

И.Ю. Кондратьева, А.В. Рудакова,
О.В. Поливода, Н.В. Сарафанникова

АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ПРИРАЩЕНИЯХ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ МНОГОПРИВОДНЫХ УСТАНОВОК

Аннотация. Эффективным средством предупреждения аварий, выявления критических режимов работы, диагностики неисправностей оборудования электромеханических систем являются методы функциональной диагностики. В последнее время особый интерес проявляется к созданию методов и способов диагностирования технического состояния электромеханических систем, основанных на изучении в них колебательных (вибрационных) и акустических процессов.

Целью исследований является разработка методов анализа акустических сигналов, порождаемых работающим оборудованием электромеханических комплексов, в приращениях (в фазовом пространстве), пригодные для использования в системах функциональной диагностики при мониторинге режимов работы электроприводов.

В данной статье авторами проведено исследование акустического шума, генерируемого электромеханическими системами в режиме реального времени. Осуществлен обзор моделей и методов прогнозирования временных рядов, выявлены достоинства и недостатки каждого класса. Разработаны методы анализа акустических сигналов, порождаемых работающим оборудованием электромеханических комплексов, в приращениях (в фазовом пространстве), пригодные для использования в системах функциональной диагностики.

Ключевые слова: функциональная диагностика, акустический сигнал, агрегация данных, кратномасштабный анализ, многоприводная установка.

Введение. Современной тенденцией развития мехатронных систем является использование многоприводных установок каркасной компоновки [1]. Такие объекты, как правило, состоят из большого числа взаимодействующих элементов. Относительные перемещения этих элементов порождают вибрации, которые могут критически сказаться на работе прецизионных мехатронных систем. Это может привести к предельным режимам работы оборудования, а в ряде случаев и выходу его из строя.

Эффективным средством предупреждения аварий, выявления критических режимов работы, диагностики неисправностей оборудования электромеханических систем (ЭМС) являются методы функциональной диагностики [2]. В последнее время особый интерес проявляется к созданию методов и способов диагностирования технического состояния электромеханических систем, основанных на изучении в них колебательных (вибрационных) и акустических процессов.

Анализ последних исследований и публикаций. Сущность проблемы функциональной диагностики состоит в разработке и практической реализации алгоритмов оценки параметров технических состояний электромеханических узлов, без их разборки по характеристикам вибрационных процессов, сопровождающих их функционирование. Современная вычислительная техника позволяет усовершенствовать технологию проверки параметров ЭМС за счет автоматизации процессов измерения и использования программных средств диагностики (рис. 1). Измерение и анализ сигналов в системах виброакустической диагностики электромеханических систем чаще всего производятся с помощью приборов, приспособленных для работы в промышленных условиях. В то же время эти операции могут выполняться и с помощью компьютера, на входе которого устанавливаются устройства, питающие измерительные преобразователи, усиливающие электрические сигналы и преобразующие сигналы в цифровую форму.

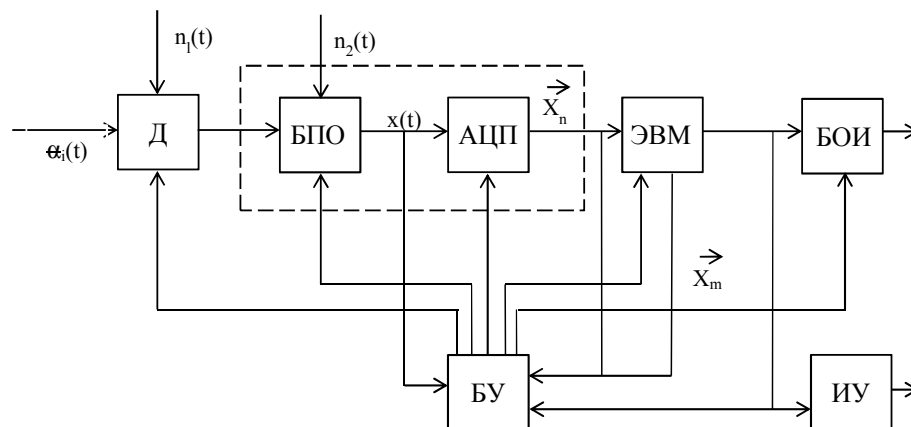


Рисунок 1 - Структурная схема системы технической диагностики:

