

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.317.361

### Сравнение частотного дискриминатора с измерителем частоты сигналов на основе совместного использования процедур скалярного пересечения и объединения

М.О. Лихоманов, Д.С. Сова, И.М. Гаврилов

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Российская Федерация

#### Аннотация

В работе с использованием реальных радиоприемных устройств и радиосигналов вещательных радиостанций проведена экспериментальная проверка теоретических положений относительно возможности сужения области обнаружения-оценивания частоты сигналов в частотных дискриминаторах за счет использования при их обработке процедур скалярного пересечения и объединения. Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности дальнейших исследований по направлению обработки сигналов с применением указанных процедур для повышения точности измерения параметров сигналов и помехозащищенности радиоэлектронных средств извлечения информации.

**Ключевые слова:** измерение частоты, частотный дискриминатор, скалярное пересечение, скалярное объединение

**Для цитирования.** Лихоманов М.О., Сова Д.С., Гаврилов И.М. Сравнение частотного дискриминатора с измерителем частоты сигналов на основе совместного использования процедур скалярного пересечения и объединения. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(1):58–63.

### Comparative Study of the Work of a Frequency Discriminator with Frequency Counter Based on Combined Use of Radio Signal Scalar Crossing and Merging Operations

Mikhail O. Likhomanov, Dmitrii S. Sova, Igor M. Gavrillov

Military Educational and Scientific Center of the Air Forces of the Air Force Academy Named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russian Federation

#### Abstract

In the work, the real radio receivers and radio signals of broadcasting radio stations have been used to experimentally verify the theoretical provisions regarding the possibility of refining the domain of signal frequency detection-evaluation in the frequency discriminators by using the scalar crossing and merging operations during signal processing. Upon the obtained results, the conclusion was made about the significance of further research on signal processing by using the above mentioned operations to improve the accuracy of signal parameter measurements and enhance noise immunity of radio-electronic means of information extraction.

**Keywords:** frequency measurement, frequency discriminator, scalar crossing, scalar merging

**For Citation.** Likhomanov MO, Sova DS, Gavrillov IM. Comparative Study of the Work of a Frequency Discriminator with Frequency Counter Based on Combined Use of Radio Signal Scalar Crossing and Merging Operations. *Young Researcher of Don*. 2025;10(1):58–63.

**Введение.** В фильтровом и дискриминаторном способах измерения частоты сигналов область обнаружения и оценивания параметра формируется с помощью фильтров: для одиночного фильтра она задается его полосой пропускания; для частотного дискриминатора область формируется двумя взаимно расстроенными полосовыми фильтрами, общая частота настройки которых соответствует точке пересечения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтров.

Частотные дискриминаторы преобразуют отклонения частоты сигнала от некоторого известного значения в напряжение, пропорциональное величине и знаку этого отклонения [1, 2]. Типовая структурная схема частотного дискриминатора представлена на рис. 1 а, вид его дискриминационной характеристики — на рис. 1 б.

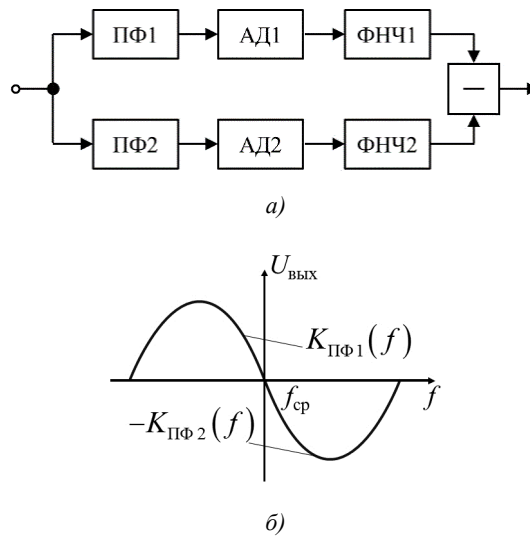


Рис. 1. Частотный дискриминатор: а — структурная схема; б — дискриминационная характеристика

На рис. 1 введены следующие обозначения: ПФ — полосовые фильтры, АД — амплитудные детекторы, ФНЧ — фильтры нижних частот. На рис. 1 б показана зависимость выходного напряжения схемы  $U_{\text{вых}}$  от частоты входного сигнала для заданных АЧХ полосовых фильтров  $K_{\text{ПФ}}(f)$ .

