

На правах рукописи



Голованов Сергей Михайлович

**АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГРУППИРОВКИ ЭЛЕКТРОННЫХ
КОМПОНЕНТОВ С УЧЕТОМ ЗАДАННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАЗДЕЛЕНИЯ НА ГРУППЫ**

Специальность: 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Казаковцев Лев Александрович

Официальные оппоненты:

Истомин Андрей Леонидович, декан факультета управления и бизнеса, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», д-р техн.наук, профессор;

Царев Роман Юрьевич, доцент кафедры «Прикладная математика», ФГБОУ ВО "МИРЭА - Российский технологический университет" (РТУ МИРЭА), канд. техн. наук, доцент.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО "**Кемеровский государственный университет**", 650000, Кемеровская область – Кузбасс, г. Кемерово, ул. Красная, дом 6.

Защита состоится «27» октября 2023 года в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.2.403.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» по адресу: 660037, г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий» 31, зал заседаний диссертационного совета, ауд. Л-205.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» и на официальном сайте <https://www.sibsau.ru>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим отправлять по адресу: 660037, Россия, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (СибГУ им. М.Ф. Решетнева), Диссертационный совет

E-mail: dissovet@sibsau.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент

Панфилов Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Кластерный анализ или автоматическая группировка (АГ) данных - метод машинного обучения без учителя, выделяющий однородные подмножества таким образом, чтобы в многомерном пространстве характеристик входящие в их состав объекты имели значительное сходство, а сами подмножества обладали между собой существенными различиями. Важным примером является их использование в испытаниях электронной компонентной базы (ЭКБ) космического применения в специализированных испытательных технических центрах (ИТЦ) для задач идентификации однородных производственных партий, параметры которых не известны заранее. Выделение однородных партий требуется для проведения выборочных разрушающих испытаний ЭКБ и выявления потенциально ненадежных элементов – элементов, обладающих скрытыми дефектами, которые могут привести к отказу при длительной эксплуатации.

Литература предлагает большой набор классических методов АГ, успешно применяемых для решения широкого спектра задач. Большинство методов обладают недостатком, сужающим область их применения, т.к. осуществляют выделение кластеров в любом наборе данных, даже если различия между объектами незначительны. Есть области применения, где АГ имеет смысл только в случае, если она обеспечивает заранее заданную эффективность разделения на группы. Так, разделение элементов сборной партии электронных компонентов на группы, соответствующие производственным партиям, можно осуществить только в том случае, если оно будет соответствовать заранее заданным показателям различия отдельных партий. Если такое разделение осуществить невозможно, то считаем, что все элементы принадлежат одной производственной партии. Таким образом, решение некоторых практических задач требует разработки методов АГ, осуществляющих поиск условно оптимального варианта кластеризации с ограничениями, обеспечивающими заданную эффективность разделения на группы. Разработке таких методов посвящена данная работа.

Степень разработанности темы. Проблемами кластеризации исследователи интересуются давно – с 1930-х годов, и в настоящее время существует большое количество разнообразных моделей и алгоритмов АГ. Модель k -средних, одна из наиболее известных и распространенных моделей кластерного анализа, была предложена Г. Штейнгаузом в 1956 году и алгоритмически реализована С. Ллойдом в 1982 году. P -медианная задача размещения – развитие задачи Вебера, предложенная в рамках экономической теории, может использоваться в качестве модели АГ, более устойчивой к аномальным данным. К ее решению также может применяться алгоритм k -средних в комбинации с алгоритмом Вайсфелда.

Алгоритм k -средних в сочетании с другими алгоритмами стали предметом исследований многих ученых, например Б.Дюран, П.Оделл, Дж.Маккуин, И.Мандель. Модели автоматической группировки и модели теории размещения объектов обладают сходством, в связи с чем рассматривались исследователями комплексно (работы Ц. Дрезнера, Дж. Бримберга, Х.Хамахера, С.Хаками, В.Весоловски, Р.Лава, Дж.Морриса, Ю.А.Кочетова, Н. Младеновича и др.) Для решения задач АГ специалисты, в т.ч. К.Хук, Ю.Маулик, К.Кришна и др., предлагали использовать эволюционные подходы. Дальнейшее развитие тема получила в работах А.Н.Антамошкина, Л.А.Казаковцева, М.Н. Гудымы, Г.Ш. Шкабериной, где были получены наиболее точные (из известных) алгоритмы решения некоторых практических задач АГ.

Разработке алгоритмов обработки информации о результатах испытаний партий ЭКБ посвящен ряд работ российских и зарубежных авторов, в частности, этими вопросами глубоко занималась группа исследователей под руководством Казаковцева Л.А. Так, в работах Сташкова Д.В. показано, что отдельные характеристики электронных компонентов имеют распределения, близкие к нормальному или экспоненциальному. Поэтому первые работы по АГ партий ЭКБ были посвящены разработке алгоритмов, базирующихся на методах разделения смеси вероятностных распределений (эволюционные алгоритмы на основе EM-алгоритма). В то же время, как показывают результаты сравнительного анализа, эвристические модели, основанные на расстояниях, имеют преимущества по своей эффективности (по индексу Рэнда), что, вероятно, связано с высокой размерностью данных неразрушающего тестирования ЭКБ. При этом, как показывают работы Г.Ш.Шкабериной, существенное сокращение размерности приводит к снижению точности результата.

Хотя специализированные алгоритмы АГ показывают хорошие сравнительные результаты применительно к задачам группировки ЭКБ при известном числе однородных групп, открытыми остаются вопросы о том, есть ли в данных кластерная структура, соответствующая производственным партиям, и если есть, то сколько отдельных производственных партий содержится в исследуемой выборке. Литература предлагает множество критериев оценки качества результата АГ. При наличии размеченных данных применяется индекс Рэнда и его модификации, при их отсутствии применяются внутренние критерии оценки: критерий силуэт, критерии Байеса, Акаике, DB-критерий и др.

Попытки решения задачи АГ с обеспечением заданной эффективности разделения на группы предпринимались и раньше. Так, Казаковцевым Л.А. проводились разработки алгоритма АГ элементов сборных партий ЭКБ на группы, соответствующие разным производственным партиям, с применением в качестве показателя эффективности разделения известного в теории кластерного анализа критерия «Силуэт». Был получен довольно скромный результат – эффективность группировки (по индексу Рэнда) составила порядка 0,55. Кроме того, не был предложен метод определения граничного значения критерия «Силуэт», разделяющего варианты кластеризации, удовлетворяющие требованиям эффективности разделения на группы, соответствующие производственным партиям, от вариантов, не удовлетворяющих таким требованиям. Таким образом, разработка алгоритма АГ, обеспечивающего решение практической задачи – АГ элементов сборных партий ЭКБ в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям, с высокой средней эффективностью по индексу Рэнда (не менее 0,85) остается актуальной задачей.

Основная идея диссертации состоит в разработке алгоритмов, осуществляющих поиск условно оптимального варианта кластеризации, обеспечивающего заданную эффективность разделения на группы, за счет введения дополнительных ограничений на область искомых результатов. Для этого вводятся специальные характеристики: вектор показателей эффективности разделения на группы, объединяющий отдельные оценки эффективности разделения, и область эффективного разделения – область значений вектора показателей эффективности разделения, обеспечивающих заданную эффективность разделения, границы которой определяются на основе размеченной обучающей выборки.

Задача АГ рассматривается как задача кластеризации с частичным привлечением учителя и решается как задача условной оптимизации: осуществляется поиск варианта кластеризации, обеспечивающего субоптимальное значение целевой функции задачи автоматической группировки при условии, что вектор показателей эффективности разделения на группы, соответствующий решению задачи, должен принадлежать заданной области эффективного деления.

Объектом исследования являются задачи АГ элементов множеств однотипных объектов, заданных векторами вещественных признаков, а **предметом исследования** являются алгоритмы их решения.

Цель исследований. Целью исследований является повышение эффективности методики формирования ЭКБ космического применения за счет повышения эффективности методов группировки электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям, а также эффективности определения потенциально-ненадежных электронных компонентов по данным неразрушающего тестирования.

Задачи исследования:

1. Разработка метода АГ элементов множеств однотипных объектов, осуществляющего поиск условно оптимального варианта кластеризации, обеспечивающего заданную эффективность разделения на группы.

2. На базе метода Задачи 1 разработка алгоритма АГ электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к различным производственным партиям.

3. Разработка алгоритмов определения в составе партии электронных компонентов потенциально ненадежных элементов, как элементов, являющихся носителями накопительного (кумулятивного) эффекта суммарных отклонений характеристик элементов от их средних по партии значений.

Методы исследования. Методологической базой работы послужили исследования в области АГ (кластеризации). Для решения задач использованы методы системного анализа, исследования операций и теории оптимизации.

Новые научные результаты и положения, выносимые на защиту.

1. Разработан новый метод, позволяющий, в отличие от известных методов, осуществлять поиск условно оптимального варианта АГ множеств однотипных объектов, обеспечивающего заданную эффективность разделения на группы за счет введения дополнительных ограничений на область искомых решений. Результат достигается за счет введения специальных характеристик: вектора показателей эффективности разделения на группы, объединяющего отдельные оценки эффективности деления, и области эффективного деления – области допустимых значений вектора показателей эффективности деления, определяемой на основе размеченной обучающей выборки.

