

УДК 621.396:681.34

А.В. ТОЦКИЙ, В.В. НАУМЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ БИСПЕКТРАЛЬНО-ОРГАНИЗОВАННОЙ МОДУЛЯЦИИ**

*Предложен способ повышения помехоустойчивости цифровой системы связи, основанный на биспектрально-организованной модуляции и процедуре демодуляции с использованием новой тестовой статистики обнаружения сигнала в виде пикового значения оценки амплитудного биспектра наблюдения. Представлены результаты расчетов вероятности появления ошибочного бита в широких диапазонах изменений отношения энергии бита к спектральной плотности аддитивного гауссова шума и вероятности импульсного шума, демонстрирующие улучшение показателей помехоустойчивости предложенного способа по сравнению с классической частотной модуляцией и тестовой статистикой обнаружения сигнала в виде максимума корреляционного интеграла.*

**Ключевые слова:** помехоустойчивость, спектральная плотность, биспектр, триплет.

**Введение**

Помехоустойчивость является одной из важнейших характеристик современных систем передачи информации. Способы ее повышения при фиксированной скорости передачи сообщений представляются важной проблемой в системах цифровой связи.

В настоящей статье предлагается подход к повышению помехоустойчивости, в основе которого лежат новый биспектрально-организованный вид модуляции и метод демодуляции в цифровой системе связи с использованием тестовой статистики обнаружения сигналов на фоне шумов в виде пикового значения оценки амплитудного биспектра (биамплитуды) принятого колебания.

Моментная функция третьего порядка наблюдения и ее преобразование Фурье – биспектр широко используются в цифровой обработке сигналов при решении задач обнаружения и восстановления негауссовых процессов, наблюдаемых в аддитивном гауссовом шуме, а также распознавания образов и различения сигналов в системах радиолокации, астрономии, обработки биомедицинских сигналов и других приложениях [1]. Метод биспектральной оценки позволяет выявить в наблюдении такие зависимости и свойства, которые невозможно определить, используя традиционные статистики второго порядка – корреляционную функцию и спектральную плотность. К достоинствам метода биспектральной обработки сигналов относятся возможность выявления и оценивания фазовых взаимосвязей спектральных компонент в наблюдении, высокая помехоустойчивость по отношению к аддитивному гауссову шуму и инвариантность к задержке сигнала

[2]. Данные достоинства лежат в основе предлагаемого в настоящей статье способа улучшения помехоустойчивости цифровой системы связи, когда информацию при передаче сообщения «закладывают» не в виде классических изменений амплитуды, частоты или фазы несущей, а в виде двух ортогональных частотных триплетов (троек частот) таких, что одна из частот в каждом триплете равна сумме двух других. Процесс демодуляции сводится к решению двухальтернативной задачи обнаружения триплета на фоне шума, когда правило принятия решения сводится к оценке максимума модуля биспектра в двумерном частотном пространстве.

Идеологию предлагаемого подхода продемонстрируем с помощью следующего примера. Рассмотрим процесс в виде следующей суммы шести гармонических составляющих

$$x(i) = \sum_{k=1}^6 \cos(2\pi f_k i + \varphi_k), \quad (1)$$

где частотные связи заданы как  $f_3 = f_1 + f_2$  и  $f_6 = f_4 + f_5$ ;  $\varphi_1, \dots, \varphi_6$  – фазы, которые полагаются независимыми случайными величинами с равномерным законом распределения в интервале  $[0, 2\pi]$ , причем,  $\varphi_6 = \varphi_4 + \varphi_5$ , т.е. спектральные компоненты  $f_4$  и  $f_5$  имеют фазовые связи.

Спектральная плотность  $P_x(f)$  рассматриваемого процесса (см. рис. 1, а) содержит шесть пиков на каждой из шести частот, присутствующих в процессе (1). Следовательно, поведение функции  $P_x(f)$  не позволяет ответить на вопрос: какие спектральные компоненты независимы, а какие из них имеют фазовые связи?

