1) модуль кварцевых микровесов (КМВ), включающий в себя опорный 1 и измерительный 2 кварцевые кристаллы, включенные в контур генераторов 5, 6; в качестве кварцевых кристаллов используются РНТ061G с резонансной частотой 8 МГц и диаметром 14 мм; выходы генераторов подключены ко входу частотного дискриминатора 8, выделяющего разностную частоту опорного и измерительного каналов, далее сигнал подается на вход таймера-счетчика микроконтроллера 10 [6];

2) модуль измерения импеданса, включающий в себя пластины с разной геометрией электродов 3, 4, которые через мультиплексор 7 поочередно подключаются к цифровому измерителю импеданса 9 на основе микросхемы AD5933;

3) модуль сбора данных, управления и телеметрии, включающий в себя микроконтроллер ATmega1281 10, специализированный контроллер информационной шины CAN 13 и гальванически развязанный приемопередатчик CAN 15, подключаемый к информационной сети космического аппарата 17;

4) модуль измерения температур, включающий в себя схему опроса термопар 12 и набора термопар 14, расположенных в зоне установки кварцевых пластин, импедансных пластин и модуля микроконтроллера;

5) источник вторичного питания 16, преобразующий напряжение бортовой сети космического аппарата 18 во вторичные напряжения 3.3, 5, 9, –5 В.

Рис. 3. Структурная схема датчика...

2. МЕТОД КВАРЦЕВЫХ МИКРОВЕСОВ

Под верхней крышкой на диэлектрических винтах (рис. 2) расположен модуль крепления кварцевых кристаллов 6, который отдельно приведен на рис. 4. Особенностью модуля является наличие теплораспределительной пластины 1, обеспечивающей равенство температур измерительного и опорного кристаллов 3, 4, кроме этого, температура пластины с высокой точностью контролируется с помощью термодатчика. Кристалл измерительного канала с внешней стороны закрыт кварцевым стеклом 5, препятствующим осаждению пленок на его поверхность. В то же время, стекло практически не препятствует прохождению солнечного излучения, нагревающего поверхность двух кристаллов (это дополнительно улучшает выравнивание их температур).

Рис. 4. Модуль кварцевых кристаллов...

Под действием осаждающих пленок изменяется резонансная частота кварцевых микровесов, которую можно определить согласно уравнению Зауэрбрея, учитывающему влияние электродов и дающему приемлемый результат при $\Delta f/f < 5\%$ [7]:

$$\Delta f = \frac{2 f^2}{S_{\text{Э}} \sqrt{\rho_q \mu_q}} \Delta m,$$

где $S_{\text{Э}}$ [мм²] – эффективная площадь электродов; μ_q [Н/м²] – пьезоэлектрически связанная константа модуля упругости; f – резонансная частота кварца, ρ_q – плотность кварца, Δm – изменение массы.

Для испытания макета датчика и оценки его чувствительности проведены эксперименты в вакуумной камере. Для этого датчик 1 закреплен на штативе 2 чувствительной поверхностью вниз, как показано на рис. 5. На расстоянии 7 см под датчиком размещена металлическая чаша 3, нагрев которой обеспечивался с помощью лампы накаливания 4 мощностью 21 Вт. В чашу было налито масло VM1, которое при нагреве испарялось и оседало на чувствительную поверхность датчика. Для контроля температуры нагрева масла в чаше был закреплен цифровой датчик температуры DS18B20, измерения с которого передавались в систему сбора данных 5.

Рис. 5. Расположение КМВ и прочего оборудования в вакуумной камере

Наиболее важным сигналом модуля является разностная частота с выхода КМВ. По мере оседания масла на измерительный кварцевый кристалл изменение разностной частоты за время эксперимента составило $\Delta f = f_2 - f_1 = 4268 - 1673 = 2595$ Гц.

Рис. 6. Экспериментальные данные с кварцевых микровесов...

Согласно уравнению Зауэрбрея, 1 Гц разностной частоты соответствует массе 4.52 нг. Тогда можно сказать, что на КР осело [7] $\Delta m = 11.73$ мкг.