2. С целью определения подмножеств элементов ЭКБ, для каждого из которых необходимо проведение выборочных разрушающих испытаний, на базе метода п.1 разработан новый алгоритм АГ электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям.

3. Разработаны новые алгоритмы, повышающие эффективность определения в составе партий ЭКБ потенциально-ненадежных элементов, как элементов, являющихся носителями накопительного (кумулятивного) эффекта суммарных отклонений характеристик элементов от их средних по партии значений с применением размеченных обучающих выборок для определения параметров, обеспечивающих максимальную эффективность работы алгоритмов.

Значение для теории. Теоретическая значимость работы состоит в развитии моделей и методов АГ, расширяющих научный инструментарий кластерного анализа. Предложен метод, осуществляющий поиск условно оптимального варианта АГ множеств однотипных объектов, обеспечивающего заданную эффективность разделения на группы, что создает основу для синтеза новых методов анализа многомерных данных для различных областей науки и техники.

Практическая значимость. Разработанные алгоритмы позволяют повысить эффективность формирования ЭКБ космического применения за счет:

- повышения средней эффективности АГ электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям по индексу Рэнда (до значения 0,884);

- повышения средней доли выявляемых потенциально ненадежных элементов партий ЭКБ путем дополнительного применения новых алгоритмов определения элементов-выбросов, являющихся носителями накопительного (кумулятивного) эффекта от суммарных отклонений отдельных характеристик элементов.

Результаты, полученные в ходе исследования, использовались при разработке алгоритмов обучения без учителя и с частичным привлечением учителя в рамках государственного задания № FEFE-2020-0013 «Развитие теории самоконфигурирующихся алгоритмов машинного обучения для проектирования и прогнозирования характеристик компонентов сложных систем», а также в рамках работ по гранту НШ-421.2022.4 «Совместное применение эволюционных вычислений, кластерного анализа, алгоритмов теории тестов и логического анализа данных при построении систем предиктивной аналитики и диагностики» по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях и семинарах: «Решетневские чтения» (г. Красноярск, 2018-2022г.); ЭКОПРОМ-2021 (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); IWMMA'2021 (г. Красноярск, 2021г.).

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 12 печатных работах, среди которых 3 работы в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых в действующем Перечне ВАК, 3 – в международных изданиях, индексируемых в системе цитирования Scopus. Имеется 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, приложений и списка использованной литературы, изложена на 195 листах машинописного текста, содержит список литературы из 142 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность, поставлена цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, а также изложены методы исследования и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Раздел 1 посвящен общей постановке задачи АГ, определению сфер применения алгоритмов АГ, анализу текущего состояния и развития методов и задач АГ, а также введению математических характеристик и их обозначений для объектов применения методов АГ - множеств однотипных объектов.

Пусть задано множество P , состоящее из N_p однотипных объектов e_i ($i=\overline{1, N_p}$): $P=\{e_1, e_2, \dots, e_{N_p}\}$. Объекты e_i ($i=\overline{1, N_p}$) будем называть однотипными, если их свойства определяются заданным набором вещественных числовых характеристик

h_j ($j=\overline{1, N_p}$), так, что каждому объекту $e_i \in P$ соответствует вектор характеристик: $V_i=(h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{iN_h})$.

Характеристики h_j ($j=\overline{1, N_p}$), как правило, имеют разную физическую природу и диапазон допустимых значений. Так, если в качестве множеств однотипных объектов рассматриваются партии ЭКБ, то характеристиками, определяющими свойства объектов, являются следующие измеренные параметры: силы тока (амперы), напряжения (вольты), коэффициенты усиления (децибелы). Поскольку рассматриваемые в работе алгоритмы АГ основаны на измерении расстояний между векторами характеристик элементов e_i ($i=\overline{1, N_p}$), то необходимо осуществить предварительное преобразование характеристик объектов к безразмерному и соразмерному виду, для чего производится нормирование (масштабирование) характеристик, в результате чего определяются нормированные векторы характеристик $V_i^n=(h_{i1}^n, h_{i2}^n, \dots, h_{iN_h}^n)$.

Нормирование характеристик h_{ij} ($i=\overline{1, N_p}; j=\overline{1, N_h}$) осуществляется по формуле: $h_{ij}^n=(h_{ij} - h_j^{av})/dn_j$, где: dn_j – диапазон нормирования (ДН) j -й характеристики, а величина h_j^{av} – среднее значение величин h_{ij} ($i=\overline{1, N_p}$): $h_j^{av}=(\sum_{i=1}^{N_p} h_{ij})/N_p$. Возможные различные варианты определения ДН: экспертным путем, в виде диапазонов допустимых значений, с применением статистических методов и т.д. Анализ результатов АГ партий ЭКБ, приведенный в Разделе 4, показал, что наилучший из предложенных методов определения ДН, с точки зрения эффективности результатов группировки, дает комбинированный метод определения ДН, при котором величина dn_j определяется по формуле: $dn_j=\max(d_j^{st}, dz_j)$. Здесь: dz_j – диапазон значимости (ДЗ) характеристики h_j , определяемый экспертным путем; d_j^{st} – величина, определяемая с статистическими методами: $d_j^{st}=3 \cdot \sigma_j^p$, где: σ_j^p ($j=\overline{1, N_h}$) – среднее квадратическое отклонение (СКО) множества $\{h_{ij} (i=\overline{1, N_p})\}$.

Для множества P однотипных объектов определяется виртуальный элемент – центр группы C_p , которому соответствует вектор нормированных характеристик: $V_c^n=(h_1^c, h_2^c, \dots, h_{N_h}^c)$, где: $h_j^c=(\sum_{i=1}^{N_p} h_{ij}^n)/N_p$. Для каждого объекта e_i ($i=\overline{1, N_p}$) множества P определяется радиус-вектор $\vec{R}_i = V_i^n - V_c^n$ и радиус $R_i = \|\vec{R}_i\|$.

Для задачи автоматической группировки ЭКБ современная литература предлагает множество методов, основанных как на расстояниях между элементами, так и на плотности распределения характеристик элементов. Разработаны методы с использованием расстояний Махаланобиса с предварительной идентификацией параметров расстояний Махаланобиса по размеченной выборке. Методы, основанные на расстояниях, показывают более высокую эффективность (по индексу Рэнда). Тем не менее, не решенной остается задача определения числа однородных групп в множестве элементов ЭКБ. Известные показатели для определения числа однородных групп (силуэт, метод локтя, критерии Акаике, Байеса и др.) часто дают ошибочный результат. Более того, известные методы выделяют кластерную структуру в практически любой однородной группе элементов ЭКБ. Требуется разработка методов, обеспечивающих эффективное разделение на однородные группы, соответствующие производственным партиям, с определением числа партий.

Раздел 2 посвящен решению двух задач:

1) Разработке метода АГ множеств однотипных объектов, осуществляющего поиск варианта кластеризации с заданной эффективностью разделения на группы (**Задача 1**).

2) На базе полученного метода разработке алгоритма АГ партий ЭКБ в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям (**Задача 2**).

В свою очередь, **Задача 1** распадается на три подзадачи: а), б) и в).

Задача 1а. Введение характеристик эффективности разделения на группы. Пусть множество P однотипных объектов поделено на совокупность G_p , состоящую из N_g непересекающихся групп G_k ($k=\overline{1, N_g}$): $G_p = \{G_1, G_2, \dots, G_{N_g}\}$ ($P = \bigcup_{k=1}^{N_g} G_k; \bigcap_{k=1}^{N_g} G_k = \emptyset$). Для оценки эффективности разделения множества P на группы G_p вводятся следующие характеристики:

а) Вектор показателей эффективности разделения на группы $V_{ed} = (I_1, I_2, \dots, I_{N_{ed}})$, объединяющий N_{ed} вещественных показателей - I_j ($j = \overline{1, N_{ed}}$), каждый из которых является характеристикой эффективности разделения множества P на группы G_p .

В качестве показателей эффективности разделения на группы I_j ($j = \overline{1, N_{ed}}$) могут быть выбраны как хорошо известные в кластерном анализе показатели (критерии), так и введены новые, исходя из особенностей решаемых задач АГ.

Пусть E_j ($j = \overline{1, N_{ed}}$) – область допустимых значений показателя I_j , тогда $E_{ed} = E_1 \times E_2 \times \dots \times E_{N_{ed}}$ – область допустимых значений векторов V_{ed} .

б) В области E_{ed} задается область S_{ed} эффективного разделения множества P на группы G_p . Под эффективным разделением мы понимаем разделение, соответствующее классам размеченной выборки при наличии таковой.

Для того, чтобы вариант разделения множества P на группы G_p соответствовал заданной эффективности разделения, необходимо выполнение условия: $V_{qc} \in S_{qd}$.

Пусть S_p – совокупность всех вариантов разделения множества P на непересекающиеся группы с учетом ограничений на число N_g групп ($N_g \leq N_p^{max}$): $S_p = \{ \{G_k (k = \overline{1, N_g})\} : P = \bigcup_{k=1}^{N_g} G_k; \bigcap_{k=1}^{N_g} G_k = \emptyset; N_g = \overline{1, N_p^{max}} \}$.