Амплитудный биспектр  $|\dot{B}_x(f_1, f_2)|$  (биамплитуда) процесса (1) равен

$$|\dot{B}_x(f_1, f_2)| = |\dot{X}(f_1)| |\dot{X}(f_2)| |\dot{X}^*(f_1 + f_2)|, \quad (2)$$

где  $|\dot{X}(f)|$  – модуль преобразования Фурье процесса (1).

На рис. 1, б представлен график функции (2), которая равна нулю на всей бичастотной плоскости (p,q) за исключением единственной точки с координатами  $(f_4, f_5)$ , где наблюдается соответствующий пик. Следовательно, биспектр служит чувствительным индикатором наличия фазовых зависимостей в исследуемом процессе.

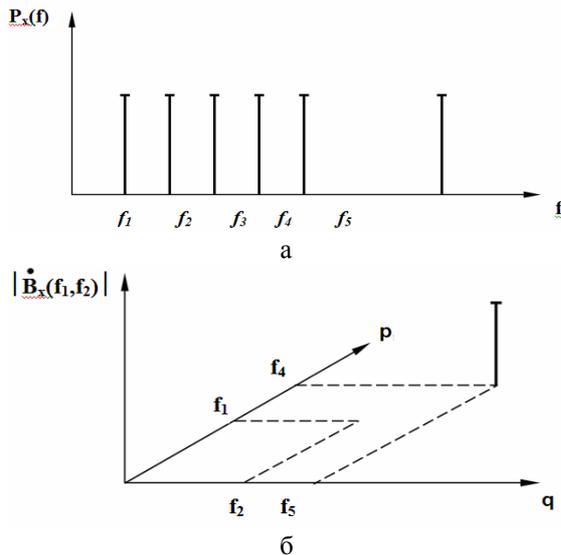


Рис. 1. Спектральная плотность  $P_x(f)$  – а и амплитудный биспектр  $|\dot{B}_x(f_1, f_2)|$  – б процесса (1)

Вспользуемся данным свойством для формирования ортогональных модулирующих сигналов в цифровой системе связи.

### Предлагаемый метод биспектрально-организованной модуляции/демодуляции

Представим предлагаемые модулирующие сигналы, ориентируясь на стандартный [3] формат частотной манипуляции (FSK) при двоичной передаче данных, в виде логического «0»:

$$s_0(t) = A_0 \sum_{k=1}^3 \cos(2\pi f_{0k} t + \varphi_{0k}), \quad (2a)$$

и логической «1»:

$$s_1(t) = A_0 \sum_{k=1}^3 \cos(2\pi f_{1k} t + \varphi_{1k}), \quad (2б)$$

где  $f_{03}=f_{01}+f_{02}$ ;  $\varphi_{03} = \varphi_{01} + \varphi_{02}$ ;  $f_{13}=f_{11}+f_{12}$ ;  $\varphi_{13} = \varphi_{11} + \varphi_{12}$ .

На рис. 2 приведена блок-схема биспектрально-организованного модулятора.

На вход электронного ключа (см. рис. 2) поступает цифровой сигнал  $x(t)$ , соответствующий последовательности битов в передаваемом сообщении. В зависимости от поступившего бита «0» или «1»

ключ принимает соответственно верхнее или нижнее положение. Затем сигнал, разделенный на  $x_0(t)$  и  $x_1(t)$ , что соответствует передаче «0» или «1», поступает на умножитель, где формируются колебания (2a) или (2б), модулирующие несущую  $s(t)$ .

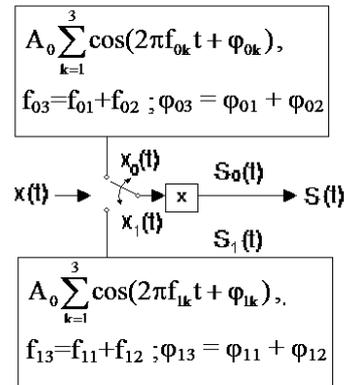


Рис. 2. Структура модулятора:  $x(t)$  – поток битов;  $s(t)$  – несущая

Следует обратить внимание на то, чтобы частотные триплеты  $f_{03}=f_{01}+f_{02}$  и  $f_{13}=f_{11}+f_{12}$  в (2a, б) были заданы таким образом, чтобы величина пикового значения модуля биспектра сигнала  $s_0(t)$  «хорошо» отличалась от пикового значения модуля биспектра сигнала  $s_1(t)$ , т.е. необходимо обеспечить требуемую ортогональность оценки биамплитуды в двумерном частотном пространстве.

