

УДК 519.237.8

Е.А. Настенко
А.Л. Бойко
В.А. Павлов
В.С. Уманец

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ У СТУДЕНТОВ В ПРОСТРАНСТВЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАВИСИМОСТИ АРТЕРИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ — ПУЛЬС

В работе рассмотрена задача выделения кластеров состояний системы кровообращения у студентов в пространстве параметров линейной зависимости артериальное давление – пульс. Для решения задачи используется алгоритм нечетких k -средних с ограниченным количеством объектов рабочих множеств, формирующих кластеры. Предложенный алгоритм обобщает метод k -средних для формирования кластеров произвольной формы. Полученные кластеры характеризуют особенности соотношений характеристик сердечно-сосудистой системы через параметры их зависимостей.

Ключевые слова: кластер, центроид, нечеткая модель, сердечно-сосудистая система, линейная регрессия, пространство параметров, проба Мартине, метод полной связи.

Проблематика работы

Нормирование нагрузки при занятиях физическим воспитанием с учетом функционального состояния и здоровья студентов есть актуальная задача учебного процесса. Определение функционального состояния сердечно-сосудистой системы стандартными медицинскими обследованиями, как правило, не включают нагрузочных тестов, содействующих выявлению студентов с повышенным риском возникновения расстройств системы кровообращения. С целью классификации функциональных состояний сердечно-сосудистой системы студентов на кафедре физического воспитания Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» разработана модифицированная методика проведения нагрузочной пробы Мартине — 20 приседаний за 30 сек. [1]. Артериальное давление и частота сердечных сокращений регистрировались цифровым осциллометрическим тонометром A&D UA787 до начала теста и каждую следующую минуту после выполнения нагрузки в течение 5 минут. Полученные данные (многомерные измерения) в каждый отдельный момент времени не дают возможности для классификации состояния сердечно-сосудистой системы, однако множество таких измерений в совокупности содержат требуемую информацию для такой классификации. Так в [1] был проведен кластерный анализ полученных данных в 18-мерном пространстве переменных систолическое давление — диастолическое давление — пульс для указанных 6-ти моментов времени. Полученные результаты позволили выделить группы кластеров с неблагоприятными изменениями ЧСС (частота сердечных сокращений) и АД (артериальное давление). Принадлежность объектов к данным кластерам требует повышенного внимания и индивидуального подхода при назначении нагрузок на занятиях физическим воспитанием. Однако имеющиеся данные могут предоставить дополнительную информацию для анализа функционального состояния сердечно-сосудистой системы. Действительно, по-

дход, при котором оцениваются параметры зависимостей, связывающие интересующие нас характеристики сердечно-сосудистой системы, позволит оценивать не только группировку объектов по АД-ЧСС, но и группировки по особенностям их взаимосвязи. Можно указать ряд работ [2,3], в которых применялся указанный подход и были получены результаты для диагностических выводов. Так в задаче диагностики нарушений работы сердечной мышцы [2] признаки были выделены, как параметры разложения сигнала электрокардиограммы в ортогональный дискретный ряд Кравчука. Другим примером использования указанного подхода может служить работа [3]. Здесь задача прогнозирования острого гипотензивного эпизода рассматривалась при наблюдении за пациентами отделения интенсивной терапии. Контекст задачи подробно описан в [4]. Наблюдение проводилось для пациентов в отделении интенсивной терапии для основного заболевания. У некоторых пациентов в течение периода наблюдения присутствовал по крайней мере один острый гипотензивный эпизод. Другие пациенты не испытывали проблем с давлением. Эти группы пациентов сформировали 2-х классовые обучающие выборки с высоким и низким риском развития угрожающей гипертонии. Полученные множества измерений были использованы для построения линейных регрессий систолического и диастолического артериальных давлений по пульсовому давлению. Затем с помощью метода опорных векторов в 4-мерном пространстве параметров полученных моделей была построена система классификации. При этом достигнуто достаточно высокое значение показателя правильной классификации — 93%.

Отметим, что в дальнейшей работе [5] авторы при получении зависимостей для параметрического анализа к сожалению, используют алгебраические преобразования к регрессионным моделям, что некорректно, и неизбежно приводит к ухудшению статистических показателей получаемых моделей.

Обобщение рассмотренного подхода для задач классификации объектов, заданных множеством измерений было разработано в [6–9]. Здесь предлагается находить одну наилучшую структуру, позволяющую для объектов всех классов описывать зависимости между признаками наиболее точными моделями [6] или моделями, позволяющими наиболее точно классифицировать объекты в пространстве параметров их моделей [9].