Ширина области обнаружения-оценивания фильтрового способа определяется полосой пропускания фильтра, а определение частоты происходит по отклику одного фильтра из их набора, который перекрывает весь диапазон рабочих частот измерителя.

В дискриминаторном способе область обнаружения-оценивания параметра уже, а крутизна результирующей АЧХ выше, что достигается пересечением АЧХ расстроенных относительно друг друга полосовых фильтров. Уровень пересечения АЧХ фильтров выбирается, как правило, на уровне 0,5 от максимального значения АЧХ фильтров и объясняется наибольшей крутизной результирующей характеристики в соответствующей равносигнальной точке. Выбор такого низкого уровня является причиной характерного недостатка способа — больших энергетических потерь сигнала в процессе его обработки.

В настоящей статье предложено применение процедур скалярного пересечения и объединения [3] для формирования узкой области обнаружения и оценивания частоты сигналов в схеме частотного детектора. При этом уровень пересечения АЧХ расстроенных фильтров можно выбирать порядка 0,8–0,9 от максимума. Это позволяет повысить точность измерения и снизить энергетические потери при обработке сигнала.

Модифицированная схема дискриминатора представлена на рис. 2.

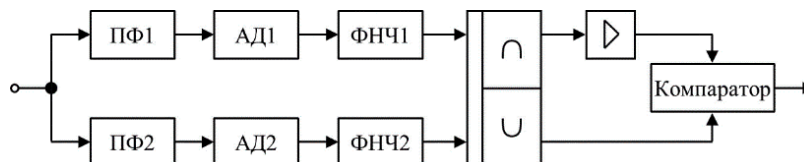


Рис. 2. Модифицированная схема частотного дискриминатора

Цель работы — проверка на практике работоспособности предлагаемой схемы и сравнение ширины ее области обнаружения-оценивания параметра с аналогичной для известной схемы частотного детектора.

**Основная часть.** В ходе работы собрана аппаратно-программная платформа в составе программно-определяемого радиоприемного устройства RTL-SDR, управляющего персонального компьютера под управлением системы Windows 7, и программы обработки, разработанной в среде визуального программирования GNU Radio.

Потоковый граф схемы исследования представлен на рис. 3. Обозначения блоков и масштаб рисунка, к сожалению, не позволяют детально рассмотреть все функциональные связи, поэтому требуются некоторые пояснения, которые касаются только основных элементов потокового графа, необходимых для понимания работы, а упрощенная схема исследования представлена на рис. 4.

