

Bereznikov Dmitry Vladimirovich – Kazan Federal University, Higher Institute of Information Technology and Intelligent Systems; e-mail: bereznikovdmitry@gmail.com; 35, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russia; phone: +72213433; student.

Zakiev AUFAR Azatovich – e-mail: zaufar@it.kfu.ru; assistant.

Magid Evgeni Arkad'evich – e-mail: magid@it.kfu.ru; the department of intelligent robotics professor, head of department.

УДК 007.51:623.4.074

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-98-108

**В.А. Шурыгин, В.А. Серов, С.А. Устинов, А.В. Леонард, С.Е. Червонцев,
В.Н. Платонов, С.С. Мазлов**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ДОСЫЛА Артиллерийского снаряда в камору орудия

Целью работы является разработка и исследование метода контроля досыла артиллерийского снаряда в камору орудия и интеллектуальной системы контроля досыла по акустическому портрету. Существующий метод контроля досыла артиллерийского боеприпаса в камору орудия при раздельном способе заряжания основан на измерении скорости одного из элементов досылателя. Такой подход к контролю досыла не дает гарантированной надежности ввиду невозможности измерения скорости на конечном отрезке движения снаряда по инерции. Суть предложенного в статье метода заключается в возбуждении акустических колебаний в системе «снаряд – камора орудия» и выделении характерных акустических портретов (сигнатур) с их последующем анализом. Для исследования данного метода разработан экспериментальный стенд, имитирующий ствол орудия с камерой, и имитатор снаряда с различными обтюраторными поясками. Удар снаряда в момент заклинивания в конусе камеры или нанесенный извне возбуждает характерные акустические колебания, которые различаются для случаев надежного и недостаточного досыла. Для однозначной классификации событий надежного заклинивания и недостаточного досыла необходим выбор оптимального вектора признаков акустического портрета полученных аудиозаписей. Обычное спектральное преобразование позволяет выделить характерные частоты, однако использование набора таких спектральных составляющих в качестве классификационных признаков выбраны мел-частотные кепстральные коэффициенты. На основании набора таких коэффициентов с использованием искусственной нейронной сети осуществляется классификация степени заклинивания имитатора снаряда в стенде на три категории: «снаряд не заклинен», «недостаточный досыл снаряда», «снаряд заклинен». В результате обучения нейронной сети на значительной выборке аудиозаписей была достигнута точность классификации более 90%. Разработанный метод может быть применен в робототехнических комплексах, оснащенных артиллерийским вооружением, а также в других отраслях, например, в нефтегазовой промышленности для контроля стыковки сочленяемых труб.

Контроль досыла снаряда; виброакустический анализ; акустический портрет; искусственная нейронная сеть; мел-частотные кепстральные коэффициенты.

**V.A. Shurygin, V.A. Serov, S.A. Ustinov, A.V. Leonard, S.E. Chervoncev,
V.N. Platonov, S.S. Mazlov**

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF THE PROJECTILE FIXATION INSIDE THE GUN'S CHAMBER

The aim of the study is to develop a method for controlling the sending of an artillery shell to the gun's chamber using an acoustic portrait. The existing method for controlling the delivery of artillery ammunition to the gun's chamber with a separate loading method is based on measuring the speed of one of the elements of the rammer. Such an approach to the control didn't provide

guaranteed reliability due to the impossibility of measuring speed in the final segment of the projectile's inertia motion. At present, vibroacoustic methods of analysis are widely used in various fields of science and technology and can be extended to the problem under consideration. The essence of the method proposed in the article is to excite acoustic vibrations in the "projectile - gun chamber" system and to distinguish characteristic acoustic portraits (signatures) with their subsequent analysis. To study this method, a laboratory bench has been developed that imitates the barrel of a gun with a chamber, and a shell simulator with various obturator belts. A projectile impact at the moment of jamming in the chamber cone or applied externally, for example, on the gun's body, excites characteristic acoustic vibrations, which differ for cases of reliable and insufficient sending. In the developed stand, acoustic vibrations were excited by an external impact on the resonator and were recorded for subsequent analysis. For an unambiguous classification of events of reliable jamming and insufficient submission, it is necessary to select the optimal vector of signs of an acoustic portrait of the obtained audio recordings. The usual spectral conversion makes it possible to distinguish characteristic frequencies, however, the set of such spectral components is not suitable as classification features due to the significant array of data obtained as a result of this analysis, and also due to the inability of the Fourier transform to recognize short-term low-power bursts. Therefore, as the classification features were selected mel-frequency cepstral coefficients. Based on the set of such coefficients, using the artificial neural network, the degree of jamming of the projectile simulator in the stand was classified into three categories: "sleep-row is not jammed", "insufficient shell projectile", "projectile jammed". As a result of training the neural network on a significant sample of audio recordings, a classification accuracy of 90% was achieved. It is shown that the developed method of such vibroacoustic analysis can be applied in robotic artillery weapon control systems, as well as in other technical tasks, for example, in oil and gas production to control the docking of articulated main pipes.

