



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.6.6>

УДК: 621.372.512

## СОГЛАСОВАНИЕ АНТЕННОГО УСТРОЙСТВА КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ И ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ОБЛЕДЕНЕНИЯ

П.В. Бойкачев, А.А. Сутько, И.А. Дубовик, В.О. Исаев, М.И. Полещук

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»  
220057, Минск, пр-т. Независимости, 220

Статья поступила в редакцию 28 февраля 2022 г.

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований импеданса антенны канала управления, беспилотного летательного аппарата в условиях обледенения. Представлена математическая модель антенны канала управления беспилотного летательного аппарата в условиях обледенения и без них. Показан метод синтеза широкополосных согласующих устройств, адаптирующих радиотехнические системы к изменяющемуся импедансу нагрузки в широком спектре естественных условий их эксплуатации. Синтезирована широкополосная согласующая цепь для антенного устройства канала управления беспилотного летательного аппарата в условиях обледенения, обеспечивающая выигрыш в потенциально достижимой дальности радиолинии до 25 % по отношению к антенному устройству без согласующей цепи.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, обледенение, широкополосное согласование, инвариант, чувствительность, импеданс, математическое моделирование, методика синтеза.

**Автор для переписки:** Бойкачев Павел Валерьевич, [pashapasha.boi@mail.ru](mailto:pashapasha.boi@mail.ru)

## Введение

Современные беспилотные летательные аппараты (БЛА) представляют собой сложную систему, которая, в зависимости от решаемых задач, включает в себя подсистемы управления, навигации, разведки и др. Данные подсистемы, являясь потребителями или источниками информации, имеют в своем составе антенные устройства (АУ), обеспечивающие управление БЛА, осуществляющие обмен видеоданными с оператором и др. Импеданс (входное комплексное сопротивление) многих АУ сильно зависит от возмущающих воздействий [1]. Наличие разного рода возмущающих воздействий особенно актуально для подвижных систем. Ярким примером подобных систем являются БЛА. Изменение импеданса приводит к потерям мощности передаваемого или принимаемого сигнала, что является частой причиной отсутствия связи БЛА с пунктом управления. Учитывая условия эксплуатации БЛА, одним из наиболее вероятных внешних воздействий являются сильные температурные перепады и обледенения.

### 1. Экспериментальная часть

Воздушная стихия является достаточно агрессивной средой, которая характеризуется многообразием температурных явлений: низкие температуры, большая влажность, взвесь воды – все это приводит к возникновению обледенения. В общем случае, обледенение – это процесс образования льда на поверхности БЛА.

Как известно, лед – это одно из агрегатных состояний вещества, в данном случае воды. Получается он посредством перехода воды в твердое состояние, то есть ее кристаллизации. Температура замерзания воды -  $0^{\circ}\text{C}$ , однако это не совсем «та температура». Это так называемая равновесная температура кристаллизации (по-другому - теоретическая). При этой температуре жидкая вода и твердый лед существуют в равновесии и могут существовать так сколь угодно долго.

Для кристаллизации льда необходимы определенные центры

кристаллизации. Образование центров кристаллизации и в конечном итоге превращение воды в лед может пройти либо самопроизвольно, либо при наличии в воде примесей. Любая мелкая частица, пылинка, по взаимодействию с молекулами переохлажденной воды может стать центром кристаллизации. Вода, охлажденная до некоторой температуры, может являться неустойчивой метастабильной и при определенном воздействии может начаться ее кристаллизация. Такая переохлажденная вода входит в состав облака. Очень часто переохлажденная взвесь, соприкасаясь с агрегатами БЛА, начинает оседать и кристаллизоваться, далее эти небольшие льдинки сами становятся центрами кристаллизации и процесс приобретает лавинообразный характер, тем самым ускоряясь.

В [2] представлена статистика, которая показывает частоту обледенения  $F_{\text{обл}}$  корпусов летательных аппаратов (800 случаев) в процентном выражении (рисунок 1) от температуры окружающей среды.

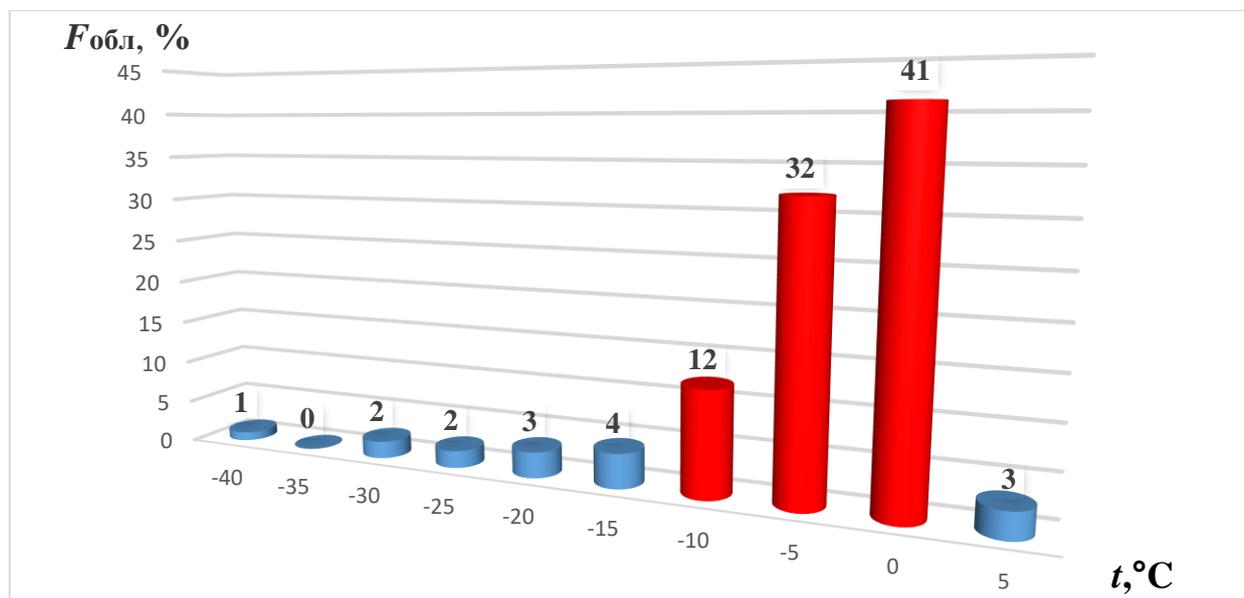


Рис. 1. Частота обледенения корпусов самолетов (800 случаев) в процентном выражении

Анализируя диаграмму, представленную на рисунке 1, можно сделать вывод, что обледенение наиболее вероятно при температурах от  $0^\circ$  до  $-15^\circ$  C. Именно такой диапазон температур является опасным при эксплуатации БЛА. Опасность возникновения льда зависит от того, где и в каком количестве этот

лед возникает. Отложение льда на АУ ухудшает радиосвязь [2] и может исключить для БЛА возможность пространственной ориентировки и управления, что в последствии приводит к отклонению от траектории аварийного маршрута посадки, а в наиболее опасных случаях, утрате или крушению летательного аппарата.

Таким образом, интересным является анализ влияния возмущающих воздействий (остановимся на температурных воздействиях) на характеристики АУ установленных на борту БЛА.

Для оценки возмущающих воздействий, приводящих к обледенению БЛА, необходимо провести экспериментальные исследования, в которых, на первом этапе, проанализируем значения температуры окружающей среды в естественных условиях эксплуатации БЛА в зимний период. На втором этапе воспроизведем возмущающие воздействия на АУ канала управления БЛА (штыревая антенна) в климатической камере, совместно с измерением импедансных характеристик. Значения импедансных характеристик от частоты позволят оценить уровень передачи мощности между приемо-передающим модулем и АУ [2].