Также в [9] предложены алгоритмы классификации для случая, когда для каждого класса приходится строить модели на основе своей, лучшей для данного класса структуре. Перенос принципов данного подхода в задачи кластерного анализа возможно также, как в работе [8], рассматривать классификацию (без учителя) объектов в пространстве параметров зависимостей, связывающих АД — ЧСС. Для этого достаточно определится с наилучшей структурой, на базе которой возможно строить такие зависимости.

Цель работы

В данной работе предлагается построить кластеры в пространстве параметров характеристик АД — ЧСС с целью выявления групп с близкими особенностями их взаимосвязи, что позволит учитывать характер нагрузок при занятиях физическим воспитанием студентов с минимальным риском нанести вред здоровью.

Основной материал

1. Исходные данные анализа

В исследованиях приняли участие 590 студентов, которые прошли медицинский контроль по стандартной процедуре и были допущены по состоянию здоровья к занятиям по физическому воспитанию, а также дали своё письменное согласие. Артериальное давление и частота сердечных сокращений регистрировались до начала пробы и каждую следующую минуту после выполнения пробы в течение 5 минут. Для анализа структур в рамках которых могут быть получены модели связи АД — ЧСС был применен рекуррентный аддитивно-мультипликативный многоэтапный алгоритм МГУА для задачи классификации объектов, заданных множествами наблюдений — РАММА [8]. Полученные результаты позволили сделать вывод, что для данной выборки объектов (объектов, указанной выше возрастной группы и предложенного уровня тестовых нагрузок) возможно представить описание взаимозависимости АД — ЧСС в виде пары линейных структур вида

$$\text{АДС} = a_0 + a_1 \cdot \text{ЧСС} \text{ и } \text{АДД} = b_0 + b_1 \cdot \text{ЧСС} \quad (1)$$

Для объектов выборки авторами были получены параметры приведенных выше линейных регрессий. Дальнейшей задачей работы есть кластерный анализ полученных объектов в пространстве параметров.

Мы ссылались выше на предшествующую работу авторов [1], где кластерный анализ объектов проводился в исходном 18-мерном пространстве характеристик АД-ЧСС. Поскольку целью работы было определение оптимальных сферических аппроксимаций для групп функциональных состояний в исходном пространстве признаков, то естественным аппаратом кластеризации объектов был выбран метод k-средних. В данной работе объекты кластеризации в пространстве параметров их зависимостей, могут группироваться в произвольные формы, поэтому здесь для задачи кластерного анализа необходимо рассматривать соответствующие подходы. В данной работе авторы предлагают применить метод агломеративной кластеризации — метод полной связи (дальний сосед).

2. Результаты кластеризации

В результате применения кластеризации методом полной связи получены группы кластеров, содержащих регрессионные зависимости АДС(ЧСС) и АДД(ЧСС). Последние представляют собой зависимости вида (1).

Параметры регрессионных зависимостей вида (1) имеют физиологическую интерпретацию. Рассмотрим их раздельно.

Зависимость $\text{АДД} = b_0 + b_1 \cdot \text{ЧСС}$ (полученная методом наименьших квадратов) включает два параметра. Параметр b_0 (константа) отражает некоторый «базальный», статический тонус артериальной системы, который определяется объемом циркулирующей в системе крови, индивидуальной базовой характеристикой эластичности сосудов и другими существенными характеристиками системы. Параметр b_1 (угловой коэффициент) является отражением одной из компонент периферического сосудистого тонуса, чаще всего уровня тканевой гипоксии, обусловленной физическими нагрузками. Поскольку длительность диастолы является гомеостатическим показателем и тесно коррелирует с ЧСС

($r=0,92$), то при той же ЧСС, АДД тем ниже, чем ниже периферическое сосудистое сопротивление и наоборот [10, 11]. Это позволяет получить важную информацию о переносимости физических нагрузок. Результаты кластеризации при помощи метода полной связи в пространстве (b_0 , b_1) представлены на рис.1, 2.