Projectile sending control; vibroacoustic analysis; acoustic portrait; neural network; mel-frequency cepstral coefficients.

Введение. В артиллерийских орудиях среднего и крупного калибров обычно применяется раздельное заряжание, которое предполагает последовательную загрузку боеприпаса и метательного заряда в камеру. При этом заряжание снаряда включает два этапа: установка его на линию заряжания и досылка до закусывания ведущего пояска в конусе врезания камеры. В таком положении снаряд должен надежно удерживаться до начала выстрела. Ненадежный досыл приводит к утечке пороховых газов в обход снаряда, что существенно снижает его начальную скорость и одновременно увеличивает разгар ствола.

При ручном способе заряжания контроль досыла осуществляется субъективно заряжающим расчетом по звуку удара пояска снаряда о конус камеры. При этом существенную роль играет опытность заряжающего.

Другим способом контроля досыла в настоящее время является измерение скорости досылающего звена на участке разгона снаряда. Главным недостатком такого метода является невозможность контроля скорости снаряда на инерционном участке движения, где высока вероятность его «рыскания» и последующей потери ввиду этого первоначальной скорости [1].

Поэтому актуальной является задача надежного автоматического контроля досыла артиллерийского снаряда в камеру орудия.

Метод контроля досыла снаряда по акустическому портрету. В настоящее время методы виброакустического анализа широко применяются в различных областях, в том числе при контроле сварных соединений [2, 3], дефектоскопии [4, 5], в системах распознавания речи [6–8] и др. [9].

Современные достижения в области анализа и распознавания звуковых сигналов дают возможность использовать такие методы для решения поставленной задачи – контроля досыла снаряда по его звуковому портрету.

Предлагаемый метод можно разделить на два способа: контроль звука удара снаряда о конус врезания в момент закусывания и контроль по звуку внешнего механического удара по системе «снаряд-орудие» после завершения процесса заряжания. Второй способ представляется более надежным, так как позволяет провести контроль непосредственно перед срабатыванием ударно-спускового механизма.

Рассмотрим метод контроля досыла артиллерийского снаряда, в которой заключение о степени заклинивания боеприпаса формируется с помощью устройства анализа досыла. При этом возможны два варианта установки устройства анализа досыла [10], представленные на рис. 1.

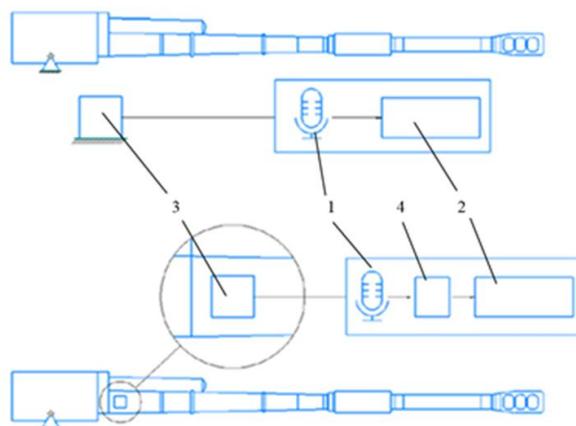


Рис. 1. Размещение устройства анализа досыла: 1 – микрофон; 2 – автоматическое аппаратно-программное устройство; 3 – устройство анализа досылки; 4 – устройство возбуждения акустических колебаний

При движении досылателя происходит включение устройства анализа досыла. Ввиду того что методика предполагает два варианта установки устройства, существует два способа записи звука. При установке устройства рядом с орудием, запись данных начинается с момента старта досылателя; при установке непосредственно на орудии, запись начинается после досылки снаряда с одновременным срабатыванием устройства возбуждения акустических колебаний.

Далее записанные с микрофона данные подвергаются анализу, который может быть осуществлен несколькими способами.

Первый способ предполагает применение дискретного преобразования Фурье и построение спектрограммы анализируемого аудиофайла с последующей ее обработкой сверточной нейронной сетью.

Второй способ предполагает вычисление мел-частотных кепстральных коэффициентов, частоты перехода через ноль, спектрального центроида и спектрального спада частоты. Вектор таких классификационных признаков подается на вход многослойной нейронной сети. Выбор нейронной сети для обработки обоснован ее способностью к обучению и к реконфигурации [11, 12].