На рис. 3 представлена блок-схема демодулятора, реализующая процесс обнаружения.

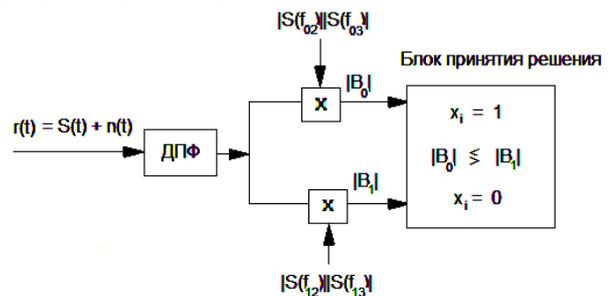


Рис. 3. Блок-схема биспектрального демодулятора

После понижения частоты на вход демодулятора поступает аддитивная смесь полезного сигнала и шума  $n(t)$ :

$$r(t) = s_i(t) + n(t), i = 0, 1 \quad (3)$$

Предлагаемый процесс демодуляции сводится к следующим процедурам обработки.

1) Расчет преобразования Фурье наблюдения (3):

$$\hat{R}_i(f) = \int_0^{T_b} [s_i(i)+n(t)] e^{-j2\pi ft} dt, \quad (4)$$

где  $T_b$  – длительность бита.

2) В двух опорных каналах демодулятора (см. рис. 3) «защиты» в памяти прототипы – преобразо-

вания Фурье «чистых», т.е. без шума сигналов (2а) и (2б) в виде:

$$\dot{S}_0(f) = \int_0^{T_b} s_0(t) e^{-j2\pi ft} dt, \quad (5a)$$

$$\dot{S}_1(f) = \int_0^{T_b} s_1(t) e^{-j2\pi ft} dt. \quad (5б)$$

3) Расчет оценок биамплитуды с использованием прототипов (5а) и (5б)

$$|\dot{B}_0(f_{01}, f_{02})| = |\bar{R}_i(f_{01})| |\dot{S}_0(f_{02})| |\dot{S}_0^*(f_{01}+f_{02})|, \quad (6a)$$

$$|\dot{B}_1(f_{11}, f_{12})| = |\bar{R}_i(f_{11})| |\dot{S}_1(f_{12})| |\dot{S}_0^*(f_{11}+f_{12})|. \quad (6б)$$

4) Сравнение между собой величин амплитуды функций (6а) и (6б). Пиковое значение функции (6а) должно появиться в соответствии с (2а) на биспектральной плоскости в точке с координатами  $(f_{01}, f_{02})$ , а пиковое значение функции (6б) – в соответствии с (2б) на биспектральной плоскости в точке с координатами  $(f_{11}, f_{12})$ . Решение об обнаружении «0» или «1» на фоне шума принимают по результатам сравнения между собой данных пиковых значений.

### Результаты статистического компьютерного моделирования

Для исследования выигрыша, который может быть реализован с помощью предлагаемого способа повышения помехоустойчивости, было проведено компьютерное моделирование передачи цифрового сообщения в цифровой системе связи в канале с шумом.

При моделировании использовались сигналы FSK с тонами, равными  $f_1 = 1200$  Гц и  $f_2 = 1800$  Гц и триплеты  $f_{03}=f_{01}+f_{02}$  ( $f_{01} = 400$  Гц,  $f_{02} = 800$  Гц) и  $f_{13}=f_{11}+f_{12}$  ( $f_{11} = 700$  Гц,  $f_{12} = 1100$  Гц). Начальные фазы в триплетях полагались равными нулю.

На рис. 4, 5 и 6 приведены примеры реализаций тестового сигнала на входе демодулятора, наблюдаемого: в отсутствие шума, на фоне аддитивного гауссова шума и на фоне смеси гауссова и импульсного шумов соответственно.