Обозначим символом S_p^{ed} совокупность всех вариантов разделения множества P на непересекающиеся группы, для которых выполняются условия эффективного разделения на группы, задаваемые характеристиками V_{qc} и S_{qd} : $S_p^{ed} = \{G_p^{ed} : G_p^{ed} \in S_p; V_{qc}(G_p^{ed}) \in S_{qd}\}$.

Здесь возможны два варианта: а) совокупность S_p^{ed} является пустой ($S_p^{ed} = \emptyset$), что означает, что нет вариантов АГ множества P на N_g групп ($N_g \leq N_p^{max}$), обеспечивающих заданную характеристиками V_{qc} и S_{qd} эффективность разделения; б) S_p^{ed} – не пустая ($S_p^{ed} \neq \emptyset$), тогда S_p^{ed} представляет совокупность вариантов АГ множества P на N_g групп ($N_g \leq N_p^{max}$), обеспечивающих заданную характеристиками V_{qc} и S_{qd} эффективность разделения на группы.

Задача 1б. Разработка алгоритмов АГ с применением характеристик V_{ed} и S_{ed} эффективности разделения на группы.

Пусть алгоритм Alg_{AG} – алгоритм, осуществляющий поиск оптимального (в смысле максимума значения целевой функции F_{AG}) варианта АГ элементов множества P однотипных объектов с заданием ограничением на максимальное число N_p^{max} групп деления. Результатом АГ множества P алгоритмом Alg_{AG} является совокупность множеств G_{opt} , состоящая из N_{opt} непересекающихся

групп: $G_{opt} = \{G_k^{opt} (k = \overline{1, N_{opt}})\}$, для которой одновременно выполняются два условия: $G_{opt} \in S_p$ и $F_{AG}(G_{opt}) = \max_{G_p \in S_p} \{F_{AG}(G_p)\}$.

Алгоритм Alg_{AG}^{ed} , осуществляющий поиск условно оптимального варианта кластеризации G_{opt} , обеспечивающего заданную эффективность разделения на группы, создается на базе алгоритме Alg_{AG} . Для этого алгоритм Alg_{AG} дополняется последовательными процедурами, осуществляющими для каждого варианта кластеризации G_p , участвующего в поиске максимального значения целевой функции F_{AG} , следующие действия:

а) Расчет вектора показателей эффективности разделения на группы, соответствующего варианту кластеризации G_p : $V_{ed}(G_p) = (P_1(G_p), P_2(G_p), \dots, P_{N_{ed}}(G_p))$.

б) Проверку выполнения условия: $V_{ed}(G_p) \in S_{ed}$. Если условие $V_{ed}(G_p) \in S_{ed}$ выполняется, то вариант разделения множества P на совокупность групп G_p участвует в поиске максимального значения целевой функции F_{AG} , если условие $V_{ed}(G_p) \in S_{ed}$ не выполняется, то вариант кластеризации G_p в поиске не участвует.

в) По завершении процедуры поиска условно оптимального варианта кластеризации G_{opt}^{ed} формирование результата АГ в виде: $Alg_{AG}^{ed}(P) = (Pr_{ed}; G_{opt}^{ed})$, где:

- Pr_{ed} - признак наличия варианта АГ, обеспечивающего заданную эффективность разделения на группы: $Pr_{ed} = 1$, если вариант найден; $Pr_{ed} = 0$, если вариант не найден;

- $G_{opt}^{ed} = \{G_k^{ed} (k = \overline{1, N_{opt}^{ed}})\}$ – условно оптимальный вариант АГ множества P , обеспечивающий максимальное значение целевой функции F_{AG} при условии выполнения ограничений: $V_{ed}(G_{opt}^{ed}) \in S_{ed}$.

Если $Pr_{ed} = 0$, то это значит, что множество P неделимо алгоритмом Alg_{AG}^{ed} на N_g групп ($N_g \leq N_p^{max}$), и в этом случае можно считать: $N_{opt}^{ed} = 1$ и $G_{opt}^{ed} = P$.

Если множество P невозможно разделить на группы с обеспечением заданного характеристиками V_{ed} и S_{ed} эффективности разделения, то будем считать, что множество P обладает свойством *однородности*, задаваемым характеристиками V_{ed} и S_{ed} . Наоборот, если множество P делится на группы с обеспечением условия $V_{ed} \in S_{ed}$, будем считать, что множество P обладает свойством *неоднородности*, задаваемым характеристиками V_{ed} и S_{ed} .

Если множество P делится на группы G_{opt}^{ed} с обеспечением заданной характеристиками V_{ed} и S_{ed} эффективности разделения, то будем считать, что группы G_{opt}^{ed} обладают свойством *различия*, заданным характеристиками V_{ed} и S_{ed} .

Примечание 1. Веденные свойства однородности (неоднородности) являются условными, так как практическое определение этих свойств основано на применении конкретных реализаций алгоритмов Alg_{AG}^{ed} , осуществляющих поиск варианта кластеризации, обеспечивающего эффективность разделения на группы, заданную характеристиками V_{ed} и S_{ed} .

Таким образом, алгоритм поиска варианта АГ элементов множества однотипных объектов P , обеспечивающего заданную характеристиками V_{ed} и S_{ed} эффективность разделения на группы, может быть определен как алгоритм, который осуществляет:

а) Определение свойства однородности (неоднородности) множества P , заданное характеристиками V_{ed} и S_{ed} .

б) В случае, если определено, что множество P обладает свойством неоднородности, условно оптимальную группировку элементов P в группы G_{opt}^{ed} , обладающие свойством различия, заданным характеристиками V_{ec} и S_{ed} .

Задача 1в. Определение границ B_{ed} области S_{ed} эффективного разделения на группы. Как правило, при решении практических задач определение границ B_{ed} области S_{ed} теоретическими расчетами осуществить не представляется возможным. В связи с этим, для решения этой задачи предлагается использовать метод обучения с частичным привлечением учителя на базе размеченных обучающих выборок (ОВ), состоящих из специально подобранного набора N_{ts} обучающих множеств OM_i ($i=\overline{1, N_{ts}}$) - объектов заданного типа. OM_i ($i=\overline{1, N_{ts}}$), составляющие ОВ, предназначены для задания характеристик, определяющих свойства различия между группами объектов, в связи с чем к ним предъявляются следующие требования:

1. Каждое OM_i ($i=\overline{1, N_{ts}}$) обладает свойством однородности, которое предполагается задать характеристиками V_{ed} и S_{ed} .

2. Каждая пара OM_i и OM_j ($i, j=\overline{1, N_{ts}}; i \neq j$) обладает свойством различия, которое предполагается задать характеристиками V_{ed} и S_{ed} .

Например, при решении задачи АГ партий ЭКБ в группы, соответствующие разным производственным партиям, характеристиками V_{ed} и S_{ed} предполагается задавать различия между производственными партиями, поэтому OM_i ($i=\overline{1, N_{ts}}$), входящие в состав ОВ, должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Каждое OM_i ($i=\overline{1, N_{ts}}$) состоит из элементов, принадлежащих одной производственной партии.

2. Все OM_i ($i=\overline{1, N_{ts}}$) принадлежат разным производственным партиям.

Дополнительно на базе ОВ формируется OB_p - обучающая выборка частей ОМ (ОВЧ), состоящая из N_{ts} обучающих множеств OM_{pi} ($i=\overline{1, N_{ts}}$). Каждое OM_{pi} - это часть обучающего множества OM_i , содержащая N_{part} элементов. Число N_{part} определяется соотношением: $N_{part} = \text{int}(N_{ev}/2)$, где N_{ev} - среднее число элементов в ОВ. Порядок формирования OM_{pi} из элементов OM_i ($i=\overline{1, N_{ts}}$) не имеет принципиального значения.

Примечание 2. Введение OB_p имеет вполне определенный практический смысл. Как показывает практика, исследуемые множества однотипных объектов, АГ которых предполагается осуществлять с применением алгоритма Alg_{AG}^{ed} , как правило, содержат приблизительно одинаковое число элементов. Выборка OB_p вводится для того, чтобы определение B_{ed} осуществлялось с учетом эффективности АГ алгоритма Alg_{AG}^{ed} в «рабочей точке», имея в виду среднее число элементов исследуемых множеств заданного типа.

Для алгоритма Alg_{AG}^{ed} определение границ B_{ed} области S_{ed} эффективного разделения на группы на базе ОВ осуществляется поиском варианта, обеспечивающего одновременное выполнение условий $U1$ и $U2$:

$U1$. Каждое OM_i ($i=\overline{1, N_{ts}}$), входящее в состав ОВ, должно быть определено алгоритмом Alg_{AG}^{ed} как однородное.

$U2$. Все парные объединения OM_i и OM_j ($i, j=\overline{1, N_{ts}}; i \neq j$), входящих в состав ОВ, и все парные объединения OM_{pi} и OM_{pj} ($i, j=\overline{1, N_{ts}}; i \neq j$), входящих в состав OB_p , должны быть с максимально возможной эффективностью разделены алгоритмом

Alg_{AG}^{ed} на группы, соответствующие составляющим их множествам OM_i и OM_{pi} ($i=\overline{1, N_{ts}}$), соответственно.