3. ИМПЕДАНСНЫЙ МЕТОД

Одним из критериев оценки состояния исследуемой среды является зависимость от частоты действительной и мнимой частей полного сопротивления (импеданса) этой среды [8–13]. Импедансный метод достаточно широко используется для проведения исследований по измерению параметров веществ. Для этого используются, в основном, емкостные датчики, которые обладают рядом преимуществ: низкой стоимостью, быстрым откликом, неинвазивностью, простотой и гибкостью в конструкции электродов. Наиболее широко в литературе освещена конструкция емкостного датчика в виде компланарного (встречно-штыревого) конденсатора [14–16].

Как правило, в подобного рода датчиках проводится оценка только изменения емкости конструкции в зависимости от толщины осажденной пленки. Так, согласно работам [9, 14], можно для оценки емкости воспользоваться моделью Геворгяна [15]. Общая емкость в этой модели находится согласно выражению:

$$C = (N - 1)C_{per} + C_{lat} + C_{end},$$

где C_{per} – емкость периодических элементов с учетом количества электродов, равных N ; C_{lat} и C_{end} – емкости боковых и торцевых секций соответственно (рис. 7).

Емкость компланарной структуры можно оценить согласно выражению [16]

$$C = \frac{16 \varepsilon_0 L_x L_z}{\pi^3 a} \left(1.051 \varepsilon_1 + \frac{\exp\left(2\pi\frac{h}{a}\right) - q}{\exp\left(2\pi\frac{h}{a}\right) - q} \varepsilon_2 \right),$$

$$q = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3},$$

где ε_1 , ε_2 , ε_3 – диэлектрические проницаемости подложки, слоя и окружающей среды, L_x и L_z – длина и ширина компланарной структуры соответственно, a – сумма ширины одной ламели и ширины зазора между ламелями (полупериод решетки из ламелей), h – слой конечной толщины (рис. 7).

Рис. 7. Модель компланарной структуры...

Полное электрическое сопротивление компланарной структуры с напылением можно записать в виде комплексной величины: $Z = Z' + i Z''$, где Z' – действительная (активная), Z'' – мнимая (реактивная) составляющие импеданса. Существует несколько моделей схем замещения, описывающих АЧХ компланарной структуры при осаждении на нее пленок

различных материалов [17]. Простая модель, которая не учитывает индуктивный характер, представлена на рис. 8.

Рис. 8. Модель вещества: R_0 – сопротивление при пропускании постоянного тока в устоявшемся режиме, R и C – сопротивление и емкость

Для измерения импеданса в датчике была использована микросхема AD5933, представляющая собой интегральный преобразователь спектрального состава импеданса в широком диапазоне частот (максимальная частота составляет 0.1 МГц). Данная микросхема совмещает в себе интегрированный генератор частоты и 12-разрядный АЦП с быстродействием 1 MSPS. Генератор частоты позволяет возбуждать внешнюю цепь с комплексным импедансом сигналом известной частоты. Отклик от внешней цепи оцифровывается интегрированным АЦП и подвергается дискретному преобразованию Фурье (ДПФ) в интегрированном модуле цифровой обработки сигнала. Алгоритм ДПФ возвращает для каждой частоты выходного сигнала отсчеты вещественной (R) и мнимой (I) составляющей.

В датчике была реализована компланарная структура, представленная на рис. 9. Активная зона компланарного датчика имеет размеры $30 \times 10 \text{ мм}^2$ и состоит из двух встречно-направленных печатных электродов, по 30 линий шириной 0.2 мм каждый. Форма электродов датчика оптимизирована для измерения высокого импеданса при относительно малых габаритах датчика. Результаты эксперимента с датчиком на воздухе при осаждении глицерина на его поверхность представлены на рис. 10.

Рис. 9. Фотография встречно-штыревого конденсатора

Рис. 10. Результаты эксперимента по осаждению глицерина на поверхность датчика

Также были проведены испытания по осаждению силиконового масла ПМС-100 на встречно-штыревой датчик (рис. 11). На рис. 11 приведен полный импеданс $|Z|$ для чистого датчика, а также при осаждении 10, 30, 200 мкг масла. На рис. 11 приведены графики, полученные как разность полного импеданса чистого датчика и датчика с пленкой масла: $|Z| = |Z_0| - |Z_m|$.

Рис. 11. Результаты экспериментов с импедансным датчиком по осаждению силиконового масла ПМС-100...