Обучение нейронной сети производится подачей на ее вход выборки экспериментальных аудиофайлов с последующей проверкой на контрольной группе. Количество нейронов выходного слоя определяется либо числом категорий классификации, либо градацией усилий заклинивания.

Экспериментальные исследования. Для исследования предложенного метода был разработан экспериментальный стенд и проведен ряд экспериментов [13].

Экспериментальный стенд имитирует ствол артиллерийского орудия с люлькой, и представляет собой ствольную часть, расположенную в опоре. Вид экспериментального стенда в разрезе с установленными макетом снаряда и центрирующей втулкой представлен на рис. 2.

Обе части конструкции экспериментального стенда скреплены между собой болтовым соединением для моделирования закрепления ствола реального орудия. С дульной части ствольная часть (резонатор) имеет проточку для крепления съемника, которым осуществлялось выпрессовка макета снаряда. Казенная часть представляет собой фланец с просверленными глухими отверстиями для установки датчиков-микрофонов. К фланцу крепится съемник для запрессовки снаряда.

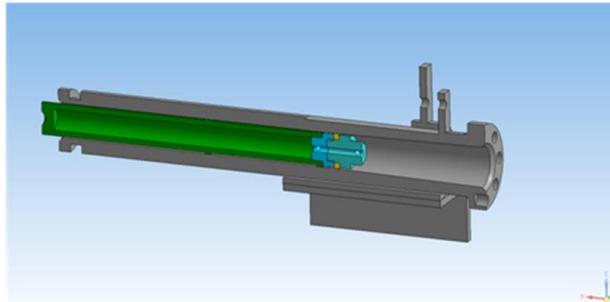


Рис. 2. Центрирование макета снаряда в стенде при запрессовке с помощью втулки (обозначена зеленым цветом)

В ходе эксперимента производилась запрессовка в резонатор макета снаряда с различными сменными кольцами, имитирующими обтюрационные пояски реального снаряда. В исследовании рассматривались кольца из различных материалов – алюминия, меди и бронзы. Симметричная форма макета снаряда позволяла производить его запрессовку любой стороной, что давало возможность использования каждого кольца раза без его переустановки. Для соосного размещения макета снаряда в ствольной части стенда применялась центрирующая втулка. Центрирование макета снаряда в стенде при запрессовке представлено на рис. 2 (центрирующая втулка представлена зеленым цветом).

Для измерения усилия запрессовки был изготовлен измеритель, состоящий из тензометрического датчика, размещенного в специальной втулке, согласующего устройства и программируемого микроконтроллера. Номинальная нагрузка тензодатчика – 100 кг, безопасная перегрузка 150 %, комплексная точность – 0,5 % (после калибровок и проверки 0,1 %). Согласующее устройство, к которому подключался тензометрический датчик, представляло собой 24-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на базе микросхемы HX711. Данные с модуля АЦП по последовательному интерфейсу передавались на микроконтроллер с управляющей программой для дальнейшей обработки. Данные с микроконтроллера передавались через конвертор по USB интерфейсу на компьютер. Внешний вид тензометрического измерителя усилий запрессовки представлен на рис. 3.

Для запрессовки макета снаряда он вместе с центрирующей втулкой помещался в резонатор с казенной части. Затем помещался тензометрический датчик в специальной втулке. Датчик упирался в макет снаряда, а съемник крепился на фланце резонатора и давил своим винтом на втулку датчика. Во время запрессовки производился контроль усилия. Процесс запрессовки макета снаряда в казенную часть ствола представлен на рис. 4.



Рис. 3. Внешний вид тензометрического измерителя усилий запрессовки:
1 – микроконтроллер; 2 – модуль АЦП; 3 – втулка; 4 – тензометрический датчик

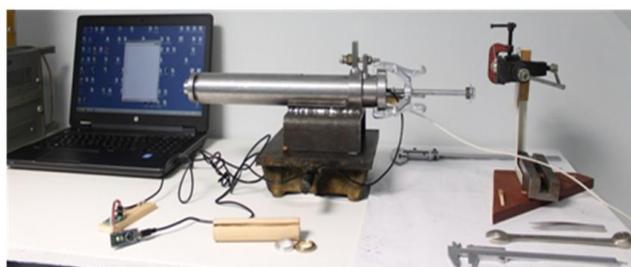


Рис. 4. Процесс запрессовки макета снаряда в казенную часть ствола экспериментального стенда

Для возбуждения акустических колебаний в резонаторе был применён маятник в виде стального шара диаметром 20 мм, подвешенный на двойной нити длиной 93 см на расстоянии 1 см до фланца резонатора. Шар маятника отводился на 20 см от места удара о фланец, и фиксировался в зажимном механизме. Для пуска шара механизм освобождал шар от удержания, и он совершал серию ударов о фланец резонатора, при этом производилась запись через электретный микрофон, находящийся в нижнем глухом отверстии фланца.