Для подтверждения качества группировки, осуществляемой алгоритмом Alg_{AG}^{ed} , применяется *тестовая выборка* ТВ - специально подобранный набор N_{test} *тестовых множеств* TM_i ($i=\overline{1, N_{test}}$) - объектов заданного типа. При этом, требования, предъявляемые к OM_i ($i=\overline{1, N_{ts}}$), распространяются на TM_i ($i=\overline{1, N_{test}}$). Кроме того, предъявляется дополнительное требование: ОВ и ТВ не должны пересекаться между собой. Для проведения процедуры тестирования по аналогии с OB_p и OM_{pi} ($i=\overline{1, N_{ts}}$) формируются TB_p и TM_{pi} ($i=\overline{1, N_{test}}$). Чтобы тестирование считалось успешным, необходимо выполнение условия $U1t$:

$U1t$. Все TM_i ($i=\overline{1, N_{test}}$), входящие в состав ТВ, были определены алгоритмом Alg_{AG}^{ed} как однородные.

Таким образом, алгоритм определения границ B_{ed} области S_{ed} эффективного разделения на группы на базе ОВ можно представить в следующем виде:

Шаг 1. Задаются ОВ и ТВ из множеств объектов заданного типа.

Шаг 2. На базе ОВ и ТВ формируются OB_p и TB_p .

Шаг 3. Задается вектор V_{qc} показателей эффективности разделения на группы.

Шаг 4. Осуществляется поиск варианта границ B_{ed} области эффективного деления S_{ed} , обеспечивающих одновременное выполнение условий $U1$, $U1t$ и $U2$ с расчетом индекса Рэнда I_R^{OB} , для оценки эффективности группировки парных объединений множеств, входящих в состав ОВ и OB_p .

Шаг 5. Осуществляется тестирование алгоритма Alg_{AG}^{ed} по ТВ с расчетом индекса Рэнда I_R^{TB} для оценки эффективности группировки парных объединений множеств, входящих в состав ТВ и TB_p .

Шаг 6. По формуле: $I_R = \min(I_R^{OB}; I_R^{TB})$ рассчитывается индекс Рэнда I_R , являющийся итоговой оценкой эффективности работы алгоритма Alg_{AG}^{ed} .

Задача 2. Разработка алгоритма АГ электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям.

Исходными данными для АГ партии P ЭКБ заданного типа, состоящей из N_p элементов e_i ($i=\overline{1, N_p}$) являются характеристики (тестовые параметры – ТП) элементов e_i , измеренные в ходе неразрушающих испытаний, образующие вектора характеристик размерности N_h : $V_i^h = (h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{iN_h})$.

Идея АГ партий ЭКБ базируется на следующем свойстве: электронные компоненты, принадлежащие разным производственным партиям, в пространстве характеристик (ТП) образуют обособленные группы, удовлетворяющие определенному уровню эффективности кластеризации. Для иллюстрации этого свойства ниже приведены результаты измерения характеристик (ТП) для партии ЭКБ, все элементы которой принадлежащей одной производственной партии (Рисунок 1) и сводной партии ЭКБ, состоящей из элементов, принадлежащих двум производственным партиям (Рисунок 2).

На Рисунках 1, 2 применены следующие обозначения: 564ЛА7В, 140УД25А – обозначение типа ЭКБ: логическая микросхема и операционный усилитель, соответственно; КП – код партии. Рисунки построены с применением метода многомерного шкалирования (ММШ), отображающего точки в N_h -мерном пространстве характеристик ЭКБ (для ЭКБ 564ЛА7В: $N_h=134$, для ЭКБ 140УД25А: $N_h=9$) в двумерное пространство.

- $k_{sep}^{d/r}$, $k_{sep}^{d/l}$ – дополнительные коэффициенты сепарации, определяемые соотношениями: $k_{sep}^{d/r} = \min_{k,m=\overline{1,N_g}; k \neq m} \{k_{km}^{sep.d/r}\}$, $k_{sep}^{d/l} = \min_{k,m=\overline{1,N_g}; k \neq m} \{k_{km}^{sep.d/l}\}$. Здесь: $k_{km}^{sep.d/r}$, $k_{km}^{sep.d/l}$ – коэффициенты сепарации групп G_k и G_m , определяемые по формулам: $k_{km}^{sep.d/r} = D_{km}^{sep}/R_k^{sep}$, $k_{km}^{sep.d/l} = D_{km}^{sep}/L_k^{min.av}$, где: D_{km}^{sep} – диапазон разделения групп G_k и G_m , а R_k^{sep} – радиус группы G_k по линии, соединяющей центры этих групп C_k и C_k ; $L_k^{min.av}$ – среднее значение расстояний между элементами группы G_k .

Параметры D_{km}^{sep} , R_k^{sep} , R_m^{sep} определяются на базе проекций радиус-векторов $\overrightarrow{R_{k_i}}$ и $\overrightarrow{R_{m_j}}$ элементов $e_i \in G_k$ и $e_j \in G_m$ на линию, соединяющую центры этих групп C_k и C_k . Для уменьшения влияния шумовых составляющих измерения характеристик объектов параметры D_{km}^{sep} , R_k^{sep} , R_m^{sep} , $L_k^{min.av}$, $L_m^{min.av}$ определяются с применением статистических методов.

Состав вектора V_{ed} предложен по результатам большого объема экспериментальных исследований, проведенных на базе данных АО «ИТЦ – НПО ПМ». Формирование вектора V_{ed} осуществлялось последовательным наращиванием числа показателей, входящих в состав вектора V_{ed} по мере выяснения того, что текущий состав вектора V_{ed} поставленную задачу не решает. Исследования начались с использования единственного показателя эффективности деления – критерия «Силуэт», но быстро выяснилось, что такой подход дает неудовлетворительные результаты. По завершению нескольких экспериментальных итераций получен окончательный вариант состава вектора V_{ed} . Признаки Pr_{min}^{el} и Pr_{sd} носят технический характер. Так, признаком Pr_{min}^{el} ограничивается минимальное число элементов формируемой группы исходя из практической целесообразности. Например, нет смысла формировать группу ЭКБ, число элементов которой меньше числа элементов в тестовой выборке для разрушающих испытаний. Признаком Pr_{sd} задается нижняя граница группировки, т.к. деление элементов на группы, различие характеристик которых меньше диапазона значимости, не имеет практического смысла. Показатели KS , $k_{sep}^{d/r}$ и $k_{sep}^{d/l}$ определяют дополняющие друг друга признаки эффективности группировки.

3. Задание границ B_{ed} области эффективного деления S_{ed} .

Для заданного вектора $V_{ed} = (Pr_{min}^{el}, Pr_{sd}, KS, k_{sep}^{d/r}, k_{sep}^{d/l})$ область эффективного деления S_{ed} имеет вид: $S_{ed} = (Pr_{min}^{el} = B_{el}^{min}; Pr_{sd} = B_{sd}; KS \geq B_{KS}; k_{sep}^{d/r} \geq B_{sep}^{d/r}; k_{sep}^{d/l} \geq B_{sep}^{d/l})$. Границы $B_{qd} = (B_{el}^{min}, B_{sd}, B_{KS}, B_{sep}^{d/r}, B_{sep}^{d/l})$ области S_{ed} определяются соотношениями:

- 1) $B_{el}^{min} = B_{sd} = 1;$
- 2) $B_{KS} = \begin{cases} KS_{max}^{lim}, & \text{если: } KS_{min}^c \geq KS_{max}^{lim} \\ KS_{min}^c, & \text{если: } KS_{min}^{lim} > KS_{min}^c > KS_{max}^{lim} \\ KS_{min}^{lim}, & \text{если: } KS_{min}^c \leq KS_{min}^{lim} \end{cases}$.

Здесь: KS_{min}^{lim} и KS_{max}^{lim} – заданные минимальное и максимальное значение величины KS_{min} ; $KS_{min}^c = \begin{cases} KS_{min}^*, & \text{если: } k_{sep}^{d/r} < k_{sep.k_s}^{d/r} \\ \lambda_{k_s} \cdot KS_{min}^*, & \text{если: } k_{sep}^{d/r} \geq k_{sep.k_s}^{d/r} \end{cases}$, где: $k_{sep.k_s}^{d/r}$, λ_{k_s} – заданное пороговое значение коэффициента сепарации $k_{sep}^{d/r}$ и коэффициент уменьшения величины KS_{min}^c , соответственно; $KS_{min}^* = \beta_{k_s} - \alpha_{k_s} \cdot N_p$, где: β_{k_s} , α_{k_s} – заданные коэффициенты, N_p – количества элементов партии P .

- 3) $B_{sep}^{d/r}$, $B_{sep}^{d/l}$ – постоянные величины.

Параметры $N_{min}^{el.g}, KS_{min}^{lim}, KS_{max}^{lim}, \lambda_{ks}$ – имеют постоянное значение для всех типов ЭКБ и задаются, исходя из опыта работы с ЭКБ. Параметры $\beta_{ks}, \alpha_{ks}, B_{sep}^{d/r}, B_{sep}^{d/l}, k_{sep,ks}^{d/r}$ для каждого типа ЭКБ определяются в процессе обучения по ОВ в соответствии с приведенной выше методикой. Предложенная система уравнений, задающих границы B_{ed} области эффективного деления S_{ed} , является результатом большого объема экспериментальной работы, в ходе которой был определен ряд закономерностей, в частности необходимости введения обратной линейной зависимости граничного значения критерия «Силуэт» от количества элементов в партии. Для иллюстрации изложенного материала, в Разделе 4 приведены примеры определения границ B_{ed} области эффективного деления S_{ed} с применением ОВ для 4 типов ЭКБ.