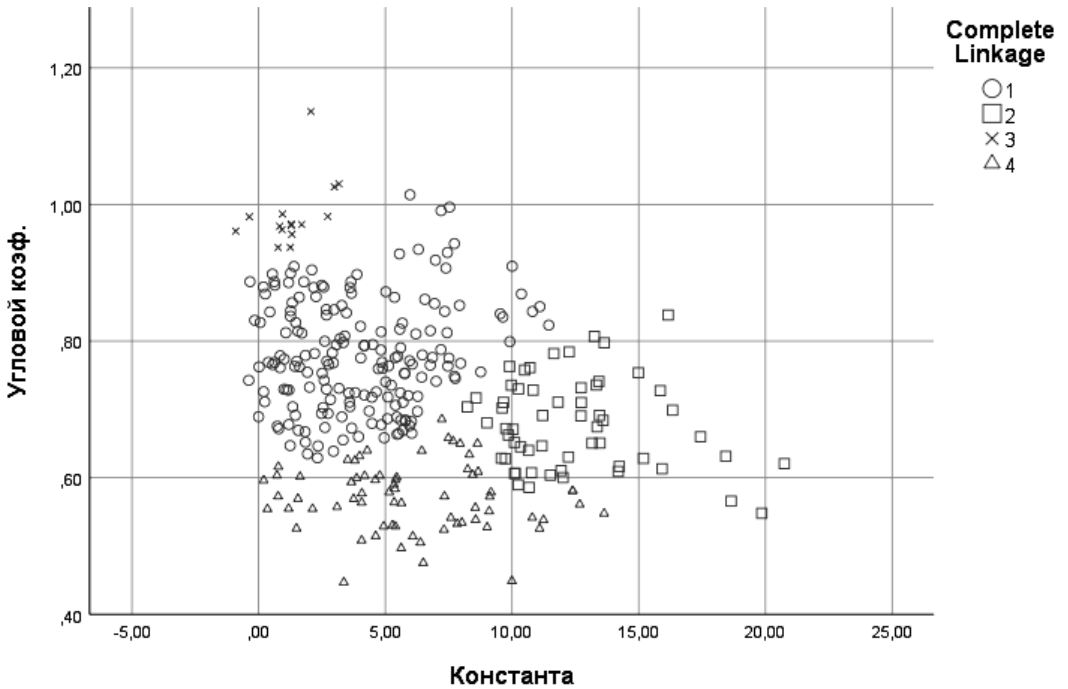


Рис. 1 — Результаты кластеризации в параметрах зависимости АДД(ЧСС) у мужчин

Как можно видеть из рис. 1, мужчины разделились на 4 кластера. Кластер 1 имеет средневысокий угловой коэффициент (b_1) и средне-низкое значение смещения (b_0) Кластер 2 также имеет средневысокий угловой коэффициент и характеризуется наибольшим значением смещения среди всех кластеров. Для кластера 3 характерны высокий угловой коэффициент и низкое значение смещения. В свою очередь, кластер 4 имеет низкий угловой коэффициент и средне-низкое значение смещения.