Все эксперименты проводились в нормальных климатических условиях. Для уменьшения возможных влияний посторонней вибрации экспериментальный стенд располагался на массивной плите, и изолировался от неё амортизаторами. Сама плита устанавливалась на стол также с использованием амортизаторов.

Каждое проведённое испытание с запуском маятника с различной степенью запрессовки макета снаряда производилось с 10-кратным повторением. Результаты измерений усилий выпрессовки при применении различных обтюрационных колец на макете снаряда представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений усилий выпрессовки при применении различных обтюрационных колец

Тип пояска	Усилие запрессовки, кгс				
	2	4	16	32	64
Алюминиевый	0,5	1	5	5	20
Бронзовый	1	2,5	9	17	30
Медный	0,2	2	9	12	23

Сигнал с микрофона подавался на звуковую карту персонального компьютера, запись производилась в программе Nero WaveEditor (режим – моно, несущая частота – 96 кГц, глубина кодирования – 32 бита). Полученные звуковые записи в wav-формате были визуализированы на ЭВМ для их первичной оценки.

После записи звуковых файлов был произведен их анализ и получены спектрограммы для случаев: пустого ствола, когда макет снаряда отсутствовал в стволе; ненадежного досыла, когда усилие запрессовки было недостаточным; заклиненного снаряда (надежного досыла) со значительным усилием запрессовки.

Образцы полученных спектрограммы для трех рассматриваемых случаев представлены на рис. 5–7 [13].

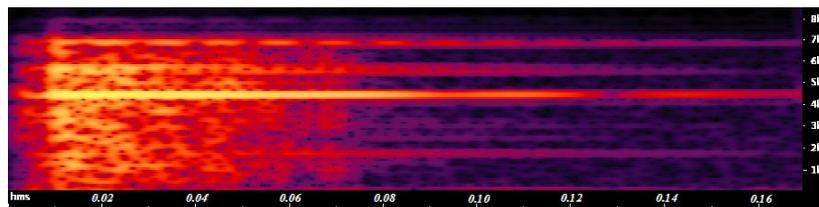


Рис. 5. Спектрограмма для случая «пустой ствол»

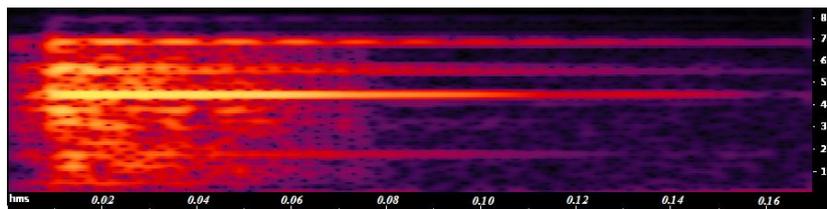


Рис. 6. Спектрограмма для случая «ненадежный досыл»

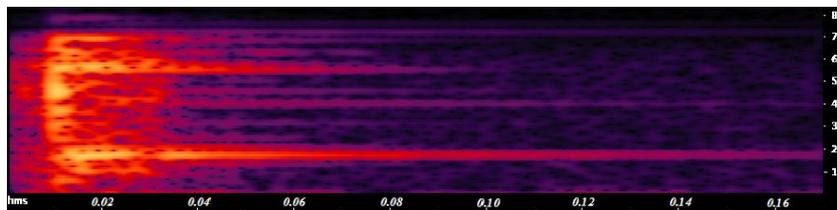


Рис. 7. Спектрограмма для случая «надежный досыл»

Анализ представленных спектрограмм позволяет сделать вывод о зависимости резонансных частот звука от положения макета снаряда в ствольной части. Так, для случая ненадежного досыла на спектрограмме видны характерные частоты со значениями приблизительно 4,5 кГц, 6 и 7 кГц, что объясняется свободным резонированием макета снаряда и отдельных частей ственда. В случае же надежного досыла, макет снаряда и ствол образуют единую резонирующую массу с меньшей резонансной частотой (около 1,5 кГц) чем пустой ствол.

Задачей рассмотренного метода контроля досыла является классификация записанных экспериментальных звуковых файлов по 3 категориям: «пустой ствол», «ненадежный досыл» и «надежный досыл». Такая классификация может быть выполнена с помощью искусственной нейронной сети. Решающую роль здесь играет выбор оптимального вектора характерных классификационных признаков, извлекаемых из экспериментальных аудиозаписей [14, 15].