Раздел 3 посвящен разработке алгоритмов определения элементов-выбросов (ЭВ) партий ЭКБ, как элементов, являющихся носителями накопительного (кумулятивного) эффекта от суммарных отклонений отдельных характеристик элементов от их средних по партии значений.

Для поиска параметров алгоритмов, обеспечивающих наиболее эффективное определение ЭВ, применяется размеченная обучающая выборка ОВ.

1. Алгоритмы определения ЭВ. Пусть задана партия P электронных компонентов e_i : $P = \{e_i (i = \overline{1, N_P})\}$. В общем виде алгоритм определения ЭВ можно представить следующим образом: $Alg_{EV}(P) = M_{EV}^P$, где: $M_{EV}^P = \emptyset$, если алгоритм Alg_{EV} не обнаружил ЭВ в партии P : M_{EV}^P – множество ЭВ, состоящее из N_{EV} ЭВ e_i^{ev} , определенных алгоритмом Alg_{EV} : $M_{EV}^P = \{e_i^{ev} (i = \overline{1, N_{EV}})\}$.

Работа предложенных алгоритмов основана на общем подходе к определению ЭВ как элементов ЭКБ, суммарные отклонения характеристик которых от их средних по партии значений превышает некий предельный расчетный уровень. Для этого используются введенные в Разделе 1 характеристики: C_P – центр партии P и R_i – радиусы элементов $e_i (i = \overline{1, N_P})$. ЭВ будет считаться элемент, радиус которого превышает некое расчетное по партии P пороговое значение радиуса R_{EV} . Правомочность такого подхода основана на исследованиях, проведенных Сташковым Д.В., которые показали, что отдельные характеристики электронных компонентов имеют распределения, близкие к нормальному или экспоненциальному. Алгоритмы Alg_{EV} отличаются друг от друга способом формирования величины R_{EV} .

В данной работе рассматриваются три алгоритма Alg_{EV} : Alg_{EV1} , Alg_{EV2} и Alg_{EV3} , зарекомендовавшие себя как наиболее эффективные алгоритмы определения ЭВ партий ЭКБ.

Алгоритм 1 (Alg_{EV1}). Работа алгоритма Alg_{EV1} : элемент $e_i \in P (i = \overline{1, N_P})$ будет определен как ЭВ, если выполняется условие: $R_i > R_{EV}$, где:

- R_i – радиус элемента e_i , определенный в Разделе 1;

- величина R_{EV} определяется соотношением: $R_{EV} = R_{av} + k_R \cdot \sigma_R$, где

$R_{av} = (\sum_{i=1}^{i=N_P} R_i) / N_P$, $\sigma_R = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=N_P} (R_i - R_{av})^2 / (N_P - 1)}$, k_R – коэффициент применения σ_R (на практике, как правило: $2 \leq k_R \leq 3$).

Алгоритм 2 (Alg_{EV2}). Алгоритм Alg_{EV2} аналогичен алгоритму Alg_{EV1} , отличие заключается в методике определении R_{EV} .

На базе множества $R_P = \{R_1, R_2, \dots, R_{N_P}\}$ радиусов элементов e_i формируется ранжированная по возрастанию последовательность: $R_P^r = \{R_1^r, R_2^r, \dots, R_{N_P}^r\}$ ($R_i^r \in R_P$, $R_i^r \geq R_{i+1}^r$) и последовательность относительных приращений радиусов элементов: $dR_P^r = \{dR_1^r, dR_2^r, \dots, dR_{N_P-1}^r\}$: $dR_i^r = (dR_i^r - dR_{i+1}^r) / dR_{i+1}^r$.

Далее, определяется номер k_{EV} как максимальный номер $k (k = \overline{1, N_{dr}})$, для которого выполняется условие: $dR_k^r \geq dR_{EV}$. Здесь: N_{dr} – число, определяемое

соотношением: $N_{dr} = \text{int}(\lambda_{dr} \cdot N_P)$, где λ_{dr} – заданное число (на практике: $0,25 \leq \lambda_{dr} \leq 0,3$), dR_{EV} – величина, определяемая соотношением $dR_{EV} = \max(dR_{EV}^{min}, dR_{EV}^c)$, Здесь: dR_{EV}^{min} – мин. значение величины dR_{EV} (на практике: $dR_{EV}^{min} \geq 0,10$), $dR_{EV}^c = dR_{av} + 3 \cdot \sigma_{dr}$, при $dR_{av} = (\sum_{i=1}^{N_P-1} dR_i^r) / (N_P - 1)$, $\sigma_{dr} = \sqrt{(\sum_{i=1}^{N_P-1} (dR_i^r - dR_{av})^2) / (N_P - 2)}$.

Величина R_{EV} определяется соотношением: $R_{EV} = R_{k_{EV}}^r$. В том случае, если нет номера k_{EV} , для которого выполняется условие $dR_k^r \geq dR_{EV}$, то в множестве P нет ЭВ.

Алгоритм 3 (Alg_{EV3}). Алгоритм Alg_{EV3} работает аналогично Alg_{EV2} . Но при этом, между ними имеется существенное отличие. Алгоритм Alg_{EV2} определяет ЭВ на базе последовательности радиусов элементов R_i ($i = \overline{1, N_P}$) без учета пространственного направления соответствующих радиус-векторов \vec{R}_i . В отличие от Alg_{EV2} алгоритм Alg_{EV3} определяет ЭВ с учетом пространственного направления радиус-векторов \vec{R}_i элементов e_i партии P .

Шаг 1. Определяется множество пространственных направления определения ЭВ - $L_{EV} = \{\vec{R}_1^r, \vec{R}_2^r, \dots, \vec{R}_{N_{dr}}^r\}$, где \vec{R}_i^r ($i = \overline{1, N_{dr}}$) – радиус-вектор, соответствующий радиусу R_i^r ($R_P^r = \{R_1^r, R_2^r, \dots, R_{N_P}^r\}$) и N_{dr} определяются как в алгоритме Alg_{EV2}).

Шаг 2. Для каждого пространственного направления $\vec{R}_i^r \in L_{EV}$ ($i = \overline{1, N_{dr}}$) по алгоритму Alg_{EV2} определяется множество ЭВ - M_{EV}^i , где вместо множества радиусов элементов $R_P = \{R_1, R_2, \dots, R_{N_P}\}$ используется множество проекций радиус-векторов элементов \vec{R}_j ($j = \overline{1, N_P}$) на вектор \vec{R}_i^r ($i = \overline{1, N_{dr}}$).

Шаг 3. Множество ЭВ M_{EV}^P определяется как объединение множеств M_{EV}^i : $M_{EV}^P = \bigcup_{i=1}^{N_{dr}} M_{EV}^i$.

2. Определение параметров алгоритмов, обеспечивающих наиболее эффективное определение ЭВ для партий ЭКБ заданного типа с применением размеченной ОБ. Предложенный метод основан на использовании ОБ - специально подобранного набора N_{ts} обучающих множеств OM_i ($i = \overline{1, N_{ts}}$), каждое из которых представляет из себя партию ЭКБ заданного типа. Все OM_i ($i = \overline{1, N_{ts}}$), входящие в состав ОБ, должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к ОМ, используемым для обучения алгоритмов АГ. Помимо этого, предъявляется дополнительное требование: OM_i ($i = \overline{1, N_{ts}}$) должны быть экспертным путем определены как *не имеющие в своем составе ЭВ*. В связи с этим, в качестве OM_i ($i = \overline{1, N_{ts}}$), могут быть выбраны ОМ, используемые для обучения алгоритмов АГ, из состава которых удалены элементы, экспертно определенные как ЭВ.

Определение параметров алгоритма Alg_{EV} (обучения алгоритма Alg_{EV}) основано на идее использования в качестве ЭВ элементов, принадлежащих другой производственной партии и оценке эффективности работы алгоритма Alg_{EV} , осуществляя определение ЭВ по ОМ, к которым добавляется определенное количество элементов, принадлежащих другому ОМ. Для этого для каждого OM_i формируется *множество дополняющих элементов* OM_i^d , состоящее из N_d наиболее репрезентативных элементов OM_i , в качестве которых выбираются элементы с наименьшим разбросом характеристик (ТП) от их средних значений по OM_i ($i = \overline{1, N_{ts}}$). На базе OM_i и OM_j^d ($i, j = \overline{1, N_{ts}}$) формируется *дополненная обучающая выборка* (ДОВ), состоящая из N_{dov} элементов ($N_{dov} = N_{ts} \cdot (N_{ts} + 1)$): $\{OM_{ij}^d = OM_i \cup OM_j^d (i, j = \overline{1, N_{ts}}; i \neq j)\}$.

Для оценки эффективности обучения алгоритма Alg_{EV} вводятся показатели эффективности обучения алгоритма определения ЭВ: Pc_{ER}^{OB} – средняя доля ошибочно определенных ЭВ по ОБ и ДОВ; Pc_{EV}^{OB} – средняя доля верно определенных ЭВ по ДОВ.

Для подтверждения эффективности работы алгоритма Alg_{EV} определения ЭВ применяется ТВ - некоторый специально подобранный набор N_{test} тестовых множеств TM_i ($i=\overline{1, N_{test}}$) – партий ЭКБ заданного типа. К TM_i ($i=\overline{1, N_{test}}$) предъявляются те же требования, что и к OM_i ($i=\overline{1, N_{ts}}$). При этом, ОБ и ТВ не должны пересекаться между собой: $OB \cap TB = \emptyset$. В качестве ТВ может быть выбрана ТВ, применяемая для тестирования алгоритмов АГ.