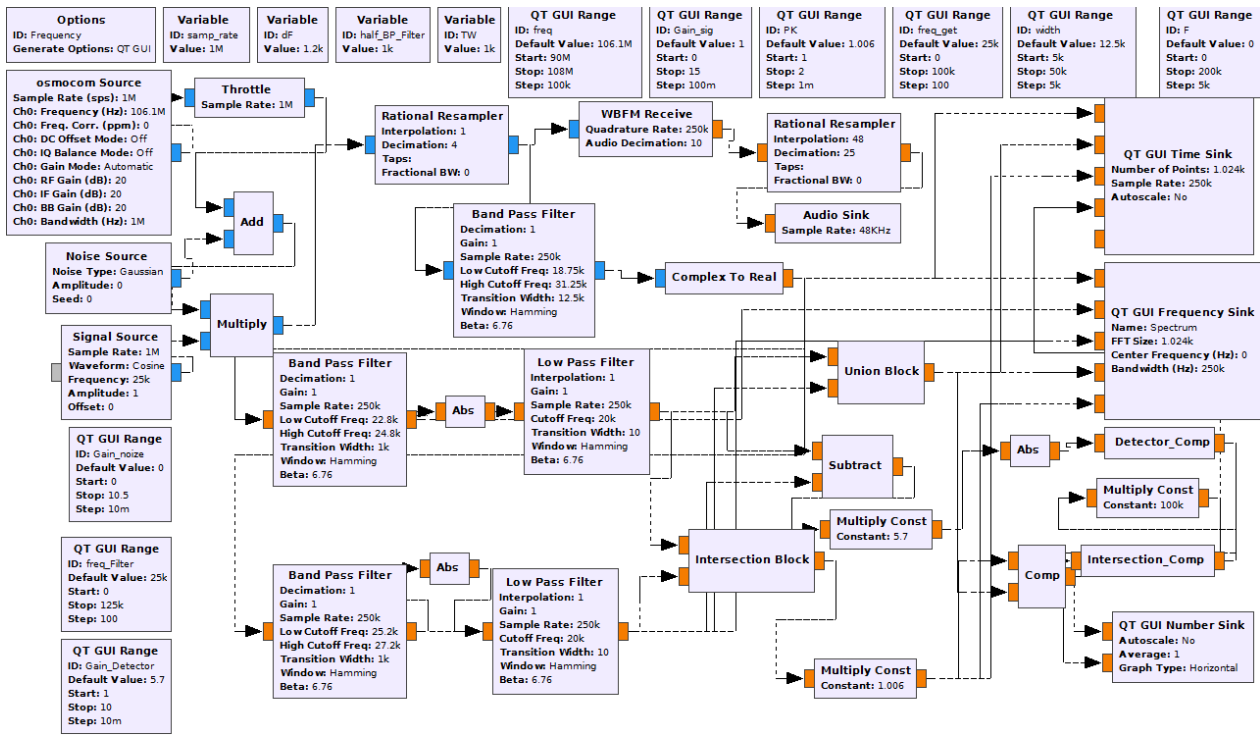


Рис. 3. Поточковый граф программной части радиоприемного устройства

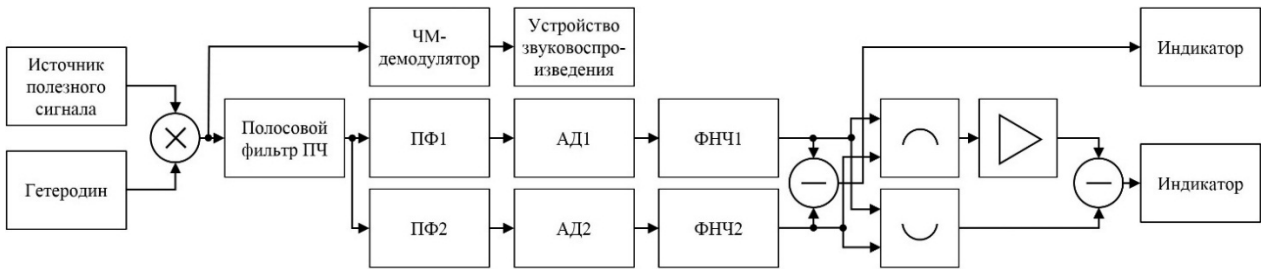


Рис. 4. Упрощенная схема исследования

В потоковом графе в качестве источника выступает блок «osmocom Source», который обеспечивает оцифровку и перенос полезного сигнала на нулевую частоту. Для исследования использовался сигнал вещательной FM-радиостанции на частоте 107,2 МГц. Этот сигнал с помощью программного преобразователя частоты (ПЧ), состоящего из гетеродина «Signal Source», блока умножения «Multiply» и фильтра промежуточной частоты «Band Pass Filter», преобразовывается на частоту 25 кГц. С выхода преобразователя сигнал направляется на демодулятор и устройство звуковоспроизведения для слухового контроля. Для улучшения характеристик демодуляции целесообразно установить еще один полосовой фильтр перед демодулятором.

С выхода фильтра ПЧ сигнал поступает на схемы измерения частоты. Одна из этих схем представляет собой известный частотный дискриминатор, а другая — предложенный измеритель, основанный на процедурах скалярного пересечения и объединения. Общими для обеих схем измерения, как показано на сравнении рис. 1, 2 и 4, являются полосовые фильтры ПФ1 и ПФ2, настроенные на определённую частоту, что определяется требуемой крутизной результирующей амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) измерителя. Эти фильтры реализованы двумя блоками «Band Pass Filter» в потоковом графе. Также используются амплитудные детекторы АД1 и АД2, выполненные с помощью двух блоков «Abs», а фильтры нижних частот ФНЧ1 и ФНЧ2 реализованы двумя блоками «Low Pass Filter».