При этом применение полученных спектрограммы для непосредственного анализа нейронной сетью нецелесообразно ввиду избыточного массива данных спектральных компонент.

В качестве вектора классификационных признаков выбраны мел-частотные кепстральные коэффициенты (MFCC) [16]. Анализ полученных экспериментальных аудиозаписей по мел-частотному кепстру позволяет выделить значительно меньший, но не менее информативный набор характерных признаков – мел-частотных кепстральных коэффициентов по сравнению с традиционным спектральным представлением [17–19]. Для вычисления таких коэффициентов каждая экспериментальная аудиозапись анализировалась в диапазоне частот от 0 до 8 кГц. Для перевода данного диапазона в мел-шкалу использовался ряд треугольных фильтров – в данном случае – 24 шт. Распределение собственных частот треугольных фильтров в рассматриваемом частотном диапазоне представлено на рис. 8.

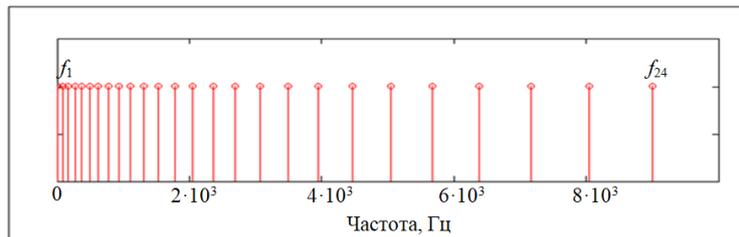


Рис. 8. Распределение собственных частот треугольных фильтров

Для каждого фильтра вычислялись энергетические коэффициенты [20]

$$\tilde{N}e_j = \ln \left(\sum_{k=0}^{N-1} (|F_k|^2 H_{j,k}) \right), \quad 0 \leq k < N-1, \quad 0 \leq j < M-1,$$

где F_k – преобразование Фурье k -го компонента; $H_{j,k}$ – весовой коэффициент j -го фильтра для k -го компонента; N – количество спектральных компонент; M – количество фильтров.

Затем вычислялись мел-частотных кепстральные коэффициенты. Полученные значения мел-частотных кепстральных коэффициентов для соответствующих событий представлены на рис. 10, 11.

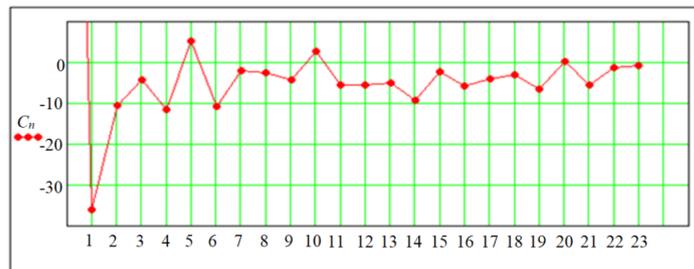


Рис. 9. Значения мел-частотных кепстральных коэффициентов для случая «пустой ствол»

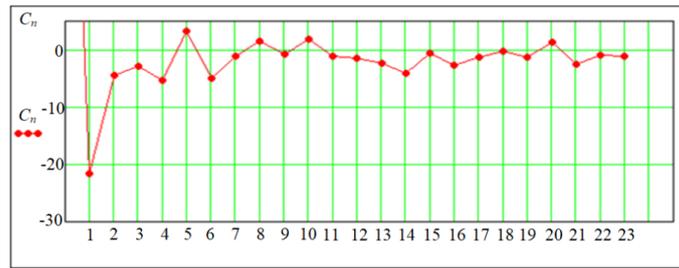


Рис. 10. Значения мел-частотных кепстральных коэффициентов для случая «ненадежный досыл»

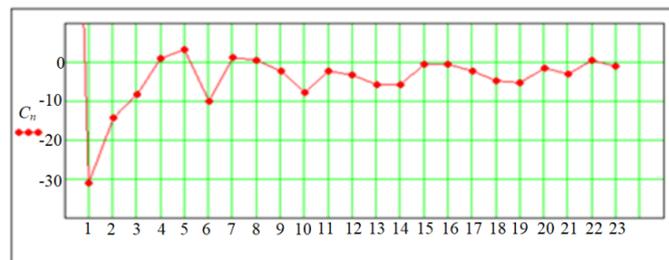


Рис. 11. Значения мел-частотных кепстральных коэффициентов для случая «надежный досыл»

Для классификации экспериментальных аудиозаписей использовались первые 13 вычисленных мел-частотных кепстральных коэффициентов. Представленный в таком виде вектор классификационных признаков подавался на вход 4-х слойной искусственной нейронной сети с 256 нейронами во втором слое, 128 нейронами в третьем слое и 19 нейронами в выходном слое. После обучения нейронной сети на значительной выборке экспериментальных аудиозаписей была достигнута точность классификации степени досыла 95 % на обучающей выборке и 90 % на контрольной.