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования разработан многопараметрический датчик для мониторинга загрязнения поверхности космических аппаратов, сочетающий кварцевые микровесы и импедансный метод измерения. Конструкция устройства позволяет

одновременно оценивать как массовые отложения, так и их диэлектрические свойства (путем измерения полного комплексного импеданса), что повышает точность и информативность контроля.

Лабораторные испытания подтвердили работоспособность датчика и его чувствительность к различным типам тонких пленок на поверхности чувствительных элементов. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения данной системы для оперативного мониторинга состояния внешних поверхностей космических аппаратов в условиях воздействия факторов космической среды.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию конструкции датчика, расширение диапазона измеряемых параметров, а также проведение испытаний в условиях, максимально приближенных к реальным эксплуатационным. Разработанное решение способствует повышению надежности и долговечности космической техники за счет своевременного выявления и анализа загрязнений.

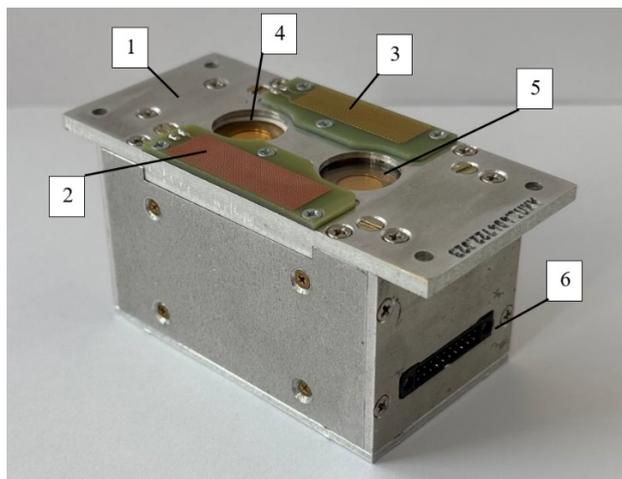
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Новиков Л.С.* Модель космоса. Москва: Научно-информационное издание, 2007.
2. *Надирадзе А.Б., Калаев М.П., Семкин Н.Д.* // Космические исследования. 2016. Т. 54. № 5. С. 392. <https://doi.org/10.7868/S002342061605006Xht>
3. *Калаев М.П., Родина А.В., Телегин А.М.* // ПТЭ. 2022. № 6. С. 99. <https://doi.org/10.31857/S0032816222050251>
4. *Деев И.С., Никишин Е.Ф.* // Вопросы материаловедения. 2018. № 2(94). С. 143. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2018-94-2-143-154>
5. *Хасанишин Р.Х., Костюк В.И., Винтайкин И.Б., Косоголов А.В.* // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2013. № 3. С. 52. https://www.elibrary.ru/title_about_new.asp?id=25748
6. *Калаев М.П., Рязанов Д.М.* // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 2. С. 44. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22155452>
7. *Bousser E., Martinu L., Klemberg-Sapieha J.E.* // Surf. Coat. Technol. 2013. V. 237. P. 313. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.06.128>
8. *Semkin N.D., Voronov K.E., Telegin A.M., Vidmanov A.S.* // Meas. Tech. 2015. V. 57. P. 1209. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0604-7>.
9. *Павлов С.А., Павлов А.С., Максимова Е.Ю., Алексеенко А.В.* // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31. № 15. С. 81.