Экспериментальные исследования проведем с использованием БЛА Supercam SX350 и Supercam S350. Supercam SX350—первый серийно производимый тип БЛА - «конвертоплан» и он совмещает в себе конструктивные особенности самолётного и вертолетного типа БЛА (максимальная дальность полета 50 км), а Supercam S350 является БЛА самолётного типа с максимальной высотой полета 5000 м (максимальная дальность полета 100 км). Внешний вид БЛА Supercam SX350 и Supercam S350 представлен на рисунке 2.

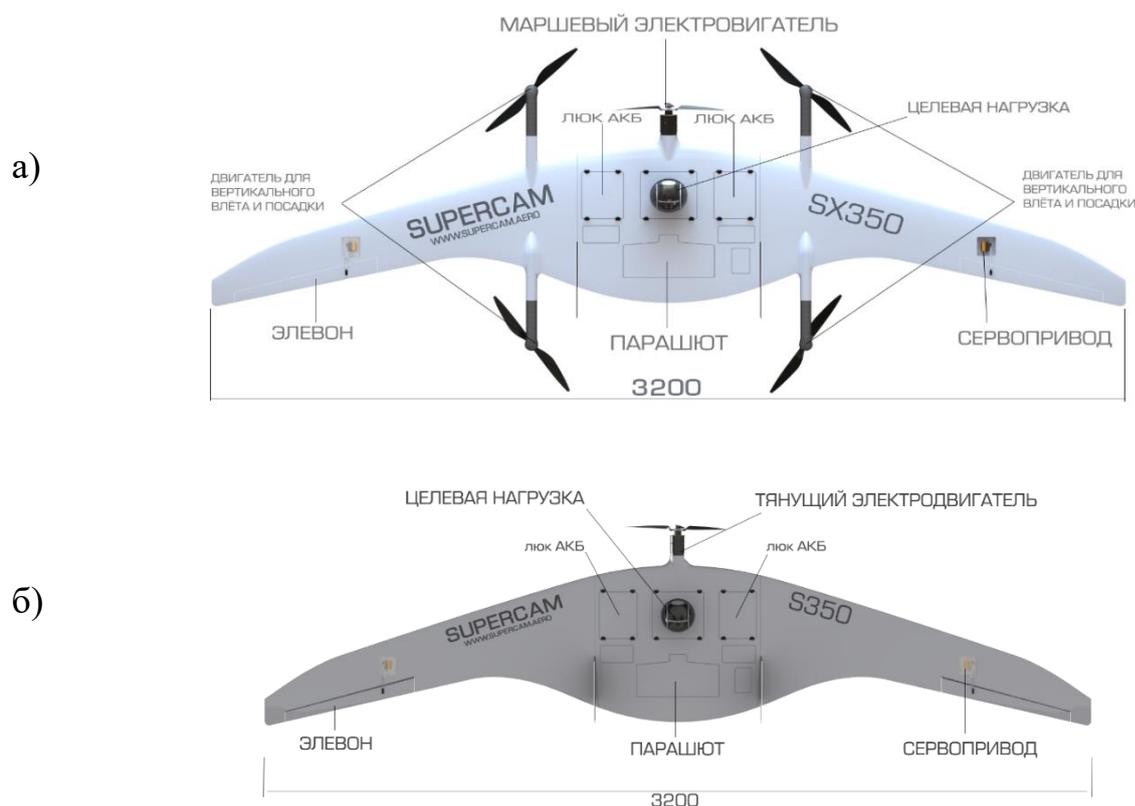


Рис. 2. Внешний вид БЛА Supercam SX350 (а), Supercam S350 (б)

Проведение эксперимента целесообразно осуществить в наиболее распространённых условиях применения БЛА. В соответствии с принятой классификацией [4, стр. 184], малые БЛА наиболее часто применяются на высоте до 5000 м.

Таким образом, с использованием Supercam S350 осуществим набор высоты до 5000 метров и оценим диапазон изменения температур (полет произведем в районе г. Минска при температуре воздуха у поверхности земли около  $-5^{\circ}\text{C}$ ). Также произведём полеты Supercam SX350 и Supercam S350 на высотах 400-600 метров и оценим в каких температурных условиях происходит эксплуатация БЛА (полеты произведем в районе г. Минска в разное время при температурах воздуха у поверхности земли около  $-2^{\circ}\text{C}$ ,  $-4^{\circ}\text{C}$ ,  $-8^{\circ}\text{C}$ ).

В среднем, на каждые 1000 м высоты температура воздуха понижается на  $6^{\circ}\text{C}$ . Также в тропосфере содержится 90% водяного пара, что, с высокой вероятностью, может привести к обледенению корпуса и устройств, находящихся на БЛА. Не стоит забывать о том, что при относительно небольшой

высоте тропосферы на неё очень влияют процессы, происходящие на земле (отдача тепловой энергии земли, перемещение теплых и холодных потоков воздуха, влаги и т.д.), что может привести к существенным изменениям температуры. Для обеспечения эксперимента была разработана и установлена на борт БЛА метеостанция, позволяющая измерять в реальном масштабе времени температуру, влажность, давление и координаты БЛА. Использование метеостанции позволяет оценить интенсивность изменения температуры и влажности непосредственно в корпусе БЛА во время его эксплуатации. Данные, полученные метеостанцией, будут сравниваться с показаниями датчиков, находящихся на корпусе летательного аппарата. Это необходимо для того, чтобы оценить и сопоставить температуру и влажность не только на корпусе БЛА, где находятся внешние АУ, но и непосредственно в корпусе БЛА, где также расположены некоторые АУ и радиотехнические устройства (РТУ). Эта информация позволит оценить интенсивность изменения температуры и влажности как на корпусе, так и внутри него. Установленная на борт БЛА метеостанция показана на рисунке 3.

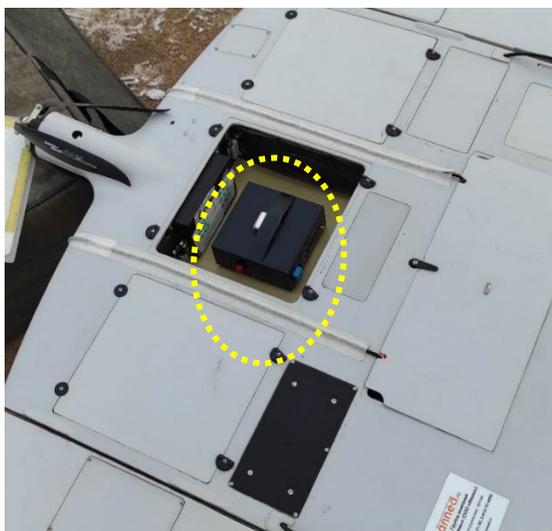
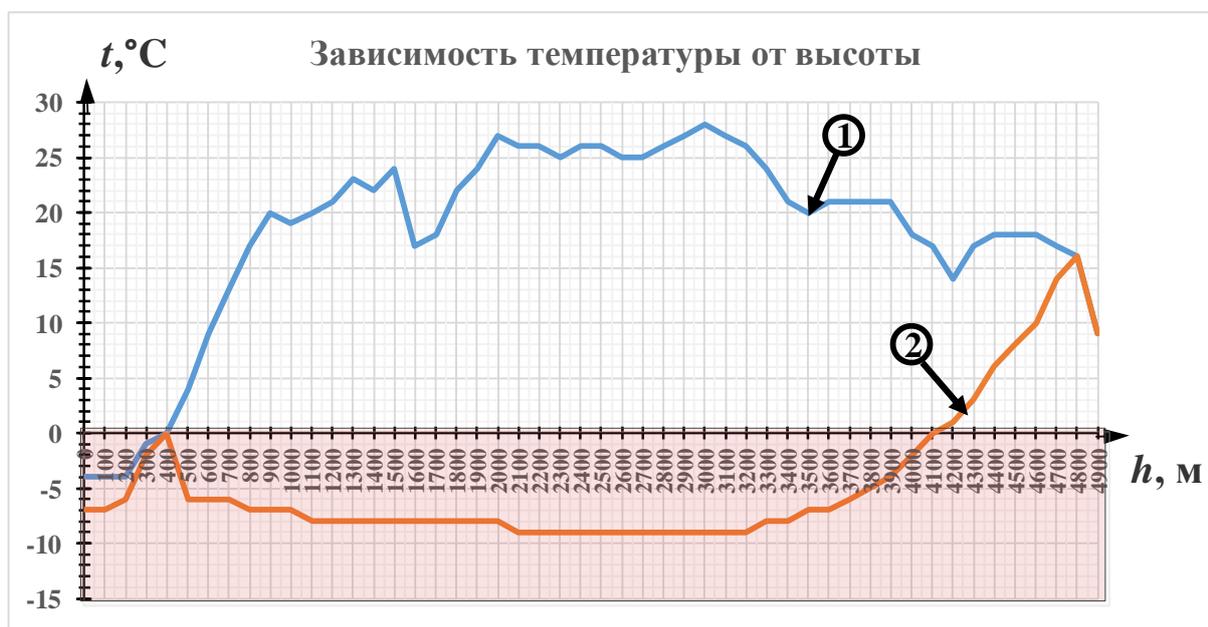