Заключение. В результате проведенного исследования был разработан метод контроля досыла артиллерийского снаряда в камору орудия по акустическому портрету и интеллектуальная система контроля досыла.

Эффективность метода подтверждена на разработанном экспериментальном стенде. Точность идентификации степени заклинивания снаряда превышает 90 %.

Разработанный метод и интеллектуальная система контроля досыла могут быть применены в робототехнических комплексах, оснащенных артиллерийским вооружением, а также в других отраслях, например, – в нефтегазодобыче для контроля стыковки сочленяемых магистральных труб.

Основным направлением дальнейших исследований является экспериментальная обработка на реальном артиллерийском оружии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блинов А.Д. Курс артиллерии / под общ. ред. ген-м. инж. артил. службы А.Д. Блинова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Воен. изд-во, 1944-1949. – 9 т.
2. Тележенко Д.Р., Окладников А.А., Бегиев А.М. Контроль сварных швов ЖРД методом акустической эмиссии // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т. 1, № 13. – С. 182-183.

3. Jiang J., Ye C., Zhang Z., Yu Y. Acoustic emission testing of a friction stir welding aluminum alloy pressure vessel // Springer Proceedings in Physics Ser. «Advances in Acoustic Emission Technology – Proceedings of the World Conference on Acoustic emission, 2017». – 2019. – P. 341-351.
4. Huaming Lei, Zuoying Huang, Wei Liang, Yimei Mao, Peiwen Que. Ultrasonic pig for submarine oil pipeline corrosion inspection // Дефектоскопия. – 2009. – № 4. – С. 85-94.
5. Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Канифадин К.В., Киреевко В.В. Использование двух-этапной кластирезации сигналов акустической эмиссии для определения дефектов сварки // Дефектоскопия. – 2011. – № 6. – С. 44-49.
6. Khatparia A., Gupta D., Khanna A., Nguyen N.G., Pandey B., Tiwari P. Sound classification using convolutional neural network and tensor deep stacking network // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 7717-7727.
7. Guo M., Jia Ch. Neural network recognizes fruit fly's wing vibration sound based on hilbert-huang transform // International Journal of Engineering and Manufacturing. – 2011. – № 6. – P. 25-30.
8. Kochetov K., Putin E., Balashov M., Filchenkov A., Shalyto A. Noise masking recurrent neural network for respiratory sound classification // Lecture Notes in Computer Science. – 2018. – Vol. 11141 LNCS. – P. 208-217.
9. Жуков К.В. Система акустического контроля прохождения поршня для автоматического контроля движения внутритрубного инспекционного снаряда // Мокеровские чтения. Сборник материалов 10-й Юбилейной Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. – 2019. – С. 167-168.
10. Кучеров В.Г., Червонцев С.Е., Садовников В.И., Гулевский В.В. К вопросу создания устройства для контроля положения в стволе досланного заряда // Оборонная техника. – 2015. – № 9-10. – С. 107-109.
11. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. – 2-е изд.: пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
12. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации: пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с
13. Мазлов С.С., Беликов В.А., Червонцев С.Е. Акустический метод контроля досылки снаряда при раздельном зарядании // Калашниковские чтения: VI Всероссийская научно-практическая конференция (7 ноября 2019 г.): [в рамках II Молодёжного форума студентов и курсантов оборонных специальностей вузов России «С именем Калашникова» (6-8 ноября 2019 г.)]. ФГБОУ ВО «Ижевский гос. технический ун-т им. М. Т. Калашникова». – Ижевск, 2019. – С. 248-254.
14. Попов О.Б., Рухтер С.Г. Цифровая обработка сигналов в трактах звукового вещания. – М.: Горячая линия-Телком, 2007. – 341 с.
15. Chandwadkar D.M., Sutaone M.S. Role of features and Classifiers on Accuracy of Identification of Musical Instruments // 2nd National Conference on Computational Intelligence and Signal Processing, 2012. – P. 66-70.
16. Станкевич Ф.В., Стицын В.Г. Нейросетевое распознавание музыкальных инструментов с использованием мел-частотных кепстральных коэффициентов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-1. – С. 51-56.
17. Беленко М.В., Балакишин П.В. Сравнительный анализ систем распознавания речи с открытым кодом // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 04 (58). Ч. 4. – С. 13-18.
18. Hermansky H. Perceptual Linear Predictive (PLP) Analysis of Speech // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1990. – Vol. 87 (4). – P. 1738-1752.
19. Eronen A. Comparison of features for musical instrument recognition // Workshop on Signal Processing for Audio and Acoustics. – 2001. – P. 19-22.
20. Первушин Е.А. Обзор основных методов распознавания дикторов // Математические структуры и моделирование. – 2011. – № 24. – С. 41-54.