10. *Huang Y., Zhan Z., Bowler N.* // AIP Conf. Proc. 2017. V. 1806. P. 110017. <https://doi.org/10.1063/1.4974695>.
11. *Gong Y., Zhu H.Y., Li N.* // Advanced Materials Research. 2014. V. 945-949. P. 2030. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.2030>
12. *Martinez-Lopez A.G., Guzmán-Caballero D.E., Mejia I., Tinoco J.C.* // Sensor. 2021. V. 21. P. 5958. <https://doi.org/10.3390/s21175958>.
13. *Hu X., Yang W.* // Sens. Rev. 2010. V. 30. № 1. P. 24. <https://doi.org/10.1108/02602281011010772>
14. *Вендик О.Г., Зубко С.П., Никольский М.А.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. № 4. С. 1.
15. *Назаренко И.Н., Хорват А.В., Бородкин С.В.* // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018. № 5. С. 80. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32697385>
16. *Курбатов В.М., Пресняков Ю.П.* // Электричество. 1975. № 6. С. 84.
17. https://www.imst.com/coplan/online_manual/c_idc.html.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Фотография многопараметрического датчика: 1 – крепежная пластина, 2 и 3 – импедансные датчики, 4 и 5 – измерительный и опорный кварцевые датчики, 6 – разъем для подключения к бортовой сети.
- Рис. 2.** Внутренняя компоновка датчика: 1 – модуль вторичного питания, 2 – модуль микроконтроллера и телеметрии, 3 – модуль опроса датчиков температуры, 4 – генераторы кварцевых пластин, 5 – держатель кварцевых пластин, 6 – модуль измерителя импеданса.
- Рис. 3.** Структурная схема датчика: 1 и 2 – опорная и измерительная кварцевые пластины, 3 и 4 – импедансные пластины, 5 и 6 – генераторы кварцевых пластин, 7 – мультиплексор, 8 – частотный дискриминатор, 9 – измеритель импеданса, 10 – микроконтроллер, 11 – опорный резистор, 12 – схема опроса термопар, 13 – контроллер шины CAN, 14 – термопары, 15 – приемопередатчик CAN с развязкой, 16 – источник вторичного питания.
- Рис. 4.** Модуль кварцевых кристаллов: 1 – металлическая теплораспределительная пластина, 2 – коммутационная плата, 3 – кристалл измерительного канала, 4 – кристалл опорного канала, 5 – защитное стекло опорного канала, 6 – держатель стекла.
- Рис. 5.** Расположение КМВ и прочего оборудования в вакуумной камере: 1 – датчик, 2 – штатив, 3 – чаша с маслом, 4 – лампа, 5 – система сбора данных.
- Рис. 6.** Экспериментальные данные с кварцевых микровесов: сплошная кривая – измерение температуры масла, штриховая кривая – зависимость разностной частоты микровесов от времени.
- Рис. 7.** Модель компланарной структуры: 1 – боковые секции, 2 – периодическая секция, 3 – торцевая секция.
- Рис. 8.** Модель вещества: R_0 – сопротивление при пропускании постоянного тока в устоявшемся режиме, R и C – сопротивление и емкость.
- Рис. 9.** Фотография встречно-штыревого конденсатора.
- Рис. 10.** Результаты эксперимента по осаждению глицерина на поверхность датчика: 1 – чистые пластины, 2 – толщина глицериновой пленки равна 5 мкм, 3 – толщина глицериновой пленки равна 50 мкм.
- Рис. 11.** Результаты экспериментов с импедансным датчиком по осаждению силиконового масла ПМС-100: 1 – 10 мкг, 2 – 30 мкг, 3 – 200 мкг.



цифры - курсив

Рис. 1.

цифры – курсив

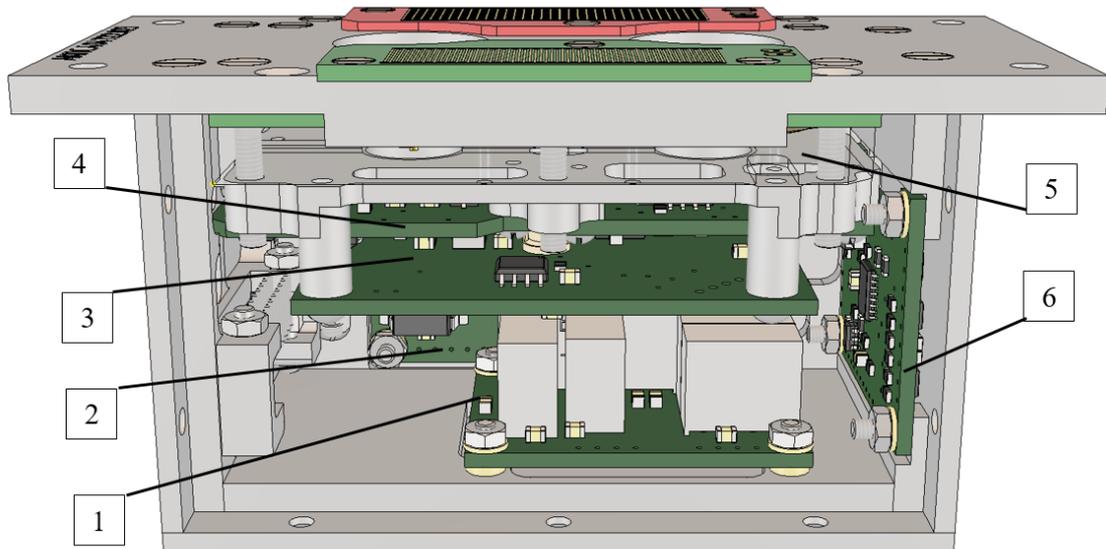


Рис. 2.