Для каждого TM_i формируется множество дополняющих элементов TM_i^d , состоящее из N_d наиболее репрезентативных элементов TM_i , в качестве которых выбираются элементы, имеющие наименьший разброс характеристик (ТП) от их средних значений по TM_i ($i=\overline{1, N_{test}}$). На базе TM_i и TM_j^d ($i, j=\overline{1, N_{test}}$) формируется дополненная тестовая выборка (ДТВ), состоящая из N_{dtv} элементов ($N_{dtv} = N_{test} \cdot (N_{test} - 1)$): $\{TM_{ij}^d = TM_i \cup TM_j^d (i, j = \overline{1, N_{test}}; i \neq j)\}$.

Для оценки эффективности обучения алгоритма Alg_{EV} вводятся следующие показатели: Pc_{ER}^{TB} - средняя доля ошибочно определенных ЭВ по ТВ и ДТВ; Pc_{EV}^{TB} – средняя доля верно определенных ЭВ по ДТВ.

Предлагается следующий метод определения параметров алгоритма Alg_{EV} , обеспечивающих определения ЭВ с наибольшей эффективностью для партий ЭКБ заданного типа с применением ОБ и ТВ:

Шаг 1. Задаются ОБ и ТВ из множеств объектов заданного типа.

Шаг 2. Формируются ДОВ и ДТВ.

Шаг 3. Задается предельное значение доли ошибочно определенных ЭВ - Pc_{ER}^{max} .

Шаг 4. Определяются параметры алгоритма Alg_{EV} , осуществляющего определение ЭВ множеств, принадлежащих ОБ и ДОВ с максимальной эффективностью Pc_{EV}^{OB} при условии выполнения ограничения U_{OB} : $Pc_{ER}^{OB} \leq N_{ER}^{max}$.

Шаг 5. Осуществляется тестирование алгоритма Alg_{EV} по ТВ и ДТВ. Определяются параметры: Pc_{EV}^{TB} и Pc_{ER}^{TB} .

Шаг 6. Определяется выполнение условие U_{TB} : $Pc_{ER}^{OB} \leq N_{ER}^{max}$. Если условие U_{TB} выполняется, то переходим к Шагу 7. Если условие U_{TB} не выполняется, то ослабляются требования к ошибочному определению ЭВ, для чего увеличивается значение параметра Pc_{ER}^{max} и осуществляется переход к Шагу 4.

Шаг 7. Параметры алгоритма Alg_{EV} определены. Рассчитываются результирующие показатели эффективности работы алгоритма Alg_{EV} : $Pc_{EV} = \min(Pc_{EV}^{OB}, Pc_{EV}^{TB})$ - средняя доля верно определенных ЭВ и $Pc_{ER} = \max(Pc_{ER}^{OB}, Pc_{ER}^{TB})$ - средняя доля ошибочно определенных ЭВ.

Параметры Pc_{EV} и Pc_{ER} могут также быть применены для сравнения эффективности различных алгоритмов Alg_{EV} определения ЭВ. В Разделе 4 приведены примеры применения изложенного метода для выбора наиболее эффективного алгоритма Alg_{EV} определения ЭВ для 4-х типов ЭКБ, используемых для иллюстрации обучения алгоритмов АГ.

Раздел 4 посвящен использованию алгоритмов АГ в технологическом процессе испытаний ЭКБ космического применения.

В первой части раздела приведено описание процесса формирования ЭКБ космического применения, производимых в ИТЦ, как единственно возможного в настоящее время в РФ пути формирования ЭКБ категории качества «Space». ИТЦ проводят комплекс испытаний с целью выявления и отбраковки электронных компонентов, не обеспечивающих качественное функционирование в течение 10-15 лет в составе аппаратуры в условиях космического пространства.

Все испытания делятся на две группы: неразрушающие испытания, которым подвергается 100% элементов, и разрушающие испытания, проводимые на специально сформированных из элементов партии выборках. В разделе рассмотрено применение предложенных в диссертации алгоритмов АГ в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям и выявления потенциально-ненадежных элементов.

1. АГ элементов партий ЭКБ в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям. В процессе формирования ЭКБ космического применения разрушающие испытания проводятся на специально сформированных из элементов испытываемой партии тестовых выборках с последующим распространением полученных результатов на всю партию. Данный подход обоснован только в случае, если все элементы испытываемой партии принадлежат одной производственной партии: изготовлены из одного сырья, по одной технологии, на одном оборудовании, что не всегда обеспечивается на практике. Возникает необходимость в проведения процедуры АГ элементов испытываемой партии ЭКБ в обособленные группы, соответствующие разным производственным партиям с тем, чтобы выборочные разрушающие испытания были проведены для каждой полученной группы элементов. Показано, что, предложенный в работе алгоритм АГ позволяет решать эту задачу с заданной эффективностью.

2. Определение элементов-выбросов на основе анализа многомерных данных о характеристиках элементов с целью выявления потенциально ненадежных элементов партий ЭКБ. В процессе испытаний ЭКБ космического применения выявляются элементы, имеющие существенные отличия характеристик от средних их значений по партии. Такие отклонения с большой вероятностью свидетельствуют о наличии у элемента скрытых дефектов, которые могут привести к его отказу в ходе эксплуатации. Такие элементы называются потенциально ненадежными или ПН-элементами и не допускаются к космическому применению.

Предложенные алгоритмы осуществляют выявление ПН-элементов с учетом многомерного анализа характеристик. Как показывают исследования, применение этих алгоритмов в дополнение к существующим алгоритмам приводит к существенному повышению эффективности выявления ПН-элементов.

Во второй части раздела приведены примеры определения параметров алгоритма АГ, обеспечивающего наиболее эффективное разделение партий электронных компонентов на группы, соответствующие разным производственным партиям для 4-х типов ЭКБ: операционных усилителей 140УД25А производства АО «Восход-КЛРЗ», диодных сборок 2ДШ2150АС9 производства АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ», логических микросхем 1526ЛА10 и 564ЛА7В производства АО «ОКБ «Экситон».

Для АГ партий ЭКБ применяется алгоритм, предложенный в Главе 2. При этом, часть параметров алгоритма экспериментальным путем определена как постоянная для всех типов ЭКБ: $N_{min}^{el.g}=10$; $KS_{min}^{lim}=0,3$; $KS_{max}^{lim}=0,8$; $\lambda_{ks}=0,6$; $B_{sep}^{d/r}=0,1$. Другая часть параметров: α_{ks} , β_{ks} , $B_{sep}^{d/l}$, $k_{sep.ks}^{d/r}$ требует индивидуальной подстройки с применением ОВ.

Для всех типов ЭКБ: каждая ОВ и OB_p содержит по восемь ОМ и OM_p , соответственно, а значит, число парных объединений ОМ и OM_p – 28, ТВ содержит четыре ТМ, и, следовательно, число парных объединений ТМ и TM_p – шесть. Для оценки эффективности группировки парных объединений множеств,

входящих в состав OB и OB_p рассчитывается индекс Рэнда - I_R^{OB} . Для оценки эффективности группировки парных объединений множеств, входящих в состав TB и TB_p рассчитывается индекс Рэнда - I_R^{TB} . Суммарная оценки эффективности АГ алгоритма определяется индексом I_R , определяемым соотношением: $I_R = \min(I_R^{OB}, I_R^{TB})$.

Для определения наиболее достоверного способа нормирования характеристик элементов, определяемых в виде тестовых параметров (ТП), измеряемых в процессе испытаний, расчеты проводятся для трех способов задания ДН: ДН=ДЗ – в качестве ДН используются диапазоны значимости ДЗ, ДН=3·СКО_{ов}* (ДН=3·СКО_п*) - комбинированный метод нормирования по СКО ТП по ОБ (партии ЭКБ) и ограничением минимального значения ДН величиной ДЗ.

Сводные результаты обучения алгоритмов АГ по ОБ для трех типов нормирования характеристик (ТП) представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Сводные результаты обучения алгоритма Alg_{AG}^{ed} по ОБ

Тип ЭКБ	Кол. ТП	Индекс Рэнда - I_R^{OB}			α_{ks}	β_{ks}	$B_{sep}^{d/l}$	$k_{sep.kS}^{d/r}$
		ДН=ДЗ	ДН=3·СКО _{ов} *	ДН=3·СКО _п *				
140УД25А	9	0,533	0,735	0,819	0,0015	0,55	0,3	0,3
2ДШ2150АС9	14	0,755	0,849	0,851	0,0015	0,75	0,7	0,35
1526ЛА10	60	0,882	0,873	0,921	0,0015	0,75	0,7	0,35
564ЛА7В	134	0,853	0,945	0,946	0,0015	0,75	0,7	0,35
Ср. знач.	54	0,756	0,851	0,884	0,0015	0,7	0,6	0,34

В Таблице 2 приведены сводные результаты обучения и тестирования алгоритма Alg_{AG}^{ed} по ОБ и ТВ при ДН=3·СКО_п*.