REFERENCES

1. Blinov A.D. Kurs artillerii [Artillery course]. Moscow, Voen. izd-vo, 1944-1949, Vol. 4, 192 p.
2. Telezhenko D.R., Okladnikov A.A., Begishev A.M. Kontrol' svarnykh shvov ZHRD metodom akusticheskoy emissii [Acoustic emission control of LRE welds], Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики [Actual problems of aviation and astronautics], 2017, No. 13, pp. 182-183.

3. Jiang J., Ye C., Zhang Z., Yu Y. Acoustic emission testing of a friction stir welding aluminum alloy pressure vessel, *Springer Proceedings in Physics Ser. «Advances in Acoustic Emission Technology – Proceedings of the World Conference on Acoustic emission, 2017»*, 2019, pp. 341-351.
4. Huaming Lei, Zuoying Huang, Wei Liang, Yimei Mao, Peiwen Que. Ultrasonic pig for submarine oil pipeline corrosion inspection, *Defektoskopiya* [Flaw detection], 2009, No.4, pp. 85-94.
5. Stepanova L.N., Ramazanov I.S., Kanifadin K.V., Kireenko K.V. Ispol'zovanie dvukhetapnoi klasterizatsii signalov akusticheskoy emissii dlya opredeleniya defektov svarki [Using of two-stage clustering of acoustic emission signals for detection of welding defects], *Defektoskopiya* [Flaw detection], 2011, No. 6, pp. 44-49.
6. Khamparia A., Gupta D., Khanna A., Nguyen N.G., Pandey B., Tiwari P. Sound classification using convolutional neural network and tensor deep stacking network, *IEEE Access*, 2019, No. 7, pp. 7717-7727.
7. Guo M., Jia Ch. Neural network recognizes fruit fly's wing vibration sound based on hilbert-huang transform, *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 2011, No. 6, pp. 25-30.
8. Kochetov K., Putin E., Balashov M., Filchenkov A., Shalyto A. Noise masking recurrent neural network for respiratory sound classification, *Lecture Notes in Computer Science*, 2018, Vol. 11141 LNCS, pp. 208-217.
9. Zhukov K.V. Sistema akusticheskogo kontrolya prokhozheniya porshnya dlya avtomaticheskogo kontrolya dvizheniya vnutritrubnogo inspeksionnogo snaryada [Acoustic piston passage control system for automatic control of the in-tube inspection projectile movement], *Sbornik materialov 10-y Yubileynoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po fizike i tekhnologii nanogeterostrukturnoy SVCh-elektroniki* [Proceedings of the 10th Anniversary International Scientific and Practical Conference on Physics and Technology of Nanoheterostructure Microwave Electronics], 2019, pp. 167-168.
10. Kucherov V.G., Chervoncev S.E., Sadovnikov V.I., Gulevskiy V.V. K voprosu sozdaniya ustroystva dlya kontrolya polozheniya v stvole doslannogo zaryada [To the question of creating a device for monitoring of the sent projectile position in the barrel], *Oboronnaya tekhnika* [Defense technology], 2015, No. 9-10, pp. 107-109.
11. Haykin S. Neyronnye seti: polnyy kurs [Neural networks: a comprehensive foundation]. 2nd ed. Moscow, 2006, 1104 p.
12. Osovskiy S. Neyronnye seti dlya obrabotki informatsii [Neural networks for Information Processing], Moscow, Finansy i statistika, 2002, 344 p
13. Mazlov, S.S. Akusticheskiy metod kontrolya dosylki snaryada pri razdel'nom zaryazhanii [Acoustic method for controlling projectile loading during separate loading], *Kalashnikovskie chteniya: VI Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (7 noyabrya 2019 g.)* [Kalashnikov Readings: VI All-Russian Scientific and Practical Conference (November 7, 2019)], 2019, pp. 248-254.
14. Popov O.B., Rihter S.G. Tsifrovaya obrabotka signalov v traktakh zvukovogo veshchaniya [Digital signal processing in sound broadcasting paths]. Moscow, 2007, 341 p.
15. Chandwadkar D.M., Sutaone M.S. Role of features and Classifiers on Accuracy of Identification of Musical Instruments. *2nd National Conference on Computational Intelligence and Signal Processing*, 2012, pp. 66-70.
16. Stankevich F.V., Spicyn V.G. Neyrosetevoe raspoznavanie muzykal'nykh instrumentov s ispol'zovaniem mel-chastotnykh kepstral'nykh koeffitsientov [Neural network recognition of musical instruments using mel-frequency cepstral coefficients], *Fundamental'nye issledovaniya* [Basic research], 2014, No. 12-1, pp. 51-56.
17. Belenko M.V., Balakshin P.V. Sravnitel'nyy analiz sistem raspoznavaniya rechi s otkrytym kodom [Comparative analysis of open source speech recognition systems], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2017, No. 04 (58), pp. 13-18.
18. Hermansky H. Perceptual Linear Predictive (PLP) Analysis of Speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1990, 87 (4), pp. 1738-1752.
19. Eronen A. Comparison of features for musical instrument recognition. *Workshop on Signal Processing for Audio and Acoustics*, 2001, pp. 19-22.
20. Pervushin E.A. Obzor osnovnykh metodov raspoznavaniya diktorov [Overview of main speaker recognition methods], *Matematicheskie struktury i modelirovaniye* [Mathematical Structures and Modeling], 2011, No. 24, pp. 41-54.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. И.В. Ковшов.