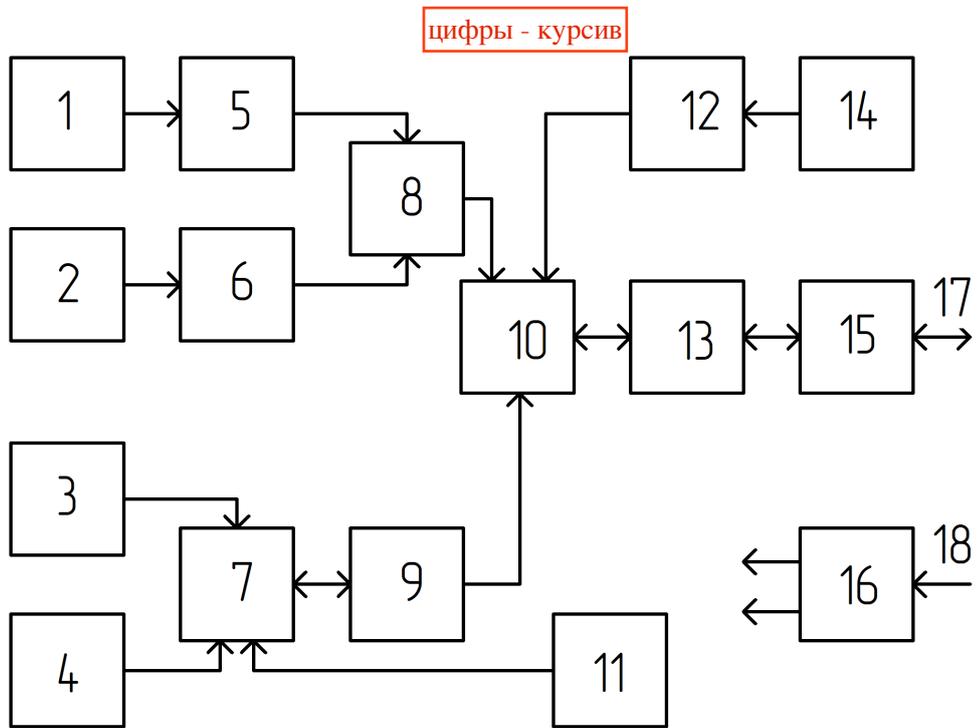


Рис. 3.

цифры – курсив

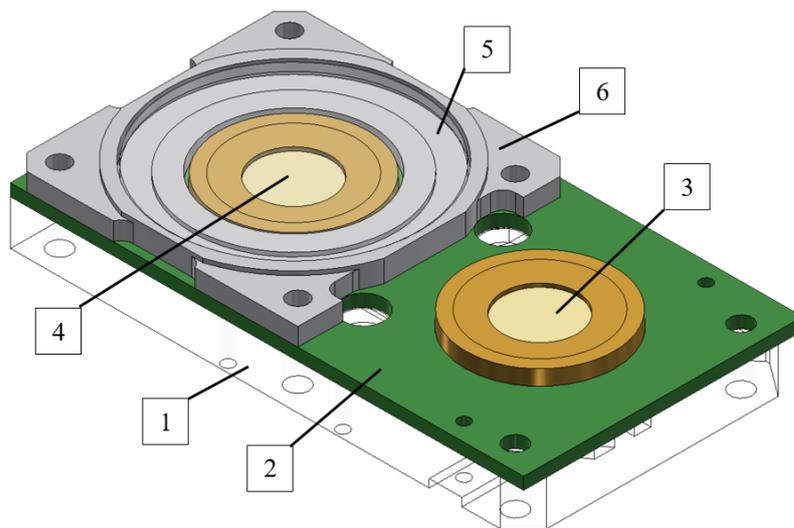


Рис. 4.