Д – Датчик; БПО – блок предварительной обработки; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ЭВМ – электронно-вычислительная машина; БУ – блок управления параметрами и алгоритмами; БОИ – блок регистрации, отображения информации; ИУ – исполнительное устройство, X_n – рабочая выборка, X_m – обучающая выборка (n, m – объемы выборок)

В процессе технической диагностики информация о поведении объекта контроля α_i регистрируется датчиком (Д). Приемники БПО и АЦП реализуют функции предварительной аналоговой обработки смеси сигналов и помех, обеспечивая усиление слабых сигналов на фоне собственных шумов; полосовую, низкочастотную и режекторную фильтрацию внешних $n_1(t)$ и внутренних $n_2(t)$ помех; нормировку выходных процессов $x(t)$ по интенсивности. Преобразованные сигналы поступают на ЭВМ, где проходят статистическую, математическую обработку. Блок БУ реализует функции управления процессом обработки сигналов в приемниках и процессоре, а также задает параметры для исполнительного устройства (ИУ).

Шумы аппаратов и машин также характеризуют как общие свойства систем, так и свойства их частей. Опыт применения акустических методов показывает, что в состоянии нормального функционирования энергия шума в основном концентрируется в области низких частот, а энергия, соответствующая дефектам, располагается на более высоких частотах. Это обстоятельство используют для своевременного обнаружения зарождающихся нарушений. Недостаток большинства акустических методов - необходимость иметь в памяти системы контроля набор реализаций сигналов или статистические характеристики сигналов всех состояний функционирования [3].

Методы функциональной диагностики в режиме реального времени, требуют выполнения большого количества расчетов, математического моделирования объекта, обработки большого объема информации, что обуславливает обязательное применение вычислительной техники.

Разные методы обработки акустических сигналов позволяют выделить различные характеристики как статические, так и динамические.

Для цифровой обработки акустических сигналов от ЭМС используют ряд методов:

- методы линейной фильтрации, которые позволяют проводить селекцию сигналов в необходимой частотной области;
- спектральный анализ, при помощи которого обрабатывают различные виды сигналов;
- частотно-временной анализ, который используют для нахождения отклонений в чувствительных приемниках сигналов;
- адаптивная фильтрация, позволяющая проводить распознавание звуковых образов на основе ранее выявленных закономерностей, а также приглушать шумы;

- нелинейная обработка для расчета корреляций;
- высокоскоростная обработка – интерполяция (увеличение) и децимация (уменьшение) частоты дискретизации.

В настоящее время основными методами обработки результатов измерений являются преобразование Фурье и Лапласа, классические методы анализа временных рядов, кратномасштабного вейвлет-анализа и т.д. Недостатком применяемых подходов является вычислительная сложность при осуществлении дискретных преобразований и необходимость наличия значительных объемов памяти для хранения эталонных значений.

Рассмотренные методы основываются на анализе оригинального сигнала, однако производные (приращения) сигнала разных порядков также могут обладать информативностью.

Цель исследований. Целью исследований является разработка методов анализа акустических сигналов, порождаемых работающим оборудованием электромеханических комплексов, в приращениях (в фазовом пространстве), пригодные для использования в системах функциональной диагностики при мониторинге режимов работы электроприводов.

Основная часть. Характерные шумовые сигналы электромеханического оборудования имеют периодические и непериодические составляющие. Параметры шумовых сигналов изменяются со временем – у бездефектных устройств медленно, а в оборудовании, что приближается к состоянию разрушения, очень быстро. Принято, что в пределах всего срока службы устройств его характерный шумовой сигнал является интервально-стационарным процессом при условии, что интервалы наблюдений выбираются для каждого типа устройств, а сигналы рассматриваются как реализации случайного процесса с нормальным распределением. Цель диагностики заключается в выявлении развития отказа ранее области наиболее интенсивного износа или разрушения. Поэтому необходимо иметь временную зависимость работы дефектных и бездефектных объектов контроля, а для обеспечения достоверных результатов применять статистические методы моделирования. В соответствии с вероятностным подходом все отклонения от нормы рассматриваются как случайные величины, а основным требованием является минимально допустимая вероятность отказа.