Алгоритм вычисления вероятности появления битовой ошибки для биспектрально-организованного вида модуляции сводится к следующей последовательности процедур:

- задание количества передаваемых бит и формирование цифрового сообщения;
- задание параметров триплет;
- формирование модулирующих сигналов (2а, б);
- БПФ «чистых» сигналов (5а, б);
- генерирование гауссова/импульсного шума;
- БПФ смеси сигнала и шума (4);
- расчет оценок биамплитуды (6а) и (6б);
- сравнение величин функций (6а) и (6б) и принятие решения о значении поступившего бита;

- сравнение значений посылаемого в эфир и принятого бита и расчет количества ошибок;
- расчет вероятности появления битовой ошибки путем деления количества ошибочных битов на общее количество бит.

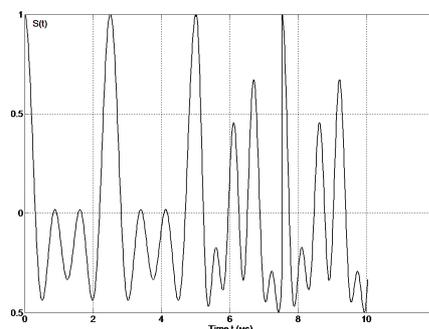


Рис. 4. Тестовое сообщение [0, 0, 1, 1] на входе демодулятора: в отсутствие шума,  $A_0=1$  мВ

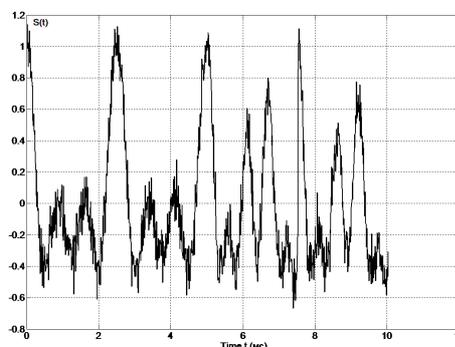


Рис. 5. Тестовый сигнал [0 0 1 1] на входе демодулятора с  $A_c=1$  мВ на фоне аддитивного гауссова шума при  $E_b / N_0 = 10$  dB

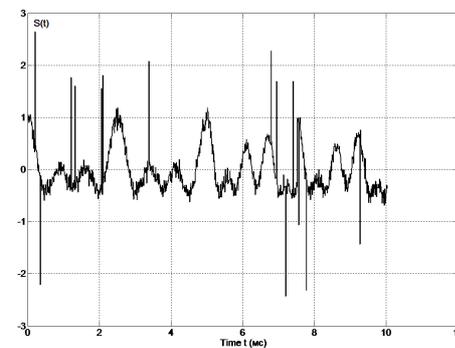


Рис. 6. Тестовый сигнал [0 0 1 1] на входе демодулятора с  $A_0=1$  мВ на фоне смеси аддитивного гауссова шума при  $E_b / N_0 = 10$  dB и импульсного шума с вероятностью 5% и амплитудой импульсов 2 мВ

Оценка повышения помехоустойчивости проводилась с помощью расчетов вероятности появления битовой ошибки в цифровом сообщении на выходе демодулятора. Вероятность правильного обнаружения рассчитывалась в зависимости отношения сигнал-шум на входе демодулятора, которое изменялось в пределах от  $-30$  до  $30$  Дб для гауссова ад-

дитивного шума, а также в зависимости от вероятности импульсного шума.

На рис. 7, 8, 9 и 10 приведены графики вероятности появления ошибочного бита, полученные при обнаружении тестового сообщения, состоящего из  $2^{10}$  случайных бит, при классическом способе частотной манипуляции и при предлагаемом способе биспектрально-ориентированной модуляции в условиях воздействия гауссова и смеси гауссова и импульсного шума соответственно (кривая +--+ соответствует FSK, кривая о-о-о – предлагаемый способ). Амплитуда импульсов помехи типа «соль и перец» [4] равна 2 мВ; вероятность появления отрицательных и положительных импульсов одинакова и равна  $p_{\text{imp}} = 5\%$ , 25% или 50%.