Сигналы с выходов ФНЧ1 и ФНЧ2 направляются на устройство сравнения и индикации частотного дискриминатора, а также на блоки, реализующие процедуры скалярного пересечения и объединения. Усиленные сигналы пересечения и объединения также поступают на входы устройства сравнения и индикации. Уровни напряжений на индикаторах пропорциональны отклонению частоты настройки соответствующих измерителей от несущей частоты полезного сигнала.

На рис. 5 представлена работа схем измерения в равных условиях: для частотного дискриминатора и предложенной схемы используются одни и те же фильтры согласно схеме на рис. 4, а также один и тот же уровень пересечения амплитудно-частотных характеристик фильтров. Напряжения индикаторов при настройке на частоту излучения сигнала радиостанции приводятся к одному уровню за счет подбора коэффициентов усиления устройств сравнения.

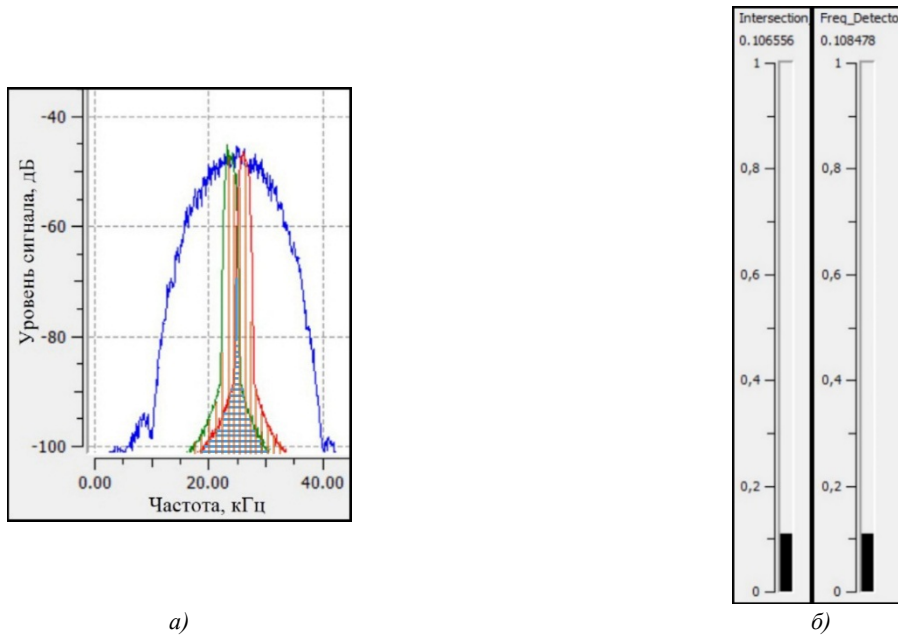


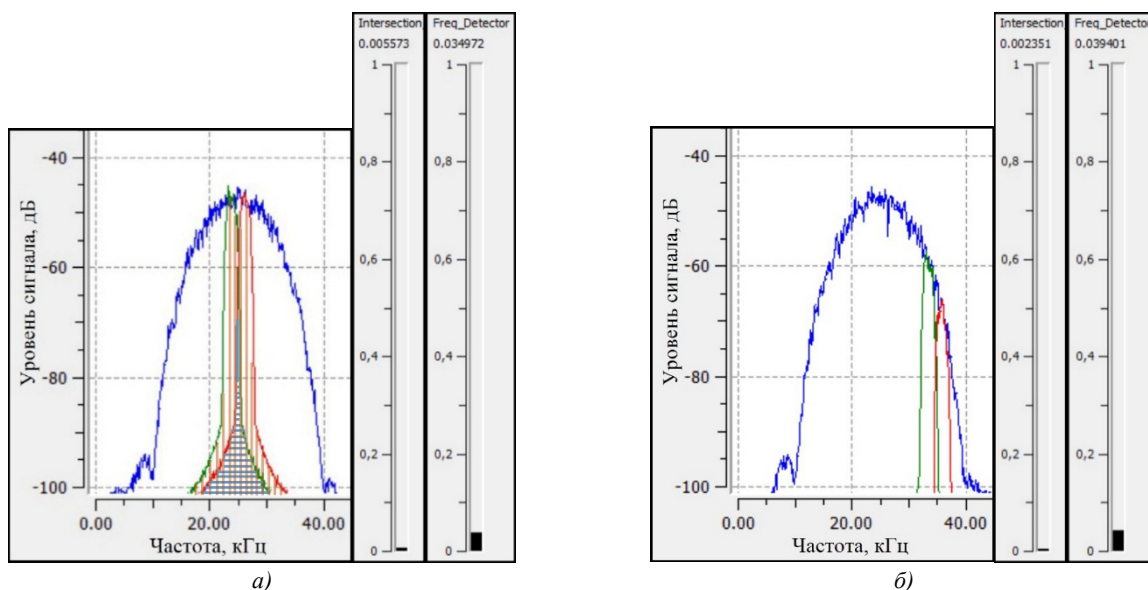
Рис. 5. Работа схем измерения при настройке на частоту сигнала:  
 а — анализатор спектра; б — индикаторы схем измерения