Актуальной научной задачей является разработка эффективных алгоритмов функционального диагностирования реализуемых на ЭВМ, которые в полной мере учитывают технические и экономические требования, ограничения при оптимизации, стохастический характер внешних воздействий и т.п. При

построении алгоритмов функциональной диагностики надо учитывать специфику решаемой задачи, использовать современные приемы и методы оптимизации, применять накопленный опыт в смежных областях.

Ряд задач диагностики электромеханических комплексов в настоящее время можно реализовать акустическими методами, путем анализа сигналов, полученных с работающих узлов в режиме реального времени.

Акустические шумовые сигналы от работающей многоприводной установки были получены в результате серии экспериментов на двух скоростных режимах. На рис. 2 а показан фрагмент зарегистрированного сигнала, который сохраняется в звуковом файле в формате *.wav, с частотой дискретизации 48 кГц и 16-битной глубиной. На рис. 2 б, в приведены фрагменты приращений сигнала первого и второго порядка, что соответствует первой и второй производной сигнала. Динамика сигнала в фазовом пространстве показана на рис. 3.

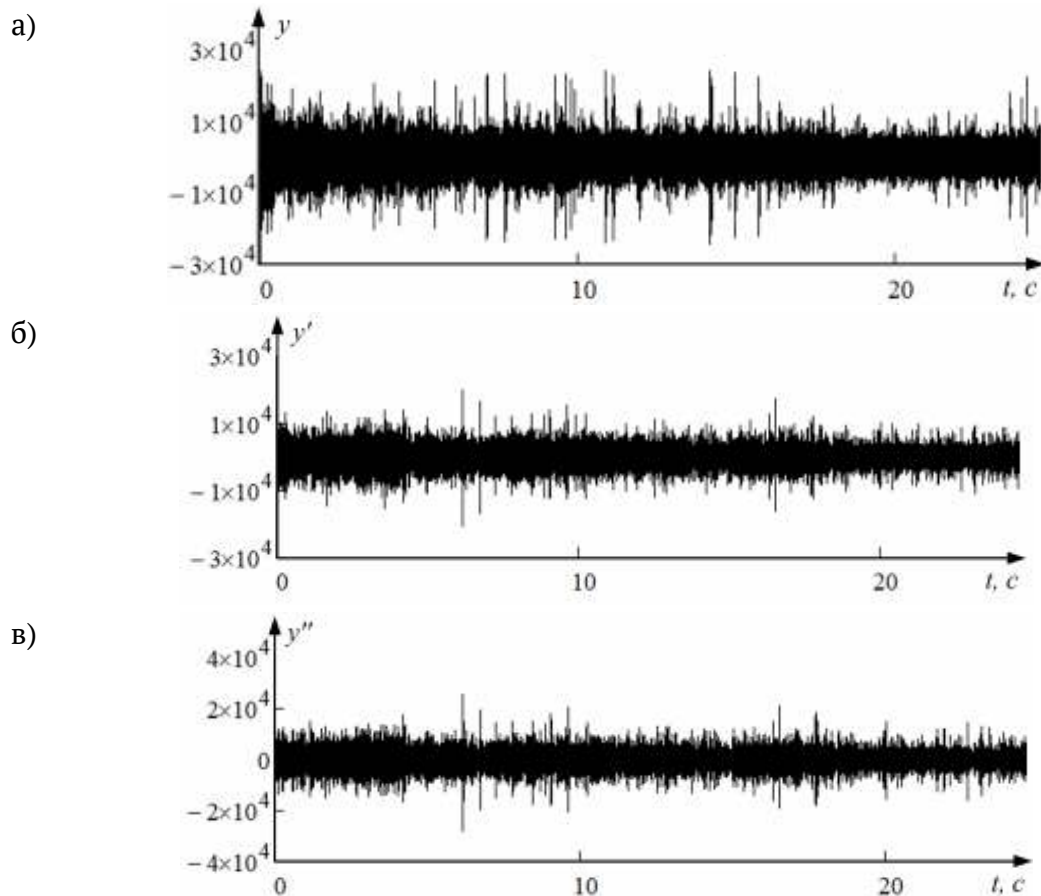


Рисунок 2 - Фрагменты сигналов: а) оригинальный сигнал, б) приращение сигнала первого порядка, в) приращение сигнала второго порядка