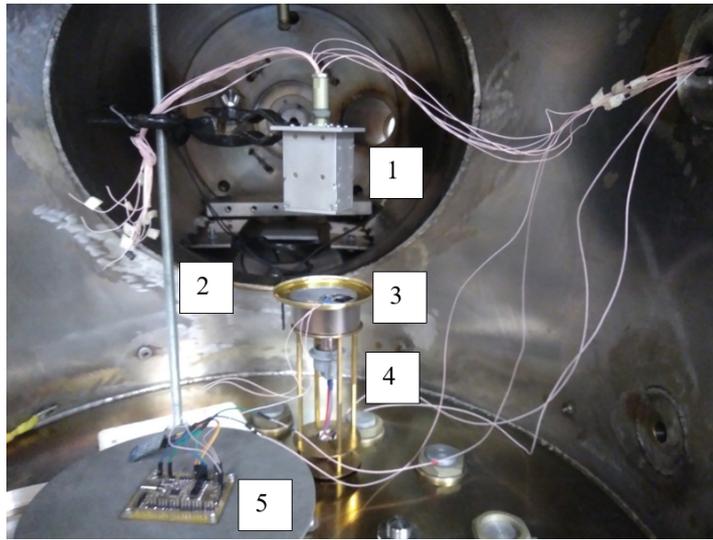


Рис. 5.

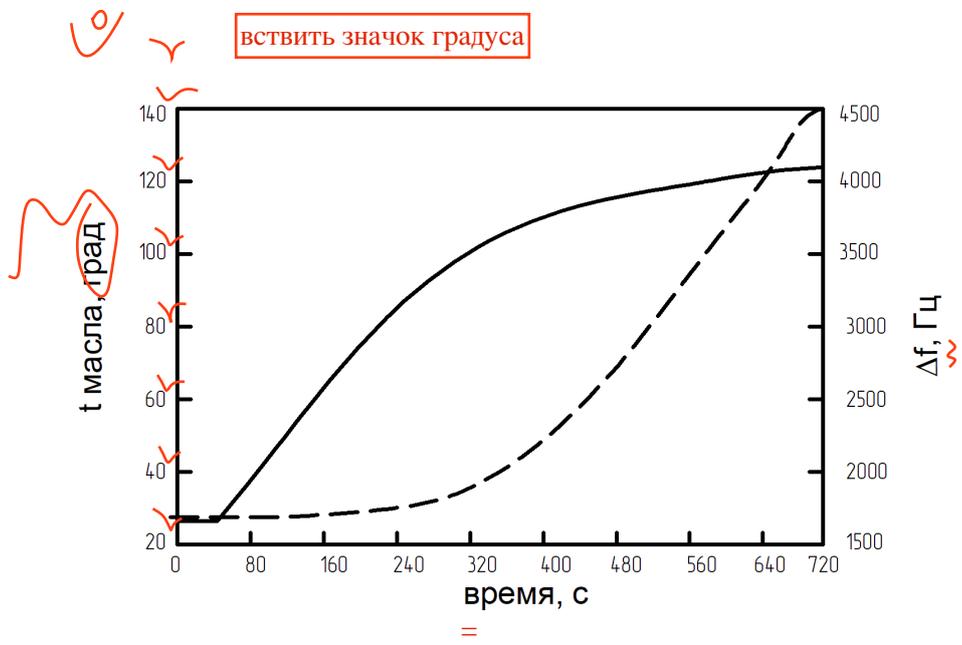


Рис. 6.

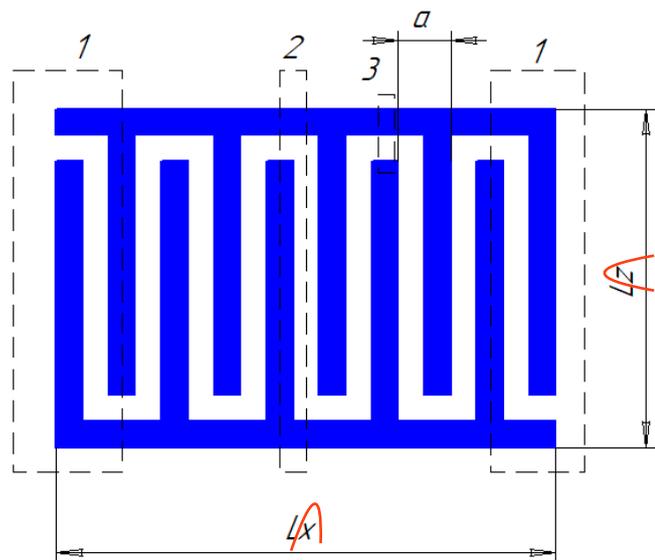
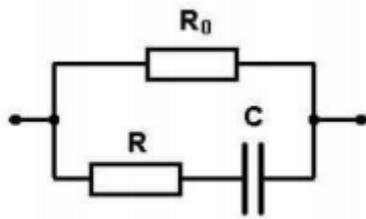


Рис. 7.