Расчет вероятности появления битовой ошибки проводился путем сравнения переданных и полученных бит и вычисления отношения числа неверно принятых бит к общему их числу при определенном отношении сигнал-шум.

Результаты расчетов вероятностей, представленные на данных графиках, получены по 30 независимым испытаниям, т.е. по 30 сеансам передачи тестового сообщения в канале с шумом. Помехоустойчивость предлагаемого метода сравнивалась с помехоустойчивостью обычной двоичной системы связи с FSK модуляцией.

Из рис. 7 следует, что при аддитивном гауссовом шуме в двоичной системе связи вероятность безошибочного распознавания символов исходного тестового сообщения для FSK модуляции достигается при 11 дБ, а для способа биспектрально-ориентированной модуляции – 3 дБ. Следовательно, выигрыш предлагаемого метода, оцениваемый по пороговому отношению сигнал-шум, составляет 8 дБ.

Из рис. 8, 9 и 10 следует, что при воздействии аддитивного гауссова и импульсного шума вероятность безошибочного принятия сообщения для предлагаемой тестовой статистики достигается при меньшем отношении сигнал-шум, чем для FSK. При наличии импульсного шума с  $A_{\text{imp}} = 2$  мВ и  $p_{\text{imp}} = 5\%$  для биспектрально-ориентированной модуляции выигрыш по сравнению с FSK составляет 8 дБ. При увеличении вероятности появления импульсного шума выигрыш возрастает.

Следовательно, предлагаемый метод повышения помехоустойчивости обеспечивает ощутимый выигрыш в условиях присутствия смеси гауссова и импульсного шумов.

### Заключение

Предложен метод повышения помехоустойчивости цифровой системы связи, основанный на свойствах биспектра.

Оценка выигрыша в помехоустойчивости проведена статистическим моделированием передачи и обнаружения тестового цифрового сообщения при наличии в канале передачи смеси гауссова и импульсного шума.

Результаты анализа зависимостей вероятности появления битовой ошибки от варьирования отношения сигнал-шум свидетельствуют о выигрыше, который может быть достигнут в результате предложенного способа биспектрально-организованной модуляции.

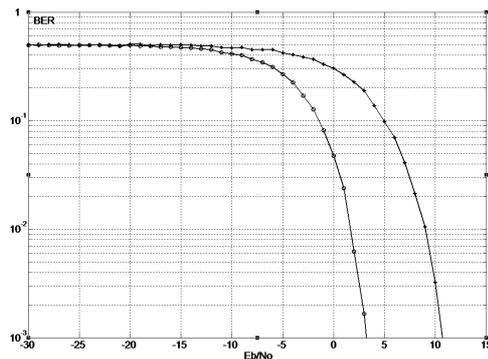


Рис. 7. Вероятности появления битовой ошибки при воздействии аддитивного гауссова шума

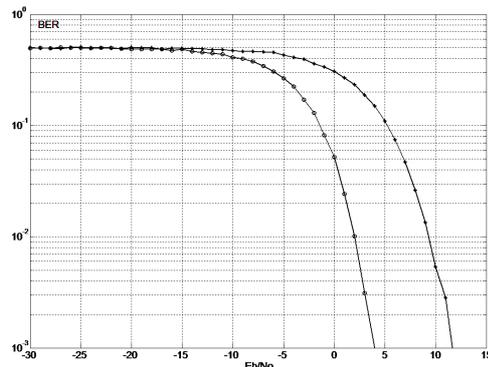


Рис. 8. Вероятности появления битовой ошибки при воздействии смеси аддитивного гауссова и импульсного шума:  $A_{\text{imp}} = 2$  мВ,  $p_{\text{imp}} = 5\%$