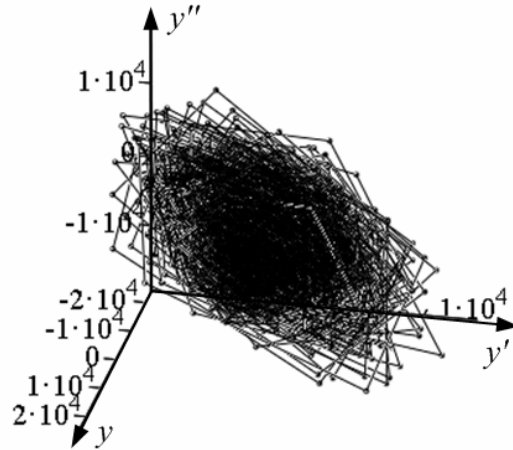


Рисунок 3 - Динамика сигнала в фазовом пространстве

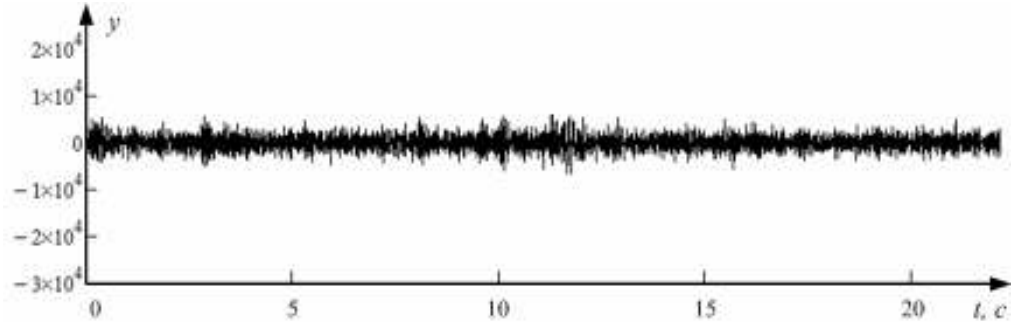
Для ускорения процесса анализа сигналов необходимо устранить избыточность, что можно достигнуть путем агрегации данных. Агрегация, позволяющая сжимать временную шкалу (уменьшать количество данных) осуществляется путем усреднения ближайших значений следующим образом

$$y_k^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=k-m-(m-1)}^{k-m} y_i, \quad (1)$$

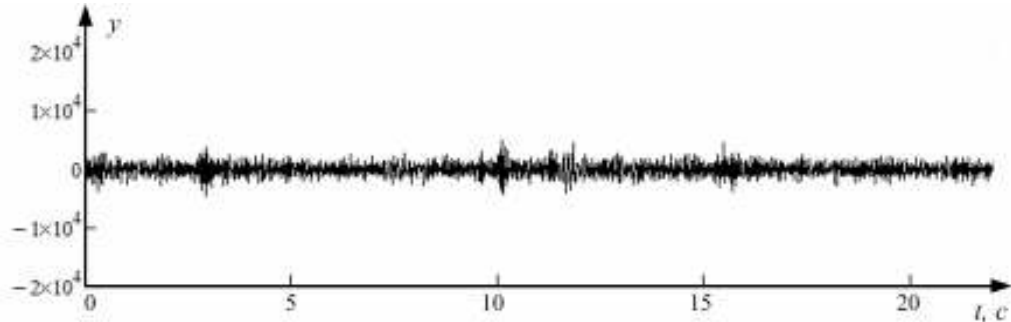
где \bar{y} – исходный сигнал, $\bar{y}^{(m)}$ – агрегированный сигнал, со степенью агрегации m .