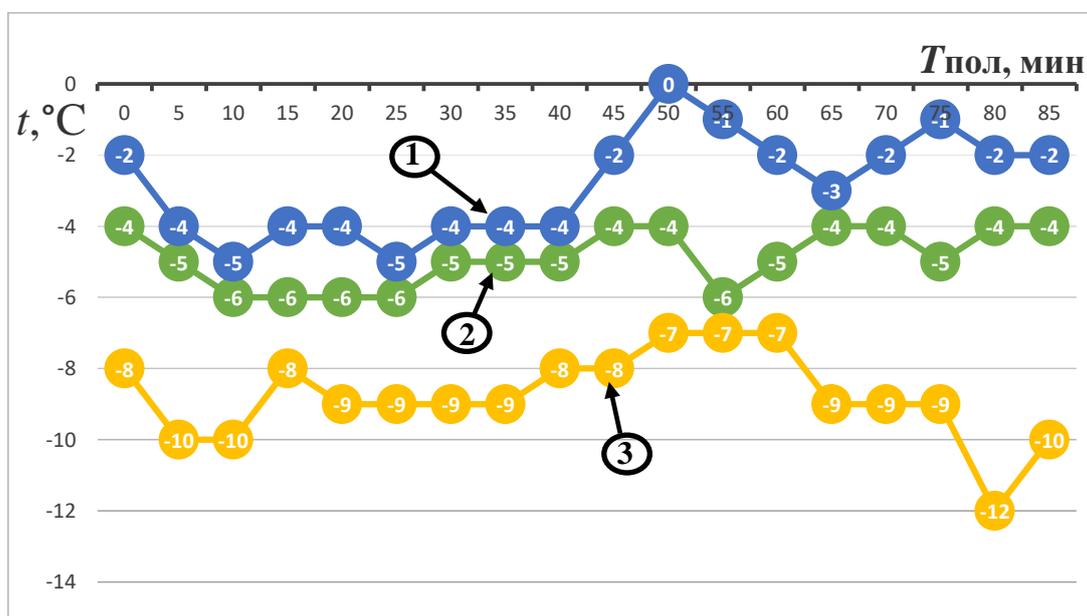
Рис. 3. Метеостанция, установленная на борт БЛА Supercam SX350

В ходе проведения эксперимента было выявлено, что за время полета БЛА температура воздуха и влажность за бортом может меняться достаточно быстро в диапазоне  $40^{\circ}\text{C}$ , а влажность достигать 98%. Следует заметить, что температура и влажность на наиболее вероятных высотах применения малых

БЛА [4, стр.184] может меняться очень динамично. Экспериментальные данные (зависимость температуры от высоты и температуры от времени ( $T_{пол}$ , мин) в процессе эксплуатации БЛА) представлены на рисунке 4.



а) Supercam S350 зависимость температуры от высоты (набор высоты до 5000 метров (кривая 1)), снижение и посадка (кривая 2)



б) Supercam S350 (кривая 1,2), Supercam SX350 (кривая 3) зависимость температуры от времени полета

Рис. 4. Зависимость температуры от высоты (а) и от времени в процессе эксплуатации БЛА (б)

Температура в корпусе БЛА и на поверхности БЛА практически одинаковые (за исключением электродвигателей). Об этом свидетельствуют

значения, полученные при проведении эксперимента (рисунок 4) и снимки тепловизионной камеры FLIR ThermaCAM E300, сделанные непосредственно после посадки БЛА.



Рис. 5. Снимки тепловизионной камеры ThermaCAM E300 БЛА Supercam SX350 непосредственно после посадки

Анализируя кривые на рисунке 4 и фото на рисунке 5, можно сделать вывод, что существует высокая вероятность обледенения БЛА в естественных условиях его эксплуатации. Интересной является оценка влияния подобного рода возмущающих воздействий на работу канала управления БЛА.

На втором этапе эксперимента проведем исследование по оценке влияния изменений условий эксплуатации БЛА (при обледенении и в различных температурах, и без него) на импедансные характеристики АУ и, как следствие, на коэффициент передачи мощности и коэффициент стоячей волны. Методика подобных экспериментальных исследований подробно изложена в [4].

В качестве примера рассмотрим штыревую антенну, настроенную на частоту 433 МГц, которая установлена на борту БЛА, работающую в составе канала управления летательным аппаратом.



Рис. 6. Беспилотный авиационный комплекс вертикального взлета «Талисман» компании ООО «СкайГорез» с установленной на нем штыревой антенной канала управления

Возмущающие воздействия канала управления БЛА воспроизведем в испытательной камере тепла-холода Espes SU-261, совместно с измерением импедансных характеристик векторным анализатором NANO VNA V2. Снимки проведения эксперимента представлены на рисунке 7.