Таблица 2. Сводные результаты обучения и тестирования алгоритма Alg_{AG}^{ed} по ОБ и ТВ при ДН=3·СКО_п*

Тип ЭКБ	Кол. ТП	I_R^{OB}	I_R^{TB}	$I_R = \min(I_R^{OB}, I_R^{TB})$
140УД25А	9	0,819	0,931	0,819
2ДШ2150АС9	14	0,851	0,891	0,851
1526ЛА10	60	0,921	1,000	0,921
564ЛА7В	134	0,946	1,000	0,946
Ср. знач.	54	0,884	0,956	0,884

На основании данных Таблиц 1,2 можно сделать следующие выводы:

1. Наибольшая эффективность АГ обеспечивается при нормировании характеристик (ТП) ЭКБ комбинированным способом - при ДН=3·СКО_п*.

2. Алгоритмы АГ при ДН=3·СКО_п* обеспечивают АГ электронных компонентов в группы, соответствующие разным производственным партиям, с эффективностью от 0,819 (для операционных усилителей 140УД25А) до 0,946 (для микросхем 564ЛА7В). При этом, средняя эффективность АГ по исследуемым типам ЭКБ составляет 0,884.

Так как наибольшую эффективность АГ обеспечивается при нормировании значений характеристик (ТП) комбинированным способом - при ДН=3·СКО_п*, то в дальнейшем все результаты будем приводить для этого способа нормирования.

Проведем сравнение результатов, полученных с применением разработанного в диссертации алгоритма АГ - Alg_{AG}^{ed} , с результатами, полученными с применением предшествующих методов. Для этого в диссертации проведены расчеты АГ ОБ и ТВ исследуемых партий ЭКБ алгоритмом Alg_{AG}^{KS} , где вектор V_{ed} показателей

эффективности разделения на группы состоит из одного показателя KS - критерия «Силуэт», а область S_{ed} эффективного разделения на группы определяется соотношением: $KS \geq KS_{min}$. Здесь: KS_{min} – пороговое значение параметра KS , определенное из условия определения ОМ и ТМ, входящих в состав ОВ и ТВ, соответственно, как однородных множеств. В Таблице 3 представлено сравнение результатов АГ, полученных алгоритмами Alg_{AG}^{KS} и Alg_{AG}^{ed} .

Таблица 3. Сравнение результатов АГ, полученных алгоритмами Alg_{AG}^{KS} и Alg_{AG}^{ed}

Тип ЭКБ	$I_R(Alg_{AG}^{KS})$	$I_R(Alg_{AG}^{ed})$	$\Delta = I_R(Alg_{AG}^{ed}) - I_R(Alg_{AG}^{KS})$
140УД25А	0,662	0,819	0,157
2ДШ2150АС9	0,341	0,851	0,510
1526ЛА10	0,585	0,921	0,336
564ЛА7В	0,607	0,946	0,339
Ср. значение	0,549	0,884	0,336

На основании данных Таблицы 3 можно сделать следующий вывод:

3. Применение предложенных в диссертации алгоритмов АГ приводит к увеличению среднего значения эффективности группировки по индексу Рэнда с 0,549 до 0,898.

На практике далеко не всегда есть возможность осуществлять обучение алгоритмов АГ по ОВ, в первую очередь, по причине их отсутствия. В этом случае АГ можно осуществлять с применением универсальных значений расчетных коэффициентов α_{ks} , β_{ks} , $B_{sep}^{d/l}$, $k_{sep,ks}^{d/r}$, в качестве которых можно использовать их средние значения, приведенные в Таблице 1.

В Таблице 4 приведены сравнительные результаты АГ при расчетных коэффициентах и универсальных коэффициентах алгоритмов.

Таблица 4. Сравнение результатов АГ партий ЭКБ при применении расчетных и универсальных коэффициентов алгоритмов АГ

Тип ЭКБ	Кол. ТП	Расчетные коэффициенты			Универсальные коэффициенты		
		I_R^{OB}	I_R^{TB}	I_R	I_R^{OB}	I_R^{TB}	I_R
140УД25А	9	0,819	0,931	0,819	0,588	0,745	0,588
2ДШ2150АС9	14	0,851	0,891	0,851	0,848	0,891	0,848
1526ЛА10	60	0,921	1,000	0,921	0,869	1,000	0,869
564ЛА7В	134	0,946	1,000	0,946	0,931	1,000	0,931

На основе данных Таблицы 4 можно сделать вывод:

4. При наличии большого числа характеристик – ТП (не менее 14), АГ в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям без существенного снижения эффективности можно осуществить с применением универсальных коэффициентов. Впрочем, требуется дальнейшее более детальное изучение этого вопроса.

В третьей части раздела приведены примеры определения наиболее эффективного алгоритма определения ЭВ (и его параметров) с применением ОВ для 4-х типов ЭКБ, используемых для иллюстрации определения алгоритмов АГ. В качестве ОМ и ТМ применяются те же партии ЭКБ с одним изменением: из них удалены элементы, экспертно определенные как ЭВ. В соответствии с приведенной методикой, на базе ОВ и ТВ формируются: дополненная обучающая выборка ДОВ и дополненная тестовая выборка ДТВ, соответственно. Согласно статистике, среднее количество определенных ПН-элементов при проведении испытаний партий ЭКБ не превышает пяти, поэтому выбираем число дополняющих элементов равное пяти. С

учетом того, что, число ОВ – восемь, а число ТВ – четыре, получим, что число ДОМ, входящих в состав ДОВ – 56, а число ДТМ, входящих в состав ДТВ – 12. Для определения ЭВ применяются алгоритмы Alg_{EV} , приведенные в Разделе 3. В Таблицах 5,6 приведены результаты обучения и тестирования алгоритмов определения ЭВ для 4-х типов ЭКБ.

Таблица 5. Результаты обучения алгоритмов определения ЭВ по ОВ

Тип ЭКБ	Алг.1($k_R=3\sigma_R$)		Алг.1($k_R=2\sigma_R$)		Алг.2		Алг.3	
	Pc_{ER}^{OB}	Pc_{EV}^{OB}	Pc_{ER}^{OB}	Pc_{EV}^{OB}	Pc_{ER}^{OB}	Pc_{EV}^{OB}	Pc_{ER}^{OB}	Pc_{EV}^{OB}
140УД25А	0,0	16,1	0,6	55,4	0,1	37,5	0,0	69,6
2ДШ2150АС9	0,1	68,9	1,1	82,9	0,1	73,9	0,0	75,0
1526ЛА10	0,3	65,7	1,2	87,1	0,6	67,9	0,1	85,7
564ЛА7В	0,0	89,3	0,2	96,8	0,0	91,1	0,0	92,9
Ср. значение	0,1	60,0	0,8	80,6	0,2	67,6	0,03	80,8

Таблица 6. Результаты тестирования алгоритмов определения ЭВ по ТВ

Тип ЭКБ	Алг.1($k_R=3\sigma_R$)		Алг.1($k_R=2\sigma_R$)		Алг.2		Алг.3	
	Pc_{ER}^{TB}	Pc_{EV}^{TB}	Pc_{ER}^{TB}	Pc_{EV}^{TB}	Pc_{ER}^{TB}	Pc_{EV}^{TB}	Pc_{ER}^{ev}	Pc_{EV}^{ev}
140УД25А	0,0	37,7	2,4	75,0	0,1	66,7	0,0	75,0
2ДШ2150АС9	0,0	50,0	1,4	55,0	0,0	75,0	0,0	100,0
1526ЛА10	0,0	98,0	3,3	100,0	0,0	100,0	0,2	100,0
564ЛА7В	0,0	60,0	1,1	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
Ср. значение	0,0	61,4	2,1	82,5	0,03	85,4	0,04	93,8

В Таблицах 5,6 используются следующие обозначения: Pc_{ER}^{OB} , Pc_{ER}^{TB} – доля (в %) ошибочно определенных ЭВ, а Pc_{EV}^{OB} , Pc_{EV}^{TB} – доля (в %) верно определенных ЭВ по ОВ и ТВ, соответственно. По результатам обучения алгоритмов определения ЭВ партий ОВ ЭКБ 140УД25А, 2ДШ2150АС9, 1526ЛА10 и 564ЛА7В можно сделать следующие выводы:

1. Наилучший по эффективности выявления ЭВ результат дает Алгоритм 3, для которого средняя доля выявления ЭВ составляет 80,8%, при средней доле ошибочно определенных ЭВ - 0,03%.

2. Второй по эффективности выявления ЭВ результат дает Алгоритм 2, для которого средняя доля выявления ЭВ составляет 67,9%, при средней доле ошибочно определенных ЭВ - 0,2%.

3. Алгоритм 1($k_R=2\sigma_R$) несмотря на то, что дает хорошую среднюю долю выявления ЭВ - 80,6%, сильно уступает Алгоритмам 2 и 3 по средней доле ошибочно определенных ЭВ – 0,8%.

4. Алгоритм 3 более чувствителен к настройкам, чем Алгоритм 2, поэтому, если нет возможности проведения процедуры обучения по ОВ, то целесообразно применять Алгоритм 2.

Предложенные в работе алгоритмы Alg_{EV} определения ЭВ предполагается использовать в качестве дополнительных алгоритмов к алгоритму Alg_{EV}^{TP} , применяемому в технологии испытаний ЭКБ космического применения, который осуществляет определения ЭВ, по каждой характеристике (ТП), в отдельности.

В Таблице 7 приведен расчет эффекта от применения алгоритма Alg_{EV} .