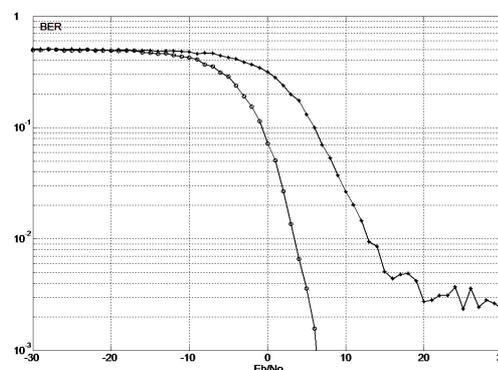


Рис. 9. Вероятности появления битовой ошибки при воздействии смеси аддитивного гауссова и импульсного шума:  $A_{\text{imp}} = 2$  мВ,  $p_{\text{imp}} = 25\%$

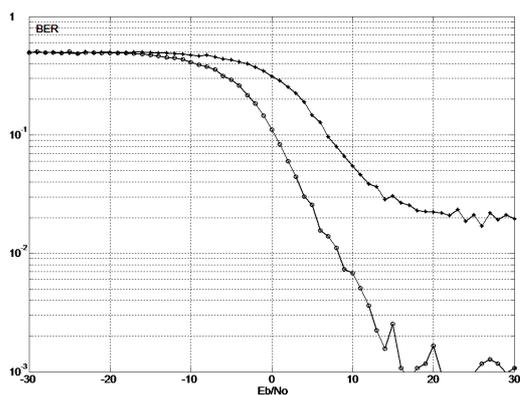


Рис. 10. Вероятности появления битовой ошибки при воздействии смеси аддитивного гауссова и импульсного шума:  
 $A_{\text{imp}} = 2 \text{ мВ}$ ,  $p_{\text{imp}} = 50\%$

## Литература

1. Зеленский А.А. Биспектральный анализ в приложении к цифровой обработке сигналов / А.А. Зеленский, В.В. Лукин, А.В. Тоцкий – Гл. 2 в кн. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях; под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – С. 92-173.
2. Nikias C.L.. Bispectral estimation: A digital signal processing framework / C.L. Nikias, M.R. Raghuveer // Proc. IEEE. – 1987. – Vol. 75, No. 7. – P. 869-891.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е изд.: Пер. с англ. / Б. Скляр. – М. Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
4. Astola J. Fundamentals of nonlinear digital filtering/ J. Astola, P. Kuosmanen. – CRC Press LLC, N.Y. Boca Raton, 1997. – 276 p.

Поступила в редакцию 7.06.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. приёма, передачи и обработки сигналов А.А. Зеленский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ БІСПЕКТРАЛЬНО-ОРГАНІЗОВАНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

*О.В. Тоцкий, В.В. Науменко*

Запропоновано метод підвищення завадостійкості цифрової системи зв'язку, заснований на біспектральноорганізованій модуляції та процедурі демодуляції з використанням нової тестової статистики виявлення сигналу у вигляді пікової величини оцінки амплітудного біспектру спостереження. Представлено результати розрахунків ймовірності з'явлення помилкового біту у широких діапазонах змін відношення енергії біту до спектральної густини адитивного гаусова шуму та ймовірності імпульсного шуму, що демонструють покращення показників завадостійкості запропонованого способу у порівнянні з класичною частотною модуляцією та тестовою статистикою виявлення сигналу у вигляді максимуму кореляційного інтегралу.

**Ключові слова:** завадостійкість, спектральна густина, біспектр, триплет.

## IMPROVING OF NOISE IMMUNITY IN DIGITAL COMMUNICATION SYSTEM BY USING BISPECTRUM-BASED MODULATION

*A.V. Totsky, V.V. Naumenko*

A method of improving the noise immunity of digital communication system based on bispectrum-organized modulation and demodulation procedure by using novel test signal detection statistic in the form of bispectrum magnitude peak is developed. The results of computations of the probability of bit error in a wide range of changes of bit energy to the spectral density of additive Gaussian noise ratios and the probability of impulsive noise demonstrate the improvement in noise immunity of the proposed method comparing to classical frequency modulation and signal detection test statistics in the form of the correlation integral maximum.

**Key words:** noise immunity, spectral density, bispectrum, triplet

**Тоцкий Александр Владимирович** – д-р техн. наук, доцент, проф. каф. приёма, передачи и обработки сигналов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Науменко Виктория Владимировна** – аспирант каф. приёма, передачи и обработки сигналов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.