На рис. 4 показаны фрагменты сигналов, полученные с разной степенью агрегации

а)



б)



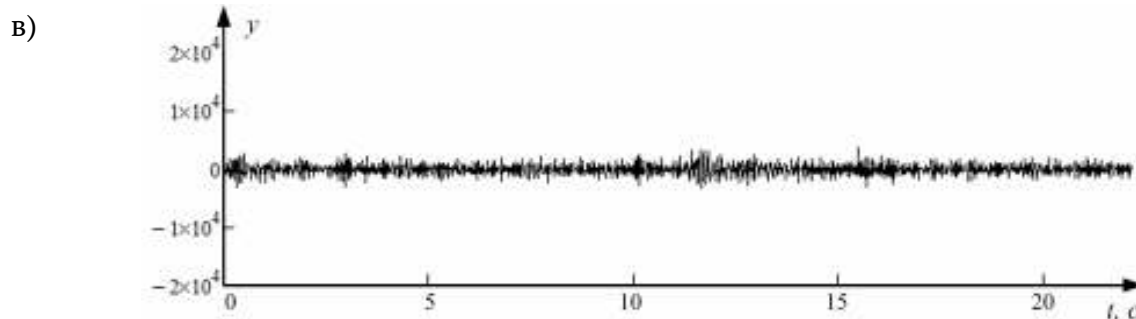


Рисунок 4 - Фрагменты агрегированных сигналов:

а) $m = 10$, б) $m = 20$, в) $m = 30$

Для определения допустимой степени агрегации целесообразно осуществлять кратномасштабный анализ.

Меру длительности долгосрочной зависимости стохастического процесса характеризует параметр Херста H [4,5]. Значение $H = 0,5$ указывает на отсутствие долгосрочной зависимости. Чем ближе значение H к 1, тем выше степень устойчивости долгосрочной зависимости, т.е. необходимо чтобы $0,5 \leq H \leq 1$. Параметр Херста определяется как $H = 1 - (\beta/2)$, где $\beta = \frac{\log[Var(y)/Var(y^{(m)})]}{\log(m)}$, $0 < \beta < 1$, $Var(y)$ и $Var(y^{(m)})$ дисперсии оригинального и агрегированного процесса соответственно.

Результаты применения кратномасштабного анализа (расчет дисперсии Var , параметра самоподобия β , параметра Херста H) в зависимости от степени агрегации m показаны в табл. 1 для оригинального процесса.

Таблица 1

Параметры кратномасштабного анализа

| m | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $Var \cdot 10^5$ | 82,9 | 30,4 | 16,2 | 9,91 | 6,5 | 4,85 | 2,56 | 1,68 | 1,07 | 0,63 |
| β | 0,23 | 0,59 | 0,74 | 0,83 | 0,91 | 0,94 | 1,08 | 1,16 | 1,24 | 1,34 |
| H | 0,88 | 0,7 | 0,63 | 0,58 | 0,55 | 0,53 | 0,46 | 0,42 | 0,38 | 0,33 |

Расчеты показали, что предельная степень агрегации для исследуемого сигнала составляет $m = 30$.

Выводы. При анализе акустического сигнала можно использовать сжатую временную шкалу, что позволяет значительно уменьшить объем вычислений при построении математической модели процесса и идентификации режима работы оборудования. Это позволит реализовать системы поддержки принятия решений реального времени с автоматическим определением (постановкой

диагноза в темпе измерения диагностических сигналов) неисправностей узлов машинного оборудования, степени их опасности и формированием перечня компенсирующих мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Кузнецов Ю.М. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури: Монографія / Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитрієв, Г.Ю. Діневич; під ред. Ю.М. Кузнецова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2009. – 456 с.
2. Пятибратов Г.Я. История развития и современные проблемы электроэнергетики и электротехники: учебное пособие / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ).– Новочеркасск: ЮРГТУ, 2013.– 122 с.
3. Балицкий Ф.Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков. – М.: Наука, 1984. – 116 с.
4. Современные компьютерные сети. 2-е изд. / [авт. текста В. Столингс]. – Спб.: Питер, 2003. – 783с.
5. Потапов А.А., Новейшие методы обработки изображений / А.А. Потапов, Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, А.А. Пахомов, В.А. Герман - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 496 с.