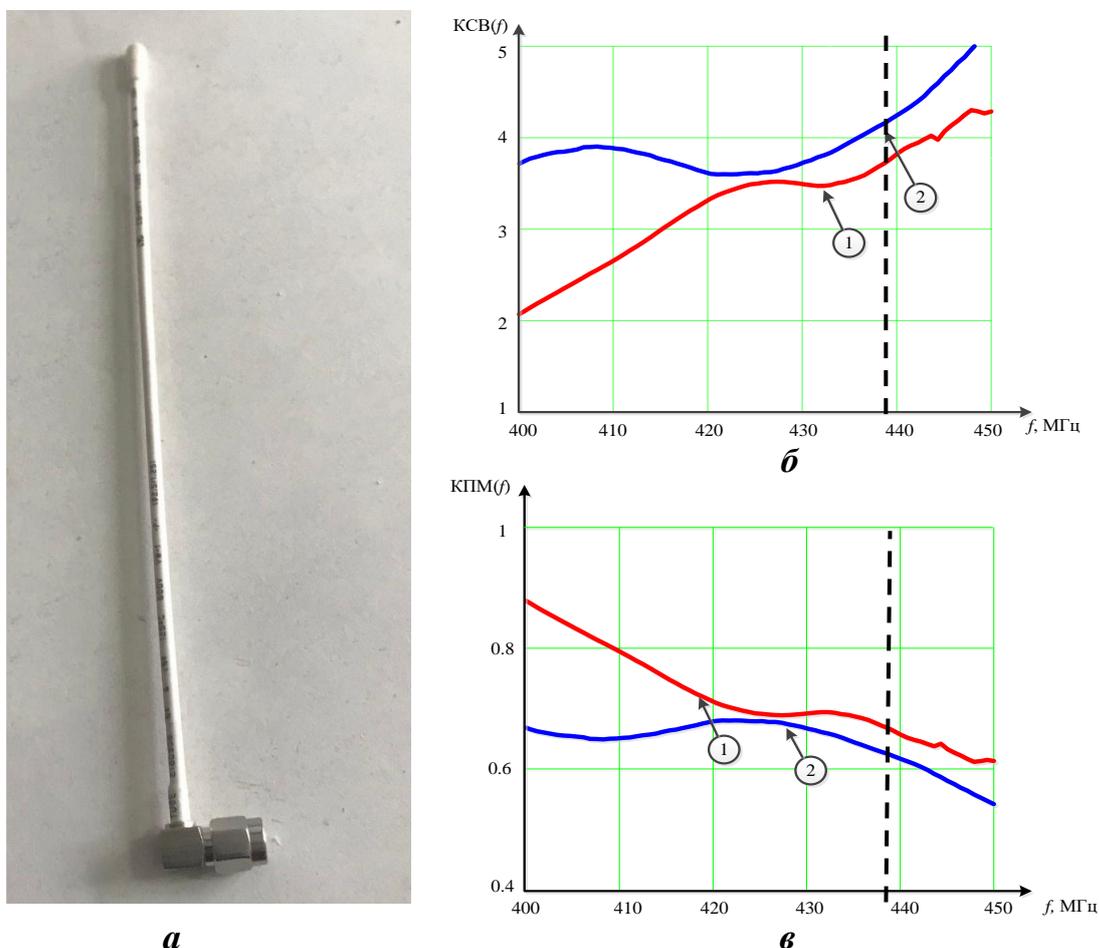


а) внешний вид испытательной камеры тепла-холода Espes SU-261;  
б) фото проведения измерений импедансных характеристик

Рис. 7. Снимки проведения эксперимента

В ходе проведения эксперимента были получены зависимости импедансных характеристик АУ от частоты, которые были пересчитаны (методика пересчета представлена в [5]) в зависимости коэффициентов стоячих

волн (КСВ) и коэффициентов передачи мощности (КПМ) от частоты. На рисунках 8 представлены данные характеристики АУ канала управления БЛА в различных температурных режимах работы (в условиях обледенения и без него).



а) внешний вид АУ; б) КСВ: 1 – без обледенения АУ; 2 – в условиях обледенения АУ; в) КПМ: 1 – без обледенения; 2 – в условиях обледенения  
Рис. 8. Штыревая антенна канала управления БЛА и ее характеристики

Проанализировав полученные зависимости (рис. 8 б, в), можно сделать выводы:

- в условиях обледенения АУ происходит ухудшение характеристик КСВ и КПМ на 5...15%;
- уровень передачи мощности на рабочей частоте не является удовлетворительным (потеря мощности сигнала составляет примерно 38%) даже в штатных условиях проведения эксперимента (без обледенения);
- в условиях возмущающих воздействий происходят существенные вариации импеданса и заметное смещение резонанса АУ;

- такое ухудшение характеристик приводит к уменьшению дальности радиосвязи на 3...8 %, что составляет потерям в 3...8 км устойчивой радиосвязи в зоне прямой видимости при максимальной дальности радиолинии  $R_{\max} = 100$  км (для Supercam S350) и в 1,5...4 км устойчивой радиосвязи в зоне прямой видимости при максимальной дальности радиолинии  $R_{\max} = 50$  км (для Supercam SX350). Таким образом, обледенение АУ приводит к ухудшению характеристик радиотехнического тракта во всем рабочем диапазоне частот, что обусловлено отсутствием согласования между АУ и приемо-передающим модулем и приводит к уменьшению дальности радиосвязи.

В условиях смещения резонанса АУ и изменений импеданса, актуальным является применение теории широкополосного согласования, показанной в [2]. Данная теория позволяет обеспечить передачу максимальной мощности в заданной полосе рабочих частот между источником сигнала и нагрузкой в условиях вариаций импеданса. В большинстве случаев при проектировании согласующих устройств (СУ) разработчики не учитывают нестабильность импеданса нагрузки, вызванную изменениями условий эксплуатации, особенно на подвижных объектах. Для решения данной проблемы предлагается использовать теорию широкополосного согласования, учитывающую нестабильность импеданса нагрузки. Рассмотрим применение данной теории для синтеза СУ, обеспечивающего широкополосное согласование АУ канала управления БЛА с приемо-передающим модулем, сопротивление которого составляет 50 Ом.

## **2. Согласование АУ канала управления БЛА и приемо-передающего модуля**

Современные методы широкополосного согласования, характеризуются значительными возможностями по разработке радиотехнических устройств (РТУ) различного назначения с высокими техническими характеристиками [6]. Независимо от используемых методов первый этап синтеза согласующих цепей заключается в исследовании и задании исходных свойств согласуемой нагрузки. Как правило, входные характеристики согласуемой нагрузки представлены в

виде дискретных точек реальной  $\operatorname{Re}Z(\omega)$  и мнимой  $\operatorname{Im}Z(\omega)$  составляющих функции, описывающей рассматриваемый параметр комплексного сопротивления –  $Z(\omega)$ . Такое представление не всегда является достаточно информативным и не применимо для использования во многих современных методах синтеза широкополосных согласующих и частотно-избирательных устройств, требующих эквивалентные схемы или аналитические представления  $Z(\omega)$  согласуемых нагрузок [7].

Одним из подходов представления характеристик РТУ, входящих в состав радиотехнической системы (усилители, частотные фильтры, АУ и др.), является аналитическое математическое моделирование, построенное на основе аппроксимации результатов экспериментальных данных [13, 14]. Такая математическая модель строится на основе всестороннего анализа поведения системы и широкого использования результатов проведенных ранее статистических исследований.

Как правило, импедансные характеристики согласуемых нагрузок представлены числовыми рядами значений двух величин: независимой ( $y_i$ ) и зависимой ( $x_i$ ), каждая из которых в общем случае кроме определенной регулярной (детерминированной) составляющей может содержать и случайные составляющие самой различной природы. Это обусловлено как статистической природой изучаемых процессов, так и множеством внешних факторов процессов измерений и преобразования данных (шумы, помехи, дестабилизирующие факторы и ошибки измерений). В нашем случае это температурные воздействия и обледенение. При этом согласно центральной предельной теореме, полагается, что значения случайной составляющей зависимой переменной (как собственные, так и «суммарные») распределены по нормальному вероятностному закону.

В [10] представлена методика определения потребного объема выборки  $N$  (числа проводимых натуральных, полунатурных или модельных экспериментов), при котором обеспечивается определение математического ожидания той или иной характеристики с заданными значениями показателей достоверности

(характеризуется значением доверительной вероятности) и точности (характеризуется значением относительной погрешности).