Широкий график на рис. 5 соответствует спектру сигнала с выхода фильтра ПЧ, узкие левый и правый графики соответствуют спектрам сигналов с выходов фильтров ПФ1 и ПФ2.

В отношении предложенной схемы измерения стоит отметить, что спектр сигнала пересечения в данном случае будет соответствовать заштрихованной области под графиками ПФ1 и ПФ2 горизонтальными линиями, а объединения — вертикальными. Встречное формирование указанных частотных характеристик снизу и сверху повышает крутизну результирующей АЧХ схемы измерения, а установка коэффициента усиления сигнала пересечения позволяет манипулировать шириной области обнаружения и оценивания частоты, вероятностью обнаружения, ложного срабатывания и другими показателями измерителя в зависимости от условий измерения.

Идея сравнения двух измерителей состоит в демонстрации сужения области обнаружения и оценивания частоты сигнала за счет повышения крутизны АЧХ. Для этого схема исследования изначально настроена на частоту 25 кГц, соответствующей частоте полезного сигнала после ПЧ (рис. 5 а). Сигналы индикаторов обеих схем при этом практически равны и составляют около одной десятой относительно условного максимума (рис. 5 б).

Далее проведена совместная отстройка фильтров ПФ1 и ПФ2 вниз и вверх, как представлено на рис. 6.