лат буквы – курсив

Рис. 8.

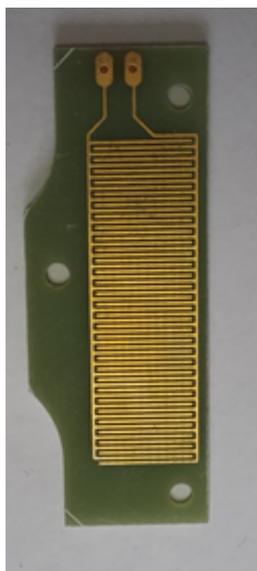


Рис. 9.

сетку убрать, засечки оставить

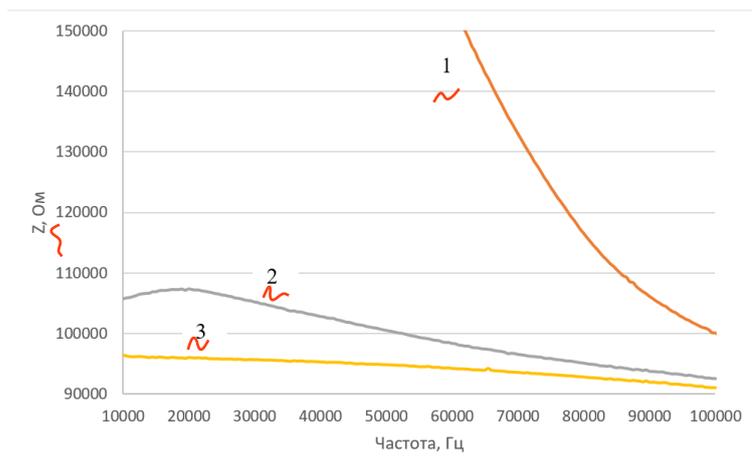


Рис. 10.

сетку убрать, засечки оставить

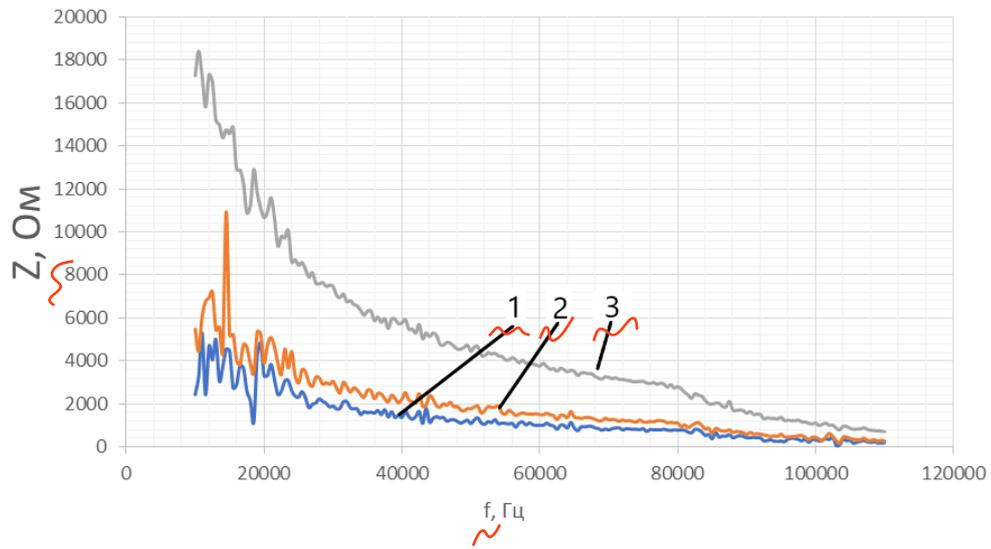


Рис. 11.