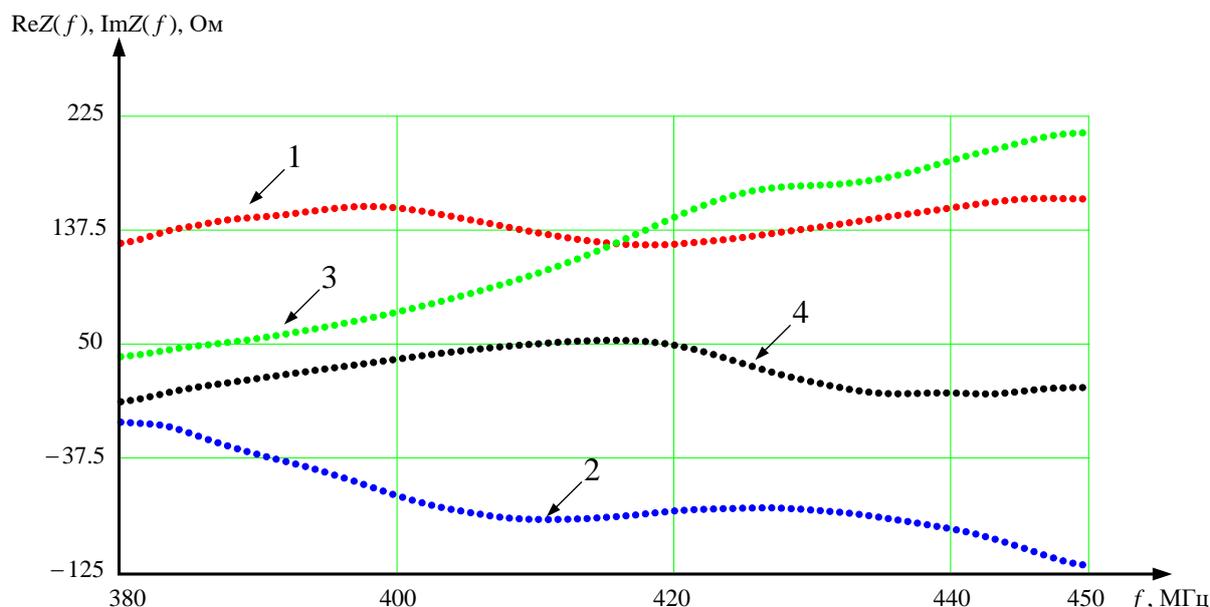
В таблице 1 представлен потребный объем выборки для оценки математического ожидания нормально распределенной характеристики при коэффициенте вариации  $V$  равном единице.

Таблица 1. Потребный объем выборки для оценки математического ожидания при коэффициенте вариации  $V$  равном единице

Значение доверительной вероятности	Значение относительной погрешности, %						
	30	25	20	15	10	5	1
0,5	5	7	11	20	46	182	4556
0,6	8	12	18	31	71	282	7056
0,7	12	17	27	48	108	433	10820
0,8	18	26	41	73	164	657	16440
0,9	30	43	68	120	272	1080	26990
0,95	43	62	96	171	384	1537	38420
0,99	73	106	166	295	664	2654	66360

Совокупность данных, характеризующих РТУ подвергается обработке, т.е. полученные данные приводятся в определенную и сбалансированную систему, которая становится базой для дальнейшего содержательного анализа, интерпретации и научных выводов, и практических рекомендаций. В результате получаем данные экспериментальных исследований рассматриваемой характеристики РТУ (в виде таблицы или графика), в которых каждому значению входного фактора ( $X_m$ ) соответствует значение выходного фактора ( $Y_m$ ), т.е. известна пара чисел ( $x_{mi}, y_{mi}$ ), соответствующих точечной оценке математического ожидания  $\hat{M}_\theta$  оцениваемой характеристики  $\theta$  – регулярная составляющая экспериментальных данных. В качестве примера на рисунке 9 представлены обработанные результаты измерений импеданса штыревой антенны канала управления БЛА без обледенения и в результате обледенения.

На практике для решения инженерных задач необходимы значения функции и в других точках, отличных от тех, что заданы в таблице. В этом случае приходится прибегнуть к интерполяции (или интерполированию) – приближенному нахождению неизвестных значений функций по известным ее значениям в заданных точках.



1, 3 – действительная часть импеданса АУ без обледенения (в условиях обледенения); 2, 4 - мнимая часть импеданса АУ без обледенения (в условиях обледенения)

Рис. 9. Графическое отображение обработанных результатов измерения импеданса штыревой антенны канала управления БЛА

Таким образом, результатом обработки экспериментальных данных является эталонная математическая модель объекта исследования, представленная в виде интерполяционного (при многократном проведении экспериментов) или сглаживающего (при однократном проведении эксперимента) кубического сплайна, наиболее точно описывающего результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований и удовлетворяющего требованиям и ограничения, предъявляемые к кривым и поверхностям, описывающим функциональную зависимость экспериментальных исследований. Однако, необходимо обратить особое внимание на том, что такая эталонная математическая модель не может быть использована для решения различных инженерных задач, т.к. она не соответствует физической природе моделируемого процесса, имеющего следующие ограничения [11].

1) Исходя из условий физической реализуемости, импедансные характеристики РТУ являются дробно-рациональными функциями вида:

$$f(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2(s)^2 + \dots + a_k(s)^k}{b_0 + b_1s + b_2(s)^2 + \dots + b_q(s)^q}, \quad (1)$$

где

$s = i\omega$  - комплексная переменная;

$m_1 = a_0 + a_2s^2 + \dots + a_{2k}s^{2k}$  - четная часть числителя функции  $f(s)$ ;

$m_2 = b_0 + b_2s^2 + \dots + b_{2q}s^{2q}$  - четная часть знаменателя функции  $f(s)$ ;

$n_1 = a_1s + \dots + a_{(2k-1)}s^{(2k-1)}$  - нечетная часть числителя функции  $f(s)$ ;

$n_2 = b_1s + \dots + b_{(2q-1)}s^{(2q-1)}$  - нечетная часть знаменателя функции  $f(s)$ .

Все коэффициенты при  $s$  должны быть вещественными и неотрицательными, а высшие степени полинома числителя ( $k$ ) и знаменателя ( $q$ ), так же, как и их низшие степени, не могут отличаться более чем на 1; нули и полюсы этой функции должны чередоваться на мнимой оси плоскости  $s$ .

2) Для  $2N$ -полюсников функция  $f(s)$  должна обладать свойствами входного сопротивления  $Z(s)$  этих двухполюсников. Входные функции таких четырехполюсников относятся к классу так называемых *положительных вещественных функций* (ПВФ), которые удовлетворяют следующему дополнительному условию:  $\operatorname{Re}[f(s)] \geq 0$  или  $\operatorname{Re}[Y(s)] \geq 0$  при  $s \geq 0$ .

3) Также, необходимо учитывать, что положительные вещественные функции всегда представляют собой отношение двух полиномов Гурвица, т.е. нули и полюсы таких функций расположены в левой полуплоскости. Кроме того, если ПВФ имеет полюсы или нули на мнимой оси (включая  $s = 0$  и  $s = \infty$ ), то эти полюсы и нули являются вещественными и положительными.