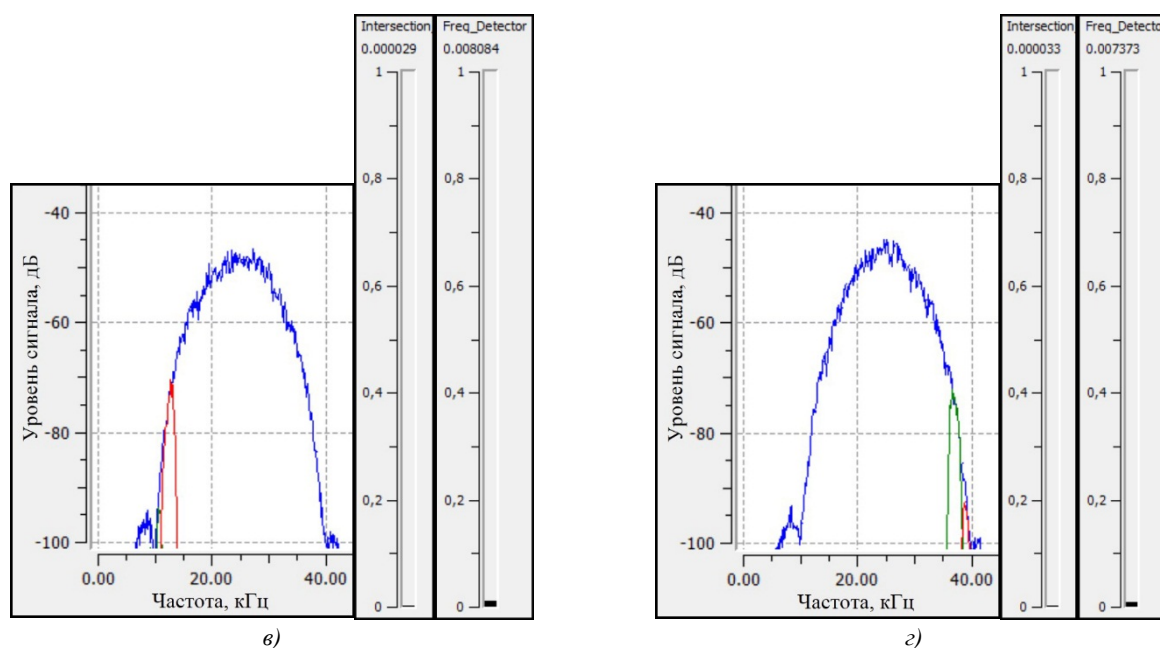


Рис. 6. Результаты работы схем при их отстройке до достижения заданного порога срабатывания: *а* — левая отстройка предложенной схемы; *б* — правая отстройка предложенной схемы; *в* — левая отстройка известной схемы; *з* — правая отстройка известной схемы

При этом условным нижним порогом срабатывания схем, при котором считается, что сигнал пропал, установлено значение индикатора, равное 0,008 от максимального уровня.

Достижение заданного порога для предложенной схемы наступило при отстройке до 14,8 кГц и 34,8 кГц соответственно. Для частотного дискриминатора порог достигнут только при отстройке до 11,1 кГц и 38,4 кГц соответственно.

**Заключение.** Проведенный эксперимент показал работоспособность предложенной схемы измерения частоты сигналов в реальных условиях, а также выигрыш в ширине области обнаружения-оценивания частотного параметра по сравнению с известным частотным дискриминатором. Можно сделать вывод о целесообразности проведения дальнейших исследований применения процедур скалярного пересечения и объединения в обработке сигналов с целью повышения помехозащищенности радиоэлектронных средств извлечения информации.

#### Список литературы

1. Куприянов А.И., Сахаров А.В. *Радиоэлектронные системы в информационном конфликте*. Москва: Вузовская книга; 2003. 528 с.
2. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. *Радиомониторинг: задачи, методы, средства*. 4-е изд., испр. Под ред. А.М. Рембовского. Москва: Горячая линия Телеком; 2019. 640 с.
3. Гордиенко В.И., Дубровский С.Е., Рюмшин Р.И., Фенев Д.В. Универсальный многофункциональный структурный элемент систем обработки информации. *Радиоэлектроника. Изв. ВУЗов*. 1998;3:12–20.

#### Об авторах:

**Михаил Олегович Лихоманов**, кандидат технических наук, преподаватель кафедры противодействия техническим средствам разведки Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394003, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 153), [likhomanovmikhail@mail.ru](mailto:likhomanovmikhail@mail.ru)

**Дмитрий Сергеевич Сова**, курсант Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394003, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 153), [jampfy@mail.ru](mailto:jampfy@mail.ru)

**Игорь Михайлович Гаврилов**, научный сотрудник Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394003, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 153), [neonspider@mail.ru](mailto:neonspider@mail.ru)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

***About the Authors:***

**Mikhail O. Likhomanov**, Can.Sci. (Engineering), Teacher of the Counteraction to Technical Means of Intelligence Department, Military Educational and Scientific Center of the Air Forces of the Air Force Academy Named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin (153, Krasnoznamennaya Str., Voronezh, 394003, Russian Federation), [likhomanovmikhail@mail.ru](mailto:likhomanovmikhail@mail.ru)

**Dmitrii S. Sova**, Cadet of the Military Educational and Scientific Center of the Air Forces of the Air Force Academy Named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin (153, Krasnoznamennaya Str., Voronezh, 394003, Russian Federation), [consultboris@mail.ru](mailto:consultboris@mail.ru)

**Igor M. Gavrilov**, Researcher of the Military Educational and Scientific Center of the Air Forces of the Air Force Academy Named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin (153, Krasnoznamennaya Str., Voronezh, 394003, Russian Federation), [neonspider@mail.ru](mailto:neonspider@mail.ru)

***Conflict of Interest Statement:*** the authors do not have any conflict of interest.

***All authors have read and approved the final manuscript.***