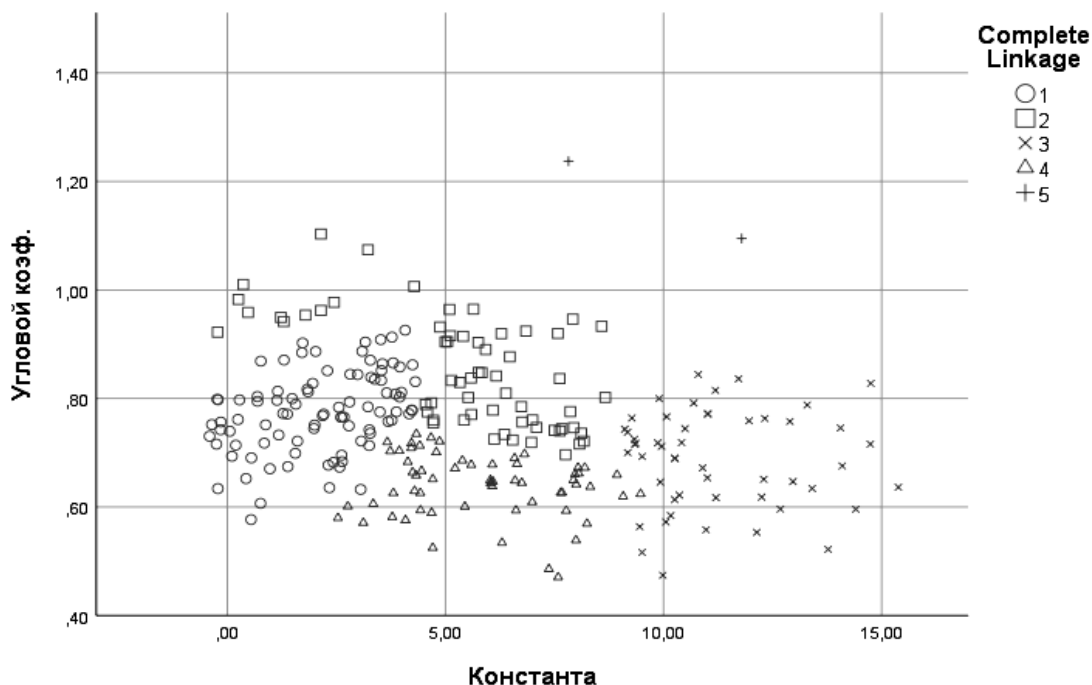


Рис. 2 — Результати кластеризації в параметрах залежності АДД(ЧСС) у жінок

При кластеризації виборки жінки отримано розділення на 5 кластерів (рис. 2). Кластер 1 має середньо-низкий кутковий коефіцієнт і низьке значення зміщення. Кластер 2 має середньовисокий кутковий коефіцієнт і характеризується середньо-низким значенням зміщення. Кластер 3 має середньо-низкий кутковий коефіцієнт і високе значення зміщення. Кластер 4 має низький кутковий коефіцієнт і середньо-низке значення зміщення. Наблюдення, що входять до кластеру 5 з високою ймовірністю, є вибросами і потребують окремого розгляду.

Отримані кластери можна інтерпретувати наступним чином. У чоловіків, до кластеру 3 увійшли студенти, які мають погані показники периферического судинного тону. Студенти, що входять до кластерів 2 і 4 показали кращу, в цьому плані, реакцію на фізичну навантаження. В той же час, студенти з другого кластера мають високе значення зміщення, що говорить про підвищеному діастолічному артеріальному тиску. Те ж, хто увійшов до першого кластера показали проміжні результати.

Серед жінок студенти з поганим показником периферического тону увійшли до другого кластера. Решта ж кластерів (1, 3, 4) лише незначительно відрізняються за цим показником, але відрізняються значеннями зміщення. Найбільшим показником статического тону володіють студенти з третього кластера, але в той же час його значення менше, ніж у чоловіків, що обумовлено меншим об'ємом крові.

Параметры зависимости $АДС = a_0 + a_1 \cdot ЧСС$ могут быть интерпретированы следующим образом.

Параметр a_0 является отражением статической компоненты артериального давления. Например, у лиц с артериальной гипертонией этот показатель может быть более высоким, чем у нормотоников, и еще более высоким, чем у гипотоников.

Параметр a_1 отражает объемную жесткость артериальной системы. С ростом ЧСС возрастает ударный объем левого желудочка сердца и минутный объем кровообращения. Чем больше a_1 , тем быстрее растет систолическое артериальное давление. Изменения этого показателя при тестовых физических нагрузках позволяют выявлять лиц, предрасположенных к артериальной гипертензии и ограничивать занятия спортом со статическими нагрузками, например, борьбой или тяжелой атлетикой.