Исходя из ограничений, представленных выше, для решения задачи аппроксимации импедансных характеристик комплексных нагрузок предлагается: в качестве аппроксимирующей функции использовать дробно-рациональную функцию вида (1) [8]. С помощью математического преобразования выражение (1) представим в виде четной  $Ev f(s)$  и нечетной  $Od f(s)$  частей от  $f(s)$ :

$$Ev f(s) = \frac{m_1 m_2 - n_1 n_2}{m_2^2 - n_2^2}; \quad (2)$$

$$Od f(s) = \frac{n_1 m_2 - m_1 n_2}{m_2^2 - n_2^2}. \quad (3)$$

При  $s = i\omega$  имеем:

$$Ev f(s)|_{s=i\omega} = \operatorname{Re} f(i\omega); \quad Od f(s)|_{s=i\omega} = i \operatorname{Im} f(i\omega).$$

Выражения (2) и (3) предлагается использовать в качестве аппроксимирующих функций  $\operatorname{Re} f(s)$  и  $\operatorname{Im} f(s)$  составляющих входных и передаточных характеристик объекта исследования. Для нахождения наиболее оптимальных коэффициентов аппроксимирующих функций необходимо использовать методы нелинейных оптимизированных процедур с использованием ЭВМ (например, метод оптимизации Левенберга-Марквардта [12], [13]). Он позволяет сформировать аналитическую математическую модель (АММ) входных и передаточных характеристик РТУ с высокой степенью адекватности (с доверительной вероятностью не менее 0,9 и относительной погрешностью не более 10%) [16, с. 9].

Таким образом, методика аппроксимации импедансных характеристик радиотехнических устройств имеет следующий вид (рисунок 10)

Суть методики заключается в следующем:

1) задаются требования и ограничения к реализуемой математической модели. Согласно предъявляемым требованиям, определяется необходимое количество проводимых измерений характеристики РТУ согласно таблице 1;

2) после проведения требуемого количества измерений осуществляется обработка экспериментальных данных и формирование эталонной модели объекта исследования (перехода от стохастических данных к детерминированным), что позволит оценить качество аппроксимации;

3) после этого, с учетом ограничений, накладываемых на функцию, описывающую импедансные характеристики РТУ, формируется аппроксимирующая функция, адекватность которой оценивается расчетом абсолютной погрешности  $\Delta$  относительно сформированного эталона.

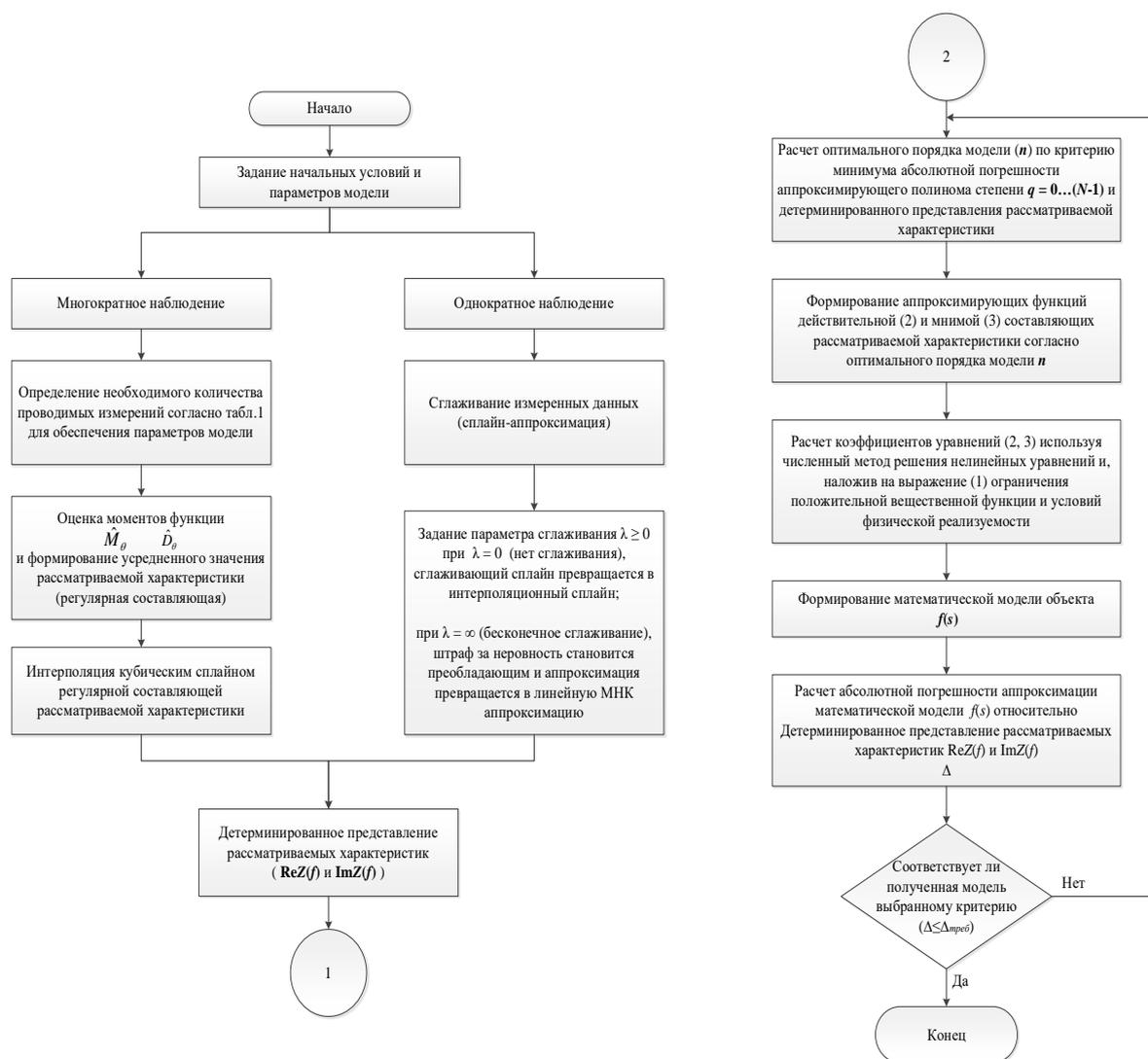


Рис. 10. Методика аппроксимации импедансных характеристик радиотехнических устройств

В качестве примера исследуем возможность аппроксимации частотной характеристик АУ с использованием алгоритма, представленного на рисунке 10. Полученные АММ, описывающая реальную и мнимую составляющие входного сопротивления АУ без обледенения и в условиях обледенения, имеют вид (1), коэффициенты которых представлены в таблице 2 и 3.

Таблица 2. Коэффициенты дробно-рациональной функции, аппроксимирующей импедансные характеристики АУ без обледенения

Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение
$T$	$e$	$T$	$e$	$T$	$e$
$a_0$	94.617	$a_4$	219.477	$b_2$	0.279
$a_1$	37.184	$a_5$	0.916	$b_3$	3.282
$a_2$	302.596	$b_0$	0.359	$b_4$	0.168
$a_3$	52.215	$b_1$	1.382	$b_5$	1.187

Таблица 3. Коэффициенты дробно-рациональной функции, аппроксимирующей импедансные характеристики АУ в условиях обледенения

Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение
$T$	$e$	$T$	$e$	$T$	$e$
$a_0$	93.299	$a_5$	0.407	$b_3$	0.932
$a_1$	11.938	$a_6$	45.561	$b_4$	6.612
$a_2$	267.507	$b_0$	1.707	$b_5$	0.461
$a_3$	15.725	$b_1$	0.455	$b_6$	2.398
$a_4$	222.84	$b_2$	5.907		

Частотные характеристики аппроксимирующих функций входного сопротивления АУ представлены на рисунке 11.