REFERENCES

1. Kuznietsov Yu.M. Komponovky verstativ z mekhanizmamy paralelnoi struktury: Monohrafiia / Yu.M. Kuznietsov, D.O. Dmytriiev, H.Iu. Dinevych; pid red. Yu.M. Kuznietsova. – Kherson: PP Vyshemyrskiy V.S., 2009. – 456 s.
2. Pyatibratov G.Ya. Istoriya razvitiya i sovremennyye problemyi elektroenergetiki i elektrotehniki: uchebnoe posobie /Yuzh.-Ros. gos. tehn. un-t (NPI).–Novocherkassk: YuRGTU, 2013.– 122 s.
3. Balitskiy F.Ya. Vibroakusticheskaya diagnostika zarozhdayuschihsy defektov / F.Ya. Balitskiy, M.A. Ivanova, A.G. Sokolova, E.I. Homyakov. – M.: Nauka, 1984. – 116 s.
4. Sovremennyye kompyuternyye seti. 2-e izd. / [avt. teksta V. Stolings]. – Spb.: Piter, 2003. – 783s.
5. Potapov A.A., Noveyshie metodyi obrabotki izobrazheniy / A.A. Potapov, Yu.V. Gulyaev, S.A. Nikitov, A.A. Pahomov, V.A. German - M.: FIZMATLIT,2008. -496 s.

Received 05.03.2019.

Accepted 11.03.2019.

Аналіз акустичних сигналів в прирощеннях для функціональної діагностики багатопровідних установок

У даній статті авторами проведено дослідження акустичного шуму, що генерується електромеханічними системами в режимі реального часу. Здійснено огляд моделей і методів прогнозування часових рядів, виявлені переваги і недоліки кожного класу. Розроблено методи аналізу акустичних сигналів, що породжуються працюючим обладнанням електромеханічних комплексів, в прирощеннях (в фазовому просторі), що придатні для використання в системах функціональної діагностики багатопровідних установок.

Analysis of acoustic signals in increments for functional diagnostics of multi-drive units

The current trend in the development of mechatronic systems is the use of multi-drive frame configurations. Such objects, as a rule, consist of a large number of interacting elements. The relative displacements of these elements generate vibrations that can critically affect the operation of precision mechatronic systems. This can lead to limiting operating conditions of the equipment, and in

some cases, its failure. An effective means of preventing accidents, identifying critical modes of operation, diagnosing faults in equipment of electromechanical systems are the methods of functional diagnostics.

Methods of functional diagnostics in real time require a large number of calculations, mathematical modeling of the object, processing a large amount of information, which leads to the mandatory use of computer technology. The main methods of processing the measurement results are the Fourier and Laplace transforms, classical methods for analyzing time series, multiple-scale wavelet analysis, etc. The disadvantage of the approaches used is computational complexity in the implementation of discrete transformations and the need for significant amounts of memory to store reference values. The considered methods are based on the analysis of the original signal, however, the increments of the signal of different orders may also be informative.

The aim of the research is to develop methods for analyzing acoustic signals generated by working equipment of electromechanical complexes, in increments suitable for use in functional diagnostics systems when monitoring the operating modes of electric drives.

In the process of research, an analysis of acoustic noise signals from a working multi-drive unit, obtained as a result of a series of experiments at two high-speed modes, was performed. To speed up the process of analyzing signals and eliminate their redundancy, a data aggregation method has been applied. The degree of permissible aggregation is determined using a multi-scale analysis. The developed method for analyzing aggregated acoustic signals in increments in phase space can be used for functional diagnostics of multi-drive units.

Кондратьева И.Ю. - аспирант кафедры технической кибернетики Херсонского национального технического университета.

Рудакова А.В. - заведующий кафедрой технической кибернетики Херсонского национального технического университета.

Поливода О.В. - доцент кафедры технической кибернетики Херсонского национального технического университета.

Сарафанникова Н.В. - доцент кафедры технической кибернетики Херсонского национального технического университета.

Кондратьева І.Ю. – аспірант кафедри технічної кібернетики Херсонського національного технічного університету.

Рудакова Г.В. – завідувач кафедри технічної кібернетики Херсонського національного технічного університету.

Поливода О.В. – доцент кафедри технічної кібернетики Херсонського національного технічного університету.

Сарафаннікова Н.В. – доцент кафедри технічної кібернетики Херсонського національного технічного університету.

Kondratieva I.Y. – Postgraduate Student of the Engineering Cybernetics Department, Kherson National Technical University.

Rudakova H.V. – Head of the Engineering Cybernetics Department, Kherson National Technical University.

Polyvoda O.V. – Assistant Professor of the Engineering Cybernetics Department, Kherson National Technical University.

Sarafannikova N.V. – Assistant Professor of the Engineering Cybernetics Department, Kherson National Technical University.