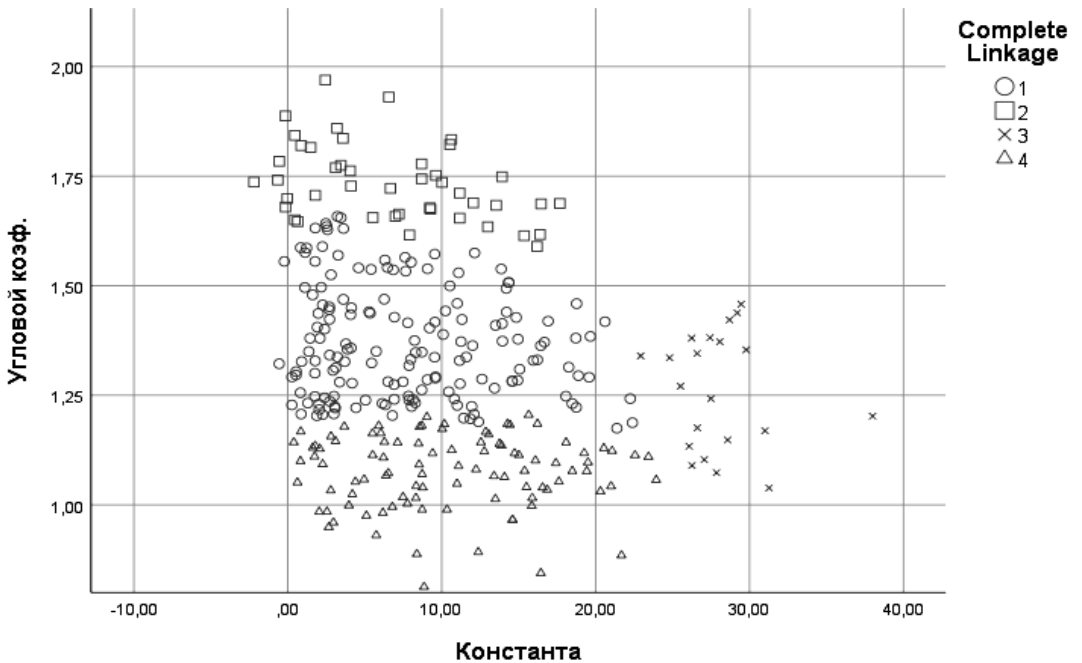


Рис. 3 — Результаты кластеризации в параметрах зависимости АДС(ЧСС) у мужчин

Как можно видеть из рис. 3, мужчины разделились на 4 кластера. Кластеры 1, 2 и 4 имеют соответственно средний, высокий и низкий значения углового коэффициента, но лишь незначительно отличаются по смещению, которое варьируется от средних до средневысоких значений. В кластер 3 вошли студенты с повышенным систолическим артериальным давлением, которые, тем не менее, показали реакцию на нагрузки в пределах нормы. Высокий угловой коэффици-

ент позволяет сделать вывод, что студенты во втором кластере обладают склонностью к артериальной гипертензии.

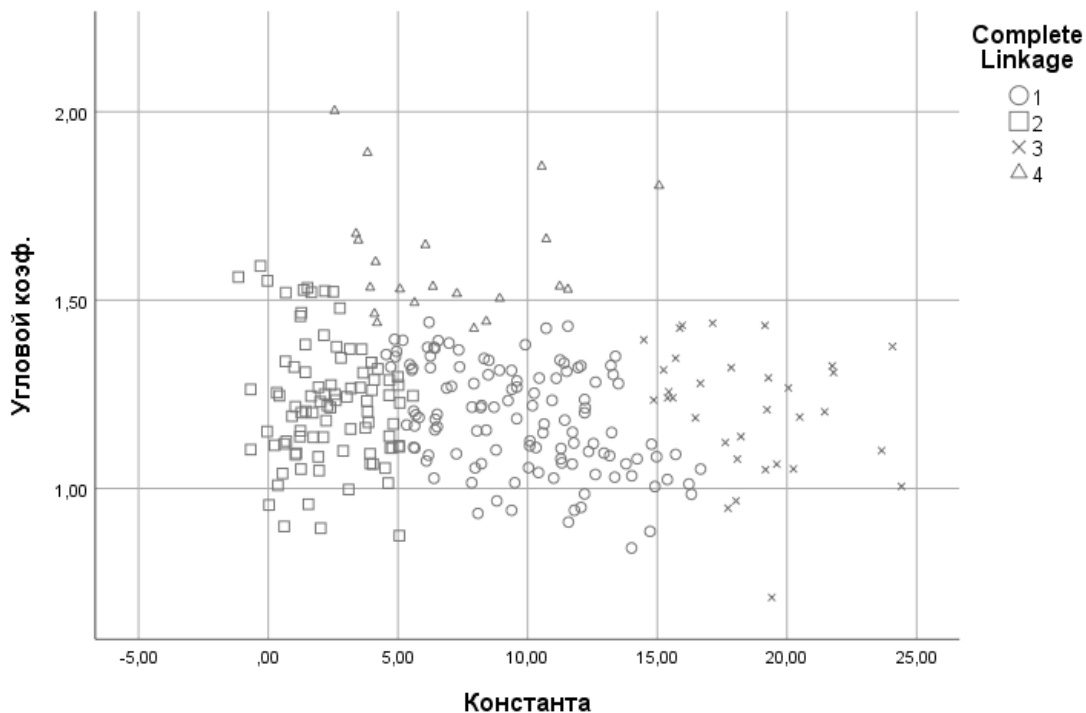


Рис. 4 — Результаты кластеризации в параметрах зависимости АДС(ЧСС) у женщин

Разбиение, полученное в результате кластеризации в пространстве параметров зависимости АДС(ЧСС) у женщин по структуре схоже с разбиением в параметрах зависимости АДД(ЧСС). Значение углового коэффициента в кластерах 1–3 варьируется от низкого до средневысокого. В четвёртом же кластере этот показатель изменяется от средневысокого до высокого. Вместе со средневысоким показателем смещения это говорит о том, что студенты в этом кластере имеют склонность к гипертензии. Студенты из третьего кластера обладают повышенным АДС, но имеют нормальную реакцию на физическую нагрузку.