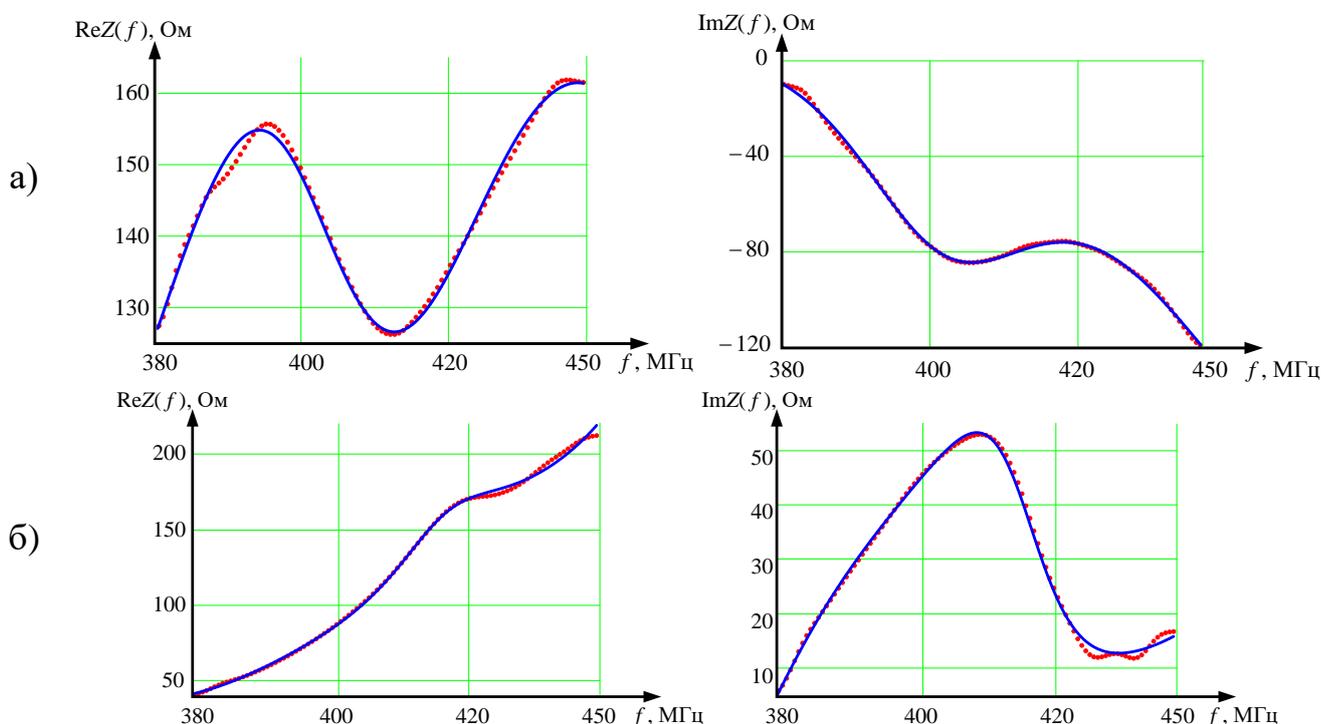


Рис. 11. Функции входного сопротивления АУ без обледенения (а) и в условиях обледенения (б) (точки) и его рассчитанные АММ (сплошные линии) в рабочей полосе частот

На рисунке 11 наглядно видно, что рассчитанные АММ входного сопротивления АУ обеспечивают требуемую абсолютную погрешность аппроксимации к характеристикам импеданса и составляют менее 10%.

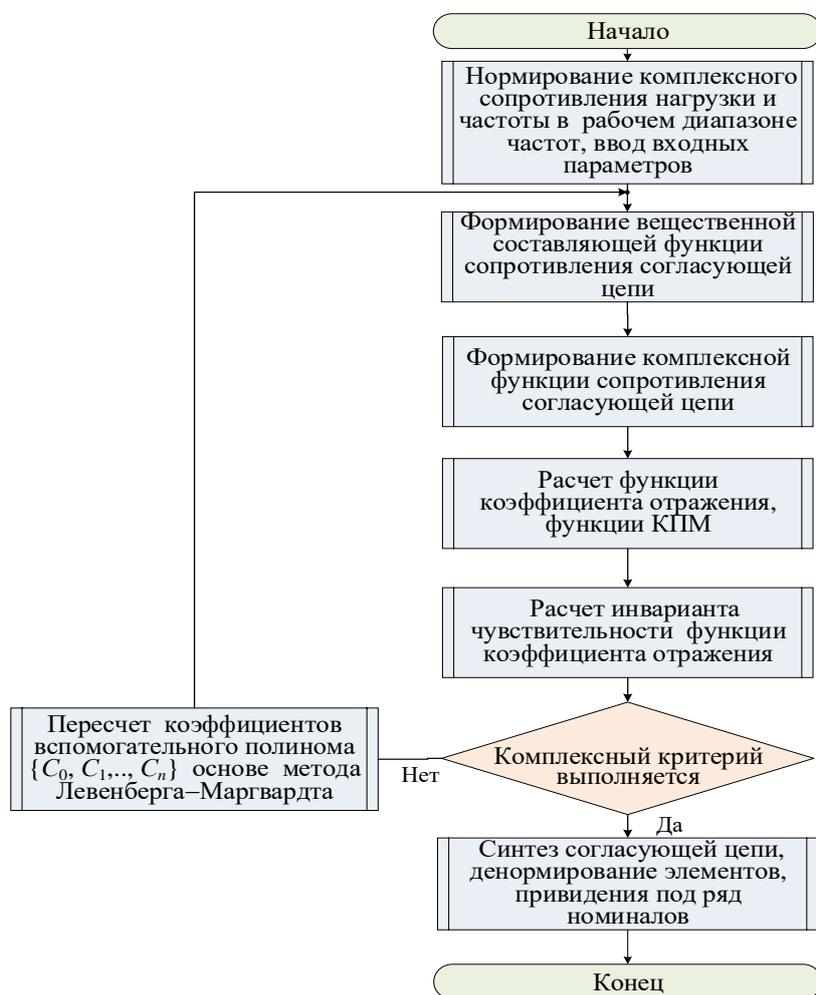
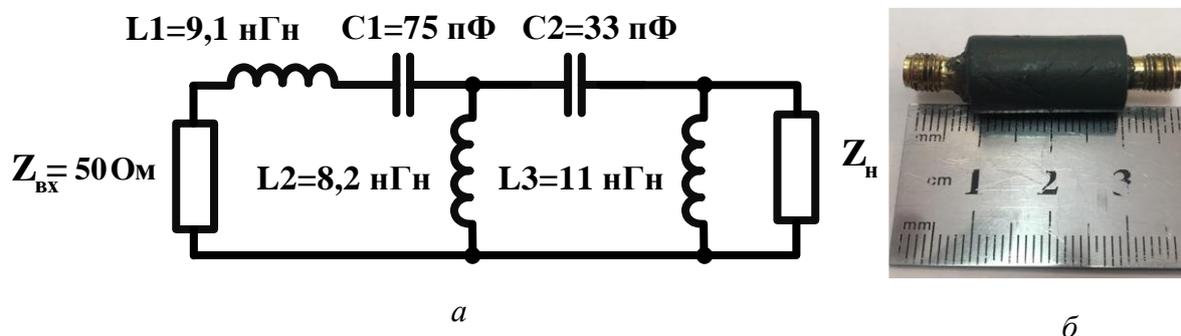


Рис. 12. Методика синтеза СЦ для широкополосных РТУ с изменяющимся импедансом нагрузки [4]

Данный подход позволяет не только анализировать любые изменения импеданса нагрузки в зависимости от условий эксплуатации, но и применять различные методы и способы широкополосного согласования, которые позволяют обеспечить максимальный уровень передачи мощности при изменении условий эксплуатации согласуемого устройства.

Для обеспечения максимального уровня передачи мощности между АУ и приемно-передающим модулем в условиях обледенения и без него, по методике синтеза СЦ [14], блок–схема которой представлена на рисунке 10 и методике, представленной на рисунке 12, была разработана СЦ лестничной структуры

(рисунок 13), функционирующая в диапазоне от 415 до 449 МГц с элементами ряда номиналов E24. Расширение диапазона частот обусловлено смещением резонанса АУ при обледенении.