Шурыгин Виктор Александрович – ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»; e-mail: au@vstu.ru; 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28; тел.: 88442248167; член-корреспондент РАН; д.т.н.; профессор; заведующий кафедрой.

Серов Валерий Анатольевич – к.т.н.; доцент.

Устинов Сергей Анатольевич – к.т.н.; доцент.

Леонард Александр Валерьевич – к.т.н.; доцент.

Червонец Сергей Евгеньевич – к.т.н.; доцент.

Платонов Виталий Николаевич – e-mail: Platonov.Vitaliy@yandex.ru; тел.: +79377509775; аспирант.

Мазлов Сергей Сергеевич – e-mail: serega.mazlov@gmail.com; тел. +79610791336; студент.

Shurygin Victor Aleksandrovich – Volgograd State Technical University; e-mail: au@vstu.ru; 28, V.I. Lenin av., Volgograd, 40005, Russia; phone +78442248167; Corresponding Member of the Russian Academy of Science; dr. of eng. sc.; professor; head of department.

Serov Valeriy Anatolievich – cand. of eng. sc.; associate professor.

Ustinov Sergey Anatolievich – cand. of eng. sc.; associate professor.

Leonard Aleksandr Valerievich – cand. of eng. sc.; associate professor.

Chervoncev Sergey Evgenievich – cand. of eng. sc.; associate professor.

Platonov Vitaliy Nikolaevich – e-mail: Platonov.Vitaliy@yandex.ru; phone +79377509775; graduate student.

Mazlov Sergey Sergeevich – e-mail: serega.mazlov@gmail.com; phone +79610791336; student.

УДК 629.127.4-52

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-108-118

В.В. Костенко, И.Г. Мокеева, Н.А. Найдено, А.Ю. Толстоногов

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОЙ МАРШЕВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Целью исследования является оценка достоинств и недостатков существующих методов управления тягой маршевых движителей (МД) необитаемого подводного аппарата (НПА). В качестве объекта исследования была принята математическая модель МД АНПА "Х-200" разработки ИПМТ ДВО РАН, состоящая из совокупности моделей гребного электродвигателя, гребного винта и блока управления двигателем. В ходе проведенных исследований решались следующие задачи: разработка математической модели бесколлекторного гребного электродвигателя МД с уточнением параметров по результатам его нагрузочных испытаний; разработка математической модели гребного винта на основании его кривых действия, определенных в соответствии с регрессионной базой модельных испытаний PROPS; разработка математической модели блока управления двигателем (БУД); моделирование реакции движителя на ступенчатое изменение заданной тяги с регулированием электродвижущего момента электропривода по разомкнутому контуру, с обратной связью по частоте вращения гребного винта и с обратной связью по измеренной тяге. В результате проведенного моделирования реакции МД на ступенчатое изменение заданной тяги в швартовном режиме установлено, что варианты управления тягой различаются только временем переходного процесса, а статическая ошибка регулирования практически отсутствует для всех вариантов. При этом было выявлено почти двукратное преимущество в быстрой реакции регулирования МД по тяге и частоте вращения над регулированием по моменту, обусловленное увеличенным энергопотреблением привода в переходном процессе. Моделирование управления МД при попутном потоке, обусловленной