В Таблице 7 применяются следующие обозначения: Alg_{EV}^{SUM} – алгоритм определения ЭВ, состоящий из совместного использования алгоритмов Alg_{EV}^{TP} и

алгоритма Alg_{EV} , Δ - дополнительная доля (в %) определения ЭВ, полученный за счет дополнительного применения алгоритма Alg_{EV} .

Таблица 7. Результаты применения алгоритмов определения ЭВ

Тип ЭКБ	Процент верно определенных ЭВ - P_{CEV}			
	Alg_{EV}^{TP}	Alg_{EV}	Alg_{EV}^{SUM}	Δ
140УД25А	62,5	69,6	82,1	19,6
2ДШ2150АС9	79,3	75,0	89,3	10,0
1526ЛА10	88,9	85,7	92,1	3,2
564ЛА7В	97,5	92,9	98,9	1,4
Ср. значение	82,1	80,8	90,6	8,6

На основании данных Таблицы 7 можно сделать следующий вывод:

5. Применение предложенных в диссертации алгоритмов определения ЭВ в дополнение к существующим алгоритмам определения ЭВ для заданных 4-х типов ЭКБ повышает долю выявленных ЭВ в среднем на 8,6%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цели диссертации достигнуты путем решения поставленных задач, а именно:

1. Разработан новый метод АГ элементов множеств однотипных объектов, осуществляющий поиск условно оптимального варианта кластеризации, обеспечивающего заданную эффективность разделения на группы.

В соответствии с этим методом требования по эффективности кластеризации задаются специально введенными характеристиками - вектором показателей эффективности разделения на группы и областью эффективного деления, границы которой определяются с применением размеченных обучающих выборок.

2. С целью определения групп, для каждой из которых необходимо проведение выборочных разрушающих испытаний, на базе метода п.1 разработан новый алгоритм АГ электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям, основанный на анализе внутрикластерных расстояний в многомерном пространстве характеристик элементов.

Внедрение данного алгоритма в технологический процесс испытаний ЭКБ космического применения позволяет осуществлять разделение элементов испытываемых партий электронных компонентов на группы в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям, с целью дальнейшего проведения выборочных разрушающих испытаний для каждой группы в отдельности. Решение этой задачи с применением предложенного алгоритма приводит к повышению обоснованности интерпретации результатов выборочных разрушающих испытаний, т.к., как показывают исследования, условие принадлежности всех элементов испытываемой партии ЭКБ одной производственной партии, в силу определенных субъективных и объективных причин, выполняется далеко не всегда, а других способов независимой верификации этого условия нет.

Для подтверждения работоспособности предложенного алгоритма в диссертации приведены примеры АГ электронных компонентов в группы, соответствующие разным производственным партиям для 4-х типов ЭКБ. Анализ полученных результатов показал, что разработанные алгоритмы обеспечивают АГ электронных компонентов в группы, соответствующие разным производственным партиям с минимальной эффективностью по индексу Рэнда 0,819. При этом, средняя эффективность алгоритма АГ составила 0,884, что значительно

эффективнее алгоритма АГ, использующего одиночный показатель эффективности деления – критерий «Силуэт» - 0,549.

3. Разработаны новые алгоритмы определения элементов-выбросов, как элементов, являющихся носителями накопительного (кумулятивного) эффекта от суммарных отклонений характеристик элементов от их средних по партии значений, которые используются для выявления в составе партии ЭКБ потенциально ненадежных элементов. Определение параметров алгоритмов, обеспечивающих их максимальную эффективность, осуществляется с применением размеченных обучающих выборок.

Для подтверждения работоспособности разработанной методики в диссертации приведены примеры определения элементов-выбросов для 4-х типов ЭКБ. Как показывают проведенные в диссертации исследования, применение разработанных алгоритмов в дополнение к действующему в настоящее время алгоритму выявления элементов-выбросов по каждому тестовому параметру в отдельности, позволяет повысить суммарную эффективность выявления элементов-выбросов в среднем на 8,6%.

Результаты, изложенные в диссертации, имеют непосредственное практическое применение: приведенные алгоритмы проходят экспериментальную отработку в АО «ИТЦ – НПО ПМ» г. Железногорск с дальнейшим внедрением их в технологический процесс испытаний ЭКБ космического применения в ИТЦ, входящих в состав Госкорпорации «Роскосмос».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Голованов С.М. Использование понятий однородности при проведении дополнительных испытаний электронной компонентной базы космического применения / С.М. Голованов, В.И. Орлов, В.В. Федосов // Космические аппараты и технологии. – 2020. – Том 4. №4(34). – С. 209-218.

2. Голованов С.М. Определение однородности партии элементов как способ повышения качества тестирования электронной компонентной базы космического применения / С.М. Голованов, В.И. Орлов, В.В. Федосов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2021. – Выпуск 4 (263). – С. 52-68.

3. Голованов С.М. О качественных характеристиках результата деления электрорадиоизделий на однородные группы / С.М. Голованов // Системы управления и информационные технологии. – 2021. – Т.86(4). – С.31-37.

Публикации в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus:

4. Golovanov S.M. Recursive clustering algorithm based on silhouette criterion maximization for sorting semiconductor devices by homogeneous batches / S M Golovanov, V I Orlov, L A Kazakovtsev and A M Popov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 537, issue 2. – 7 P. DOI: 10.1088/1757-899X/537/2/022035.

5. Golovanov S.M. Sequential agglomerative procedure for sorting a production batch of electronic radio devices into homogeneous groups / S.M. Golovanov, V.I. Orlov, L.A. Kazakovtsev, V.V. Fedosov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, II International Scientific Conference "Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering" - MIST: Aerospace - 2019 18–21 November 2019, Krasnoyarsk, Russia. – 2019. – Vol. 734. – Article ID 012013. – 5 P. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012013.

6. Golovanov S.M. Determination of the Homogeneity of a Set of Elements on the Basis of the Quality Characteristics of the Division of a Set into Groups / S.M. Golovanov, V.L. Kazakovtsev, G.Sh. Shkaberina // The Tenth International Workshop on Mathematical Models and their Applications, Krasnoyarsk, the Russian Federation, November 16-18, 2021. – 2023. – 6 P. [Электронный ресурс] Режим доступа URL <https://doi.org/10.1063/5.0137416>.

Публикации в других изданиях:

7. Голованов С.М. Исследование стойкости интегральных схем к воздействию ионизирующих излучений космического пространства с применением комплексного параметрического анализа / В.И. Орлов, В.В. Федосов, С.А. Белов, С.М. Голованов // Решетневские чтения: Материалы XXII междунар. науч.-практ. конф. в 2-х частях. Красноярск: СибГУ, 2018. – Ч. 1 – С. 317-319.

8. Голованов С.М. Об определении групп однородных элементов методами интеллектуальной обработки данных при высокотехнологическом производстве / С.М. Голованов, Л.А. Казаковцев, Г.Ш. Шкаберина // Индустрия 5.0, цифровая экономика и интеллектуальные экосистемы (ЭКОПРОМ-2021). Сборник трудов IV Всероссийской (Национальной) научно-практической конференции и XIX сетевой конференции с международным участием. Санкт-Петербург: 2021. – С. 83-85.

9. Голованов С.М. Применение итеративного алгоритма максимизации критерия силуэта для формирования однородных групп электронной компонентной базы / В.И. Орлов, В.В. Федосов, С.М. Голованов // Решетневские чтения: Материалы XXIII междунар. науч.-практ. конф. в 2-х частях. Красноярск: СибГУ, 2019. – Ч. 1. – С.366-368.

10. Голованов С.М. Использование алгоритмов формирования однородных групп при испытаниях электронной компонентной базы космического применения / С.М. Голованов, В.И. Орлов, В.В. Федосов // Решетневские чтения: Материалы XXIV междунар. науч.-практ. конф. в 2-х частях. Красноярск: СибГУ, 2020. – Ч. 1 – С. 250-251.

11. Голованов С.М. О некоторых практических аспектах использования понятий однородности при испытаниях электронной компонентной базы космического применения / С.М. Голованов, В.И. Орлов, В.В. Федосов // Решетневские чтения: Материалы XXV междунар. науч.-практ. конф. в 2-х частях. Красноярск: СибГУ, 2021. – Ч. 1. – С.352-354.

12. Голованов С. М. Использование понятия однородности 2-го рода при испытаниях электронной компонентной базы космического применения / С.М. Голованов, В.И. Орлов, В.В. Федосов // Решетневские чтения: Материалы XXVI междунар. науч.-практ. конф. в 2-х частях. Красноярск: СибГУ, 2022. – Ч. 1. – С.370-373.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. Голованов С.М. Система составления оптимальных ансамблей алгоритмов кластеризации для задачи выделения производственных партий электрорадиоизделий / В.И. Орлов, И.П. Рожнов, Л.А. Казаковцев, С.М. Голованов – М.: РОСПАТЕНТ. 2019. Свидетельство № 2019610095 от 09.01.2019.

2. Голованов С.М. Библиотека высокопроизводительных алгоритмов кластерного анализа с поддержкой графических процессоров Nvidia / Л. А. Казаковцев, В. И. Орлов, И. П. Рожнов, В.В. Федосов, И.С. Масич, С.М. Голованов – М.: РОСПАТЕНТ. 2019. Свидетельство № 2019619084 от 10.07.2019.