*a* – принципиальная схема; *б* – внешний вид СЦ

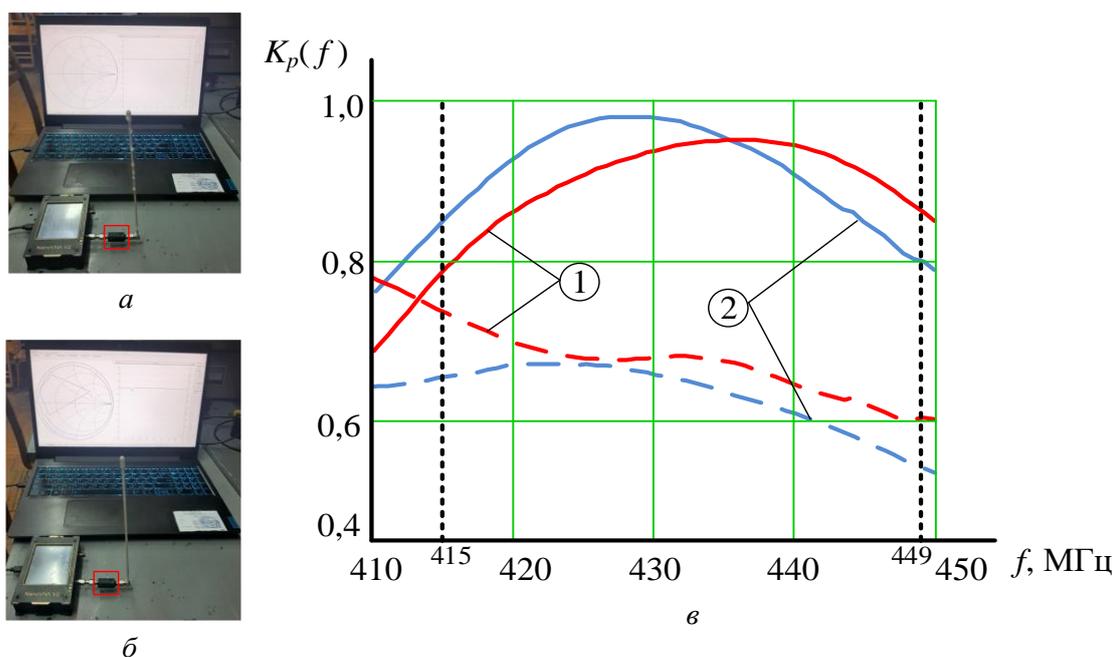
Рис. 13. СЦ лестничной структуры, состоящая из пяти элементов

Следует обратить внимание, что реализация принципиальной схемы (рисунок 13 а) в защитном корпусе (рисунок 13 б) имеет незначительные размеры и весит 15 грамм, что допустимо к использованию в тракте канала управления БЛА.

### 3. Результаты и их обсуждение

Применение СЦ в приеме-передающем тракте радиоканала управления БЛА обеспечивает уровень передачи мощности, представленный на рисунке 14, где сплошной линией показаны зависимости с синтезированной СЦ, а штриховой без нее.

Произведя анализ зависимостей, представленных на рисунке 14 (в) можно сделать вывод, что применение СЦ обеспечивает высокий уровень передачи мощности от источника сигнала в нагрузку (уменьшение потерь с 38% до 13%), как в штатных условиях, так и в условиях обледенения АУ, что позволяет обеспечить канал управления БЛА устойчивой радиосвязью.



1 – без обледенения АУ; 2 – в условиях обледенения АУ; с СЦ (без обледенения, в условиях обледенения АУ)

Рис. 14. Результаты проведения эксперимента: а) в условиях обледенения; б) без обледенения; в) в виде зависимостей КПМ от частоты

## Заключение

Результаты эксперимента показали, что существует высокая вероятность обледенения БЛА (в рамках проведения экспериментальных исследований в зимний период) в естественных условиях его эксплуатации. Такое воздействие на АУ канала управления приводит к ухудшению характеристик радиотехнического тракта во всем рабочем диапазоне частот, что обусловлено отсутствием согласования между АУ и приемо-передающим модулем и приводит к уменьшению дальности радиосвязи. Для решения данной проблемы была предложена новая методика синтеза согласующих устройств, которая позволила согласовать АУ и приемо-передающий модуль канала управления БЛА и обеспечить уменьшение потерь передаваемой мощности до 25% в условиях обледенения БЛА.

## Литература

1. Исаев В.О., Дубовик И.А.. Влияние температурного режима на характеристики мобильных антенных устройств. *XIV Машеровские чтения: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова. 2020. С.31-33.
2. Бойкачев П.В., Дубовик И.А., Исаев В.О. Метод синтеза широкополосных устройств с оптимальной характеристикой коэффициента преобразования мощности, согласующих изменяющийся во времени импеданс нагрузки. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.1>
3. Асташкин Д.Г.. Концептуальные взгляды командования ВВС США на развитие беспилотной авиации. *II Научно-практическая конференция «Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами»*. Коломна. 2017. С.183-196.
4. Бойкачев П.В., Дубовик И.А., Исаев В.О. Результаты исследования влияния условий эксплуатации на импеданс антенных устройств радиостанций ОВЧ/УВЧ диапазонов. *«Вестник» ВАРБ*. 2019. №2(63). С.32-40.
5. Дубовик И.А., Бойкачев П.В.. Методика синтеза согласующих устройств для широкополосных радиотехнических устройств с нестабильным импедансом нагрузки на основе метода вещественных частот. *Доклады БГУИР*. 2021. №19(5). С.70-78. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-5-70-78>
6. Филиппович Г.А. *Широкополосное согласование сопротивлений*. Минск, Воен. акад. Респ. Беларусь. 175 с.
7. Свириденко А.А., Янцевич М.А. Методика широкополосного согласования нагрузок с сосредоточенными параметрами на основе обобщенной матрицы рассеяния. *Информационные технологии в образовании, науке и производстве: VI Международная научно-техническая интернет-конференция*. 2018.

8. Исаев В.О., Бойкачев П.В. Способ нахождения адекватных математических моделей радиотехнических устройств с нестабильным импедансом. *Метрология и приборостроение*. 2021. №1(92). С.9-16.
9. Исаев В.О., Бойкачев П.В. Аналитическое математическое моделирование входных характеристик радиотехнических систем. *Проблемы физики, математики и техники*. 2021. №3(48). С.88-95.
10. Косачев И.М., Нефедов Д.С. Методики расчета показателей достоверности и точности оцениваемых тактико-технических характеристик вооружения, военной и специальной техники. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2015. №1(46). С.107-135.
11. Исаев В.О., Дубовик И.А., Бойкачев П.В., Сутько А.А. Математическая модель радиотехнических устройств. *II Международная Научно-Практическая Конференция «Endless Light in Science»*. Нур-Султан, Казахстан. 2020. С.27-33.
12. Levenberg K. A method for the solution of certain problems in least squares. *Quarterly Applied of Matematics*. 1944. №2. P.164-168.
13. Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM Jornal on Applied Mathematics*. 1963. №11. P 431-441.
14. Бойкачев П.В., Дубовик И.А., Исаев В.О. Метод синтеза широкополосных устройств с оптимальной характеристикой коэффициента преобразования мощности, согласующих изменяющийся во времени импеданс нагрузки. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.1>

**Для цитирования:**

Бойкачев П.В., Сутько А.А., Дубовик И.А., Исаев В.О., Полещук М.И. Согласование антенного устройства канала управления и приемо-передающего модуля беспилотного летательного аппарата в условиях обледенения. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.6.6>