В целом кластеризация мужчин показывает тенденцию формирования кластеров под влиянием динамической компоненты артериального давления, в то время как у женщин разница в ней не столь значительна, как в статической.

Выводы

Кластеризация в пространстве параметров позволяет оценить реакцию организма на физическую нагрузку, характеризуя динамику изменения артериального давления. Таким образом, классификация объектов в пространстве параметров позволяет получить более детализованную и более ценную информа-

цию о состоянии организма при физических нагрузках и занятиях спортом. Выборка студентов, участвовавших в исследовании, не содержит элементов, обладающих ярко выраженными патологиями системы кровообращения. Как результат, исследование не содержит кластеров со студентами, обладающими явно выраженными плохими показателями. В дальнейших исследованиях планируется использование более сложные модели для расширения пространства параметров кластеризации и получения более детальной информации о состоянии организма.

Список цитируемых источников

1. Бойко Г.Л. Оцінка умов коронарного кровопостачання за модифікованою пробою мартіне у студентів молодших курсів Г.Л. Бойко, Є.А. Настенко, О.К. Носовець, Б.О. Войник, М.О. Федчишин. К: Вісник університету «Україна», Серія «Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика» 2017. № 1 (20). — С. 51–61.

2. Забара С. С. Метод виділення інваріантних ознак сигналів. С.С. Забара, Н.Б. Філімонова, К.Х. Зеленский / Доповіді Національної академії наук України. — 2009. — №2. — С. 49–55.

3. Войтикова М.В. Линейная регрессия параметров артериального давления для определения риска развития вторичной гипотензии. М.В. Войтикова, Р.В. Хурса / Известия академии наук Беларуси. №1. — 2013, Серия физико-математических наук. — С. 117–122.

4. Predicting acute hypotensive episodes: the 10th annual PhysioNet / Computers in Cardiology Challenge. Moody G., Lehman L. Computers in Cardiology. — 2009. — 36(5445351): p. 541–544.

5. Войтикова М.В. Применение интеллектуального анализа данных для классификации гемодинамических состояний М.В. Войтикова, А.П. Войтович, Р.В. Хурса / Артериальная гипертензия. — 2015. — №5 (43). — С. 36–42.

6. Combinatorial algorithm for constructing a parametric feature space for the classification of multidimensional models. G.Knyshov, I.Nastenko, N. Kondrashova, O. Nosovets, V. Pavlov. Cybernetics and Systems Analysis. — 2014. — 50(4), 627–633

7. Multistage gmdh algorithm for classification purposes biological objects, which are defined by a set of measurements / Vladimir Pavlov, Olexandra Konoval // Proc. of 6th International Workshop on Inductive Modeling, IWIM 2015. Kyiv-Zhukyn, Ukraine. P. 31–32.

8. Павлов В.А. Рекуррентный аддитивно-мультипликативный многоэтапный алгоритм МГУА для задачи классификации объектов, заданных множествами наблюдений. В.А.Павлов, А.О. Коновал. Індуктивне моделювання складних систем. Збірник наук. праць // К.: МННЦІТС, 2015. — Вип. 7. — С. 48–53.

9. Structure-oriented classifiers in objects feature space defined by set of measurement / I.Nastenko, O. Konoval, O. Nosovets, V. Pavlov // Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), 2017 12th International Scientific and Technical Conference. — 2017. — №1. — P. 488–491.

10. Книшов Г.В. Оцінка стану мікроциркуляторної системи за процентильними діаграмами «ЧСС — тиск» у гендер-однорідних групах Г.В. Книшов, Є.А. На-

стенко, О.К. Носовець, В.В. Шаповалова, О.О. Береговий, О.М. Буркот, Ю.В. Шардукова // Щорічник наукових праць Асоціації серцево-судинних хірургів України. — 2012. — № 20. — С. 235–239.

11. Noninvasive estimation of microcirculatory system functioning on stages of cardiac surgery and at assist circulation G. Knyshov, Ie. Nastenko, V. Maksymenko, S. Zubkov, V. Zubchuk, O. Kravchuk, O. Nosovets, I. Zaporozhko // Proceed. Of 14th European Congr. on Extra-Corporeal Circulation Technol. — June 15th-18th, 2011. — Dubrovnik, Croatia. P. 56–69.