ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.5.066.5
EDN: QMOTBZ

С.С. Попов
АО «Невское проектно-конструкторское бюро», Санкт-Петербург, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ СУДОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является топология судовой информационной сети, включающей сетевые устройства и линии связи. Цель – разработка автоматизированного алгоритма оптимизации размещения коммутаторов на судне с использованием метода кластеризации *k*-средних для минимизации длины кабельных трасс, сокращения затрат на проектирование, строительство и эксплуатацию, а также повышения надежности сети.
Материалы и методы. В работе использованы данные о координатах помещений судна (X, Y, Z) и количестве абонентов. Применен метод кластеризации *k*-средних, реализованный на языке VBA для Excel. Алгоритм учитывает пространственное расположение помещений, минимизируя расстояния между абонентами и коммутаторами. Тестирование проводилось на трех схемах телефонной связи со сравнением автоматического и ручного методов по метрикам: общая длина кабельных трасс, максимальная длина, среднее значение длины и среднеквадратическое отклонение.
Основные результаты. Алгоритм *k*-средних показал сокращение общей длины кабельных трасс на 7–21 %, максимальной длины – на 8–19 %, среднего значения длины – на 8–34 % и среднеквадратического отклонения – на 1–21 % по сравнению с ручным методом. Автоматизация обеспечила равномерное распределение нагрузки и снижение вероятности перегрузки сети.
Заключение. Разработанный алгоритм автоматизирует проектирование судовых сетей, снижая субъективность и ошибки. Теоретическая ценность заключается в применении кластеризации для оптимизации сложных систем. Практическое значение – снижение затрат на кабельную инфраструктуру, упрощение обслуживания и повышение надежности сети. Алгоритм универсален и применим для размещения другого судового оборудования.
Ключевые слова: судовая информационная сеть, топология сети, оптимизация, кластеризация *k*-средних, коммутаторы, автоматизация проектирования, кабельная инфраструктура, надежность сети, пространственное размещение, судостроение.
Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP DESIGN AND STRUCTURE

UDC 629.5.066.5
EDN: QMOTBZ

S.S. Popov
JSC CDB Nevskoe, St. Petersburg, Russia

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF SHIP INFORMATION NETWORK BY MEANS OF DIGITAL TECHNOLOGIES

Object and purpose of research. This paper discusses topology of ship information network, including its devices and communication lines. The purpose of the study was to develop an automated algorithm that would optimize the arrangement of switches aboard the ship through clusterization of *k*-averages to minimize cabling length and design, construction and operation costs, as well as increase network stability.

Для цитирования: Попов С.С. Оптимизация топологии судовой информационной сети с использованием цифровых технологий. Труды Крыловского государственного научного центра. 2025; 4(414): 95–102.
For citations: Popov S.S. Topology optimization of ship information network by means of digital technologies. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2025; 4(414): 95–102 (in Russian).

Materials and methods. This research relies on the data about the coordinates of ship rooms (*X*, *Y*, *Z*) and the number of subscribers. Clusterization algorithm for *k*-averages is written for MS Excel in VBA language. It takes into account the arrangement of ship rooms in space, so as to minimize the distances between subscribers and switches. The testing was performed on three variants of telephone network, with comparison of automatic and manual methods in terms of overall cabling length, maximum length, average length and RMS deviation.

Main results. The algorithm of *k*-averages has shown the reduction of overall cabling length by 7–21%, reduction of maximum length by 8–19%, reduction of average length by 8–34% and reduction of RMS deviation by 1–21% as compared to the manual method. Therefore, the automation made it possible to achieve uniform loading of the network, thus reducing the probability of its overload.

Conclusion. The algorithm suggested by the authors enables automated design of ship networks, making the output less subjective and reducing the number of errors. From the standpoint of theory, the value of this research is that it optimizes complex systems through clusterization. In more practical terms, the algorithm ensures reduction of cabling infrastruction costs and scope of maintenance, as well as increase in network stability. The algorithm is flexible and could be applied to arrange other types of ship equipment as well.

Keywords: ship information network, topology, optimization, clusterization of *k*-averages, switches, design automation, cabling infrastructure, network stability, spatial arrangement, shipbuilding.

The author declares no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Современный корабль невозможно представить без сетей передачи данных, которые состоят из сетевых устройств и линий связи между ними. Схемы расположения и соединения сетевых устройств определяют топологию сети. Сетевая топология – это схема расположения и соединения сетевых устройств. Она определяет, как устройства взаимодействуют между собой и как данные передаются от одного узла к другому. Оптимизация топологии сети достигается путем рационального взаимного размещения коммутаторов с абонентами.

В данной работе предлагается автоматизированный алгоритм оптимизации размещения коммутаторов на судне на основе метода кластеризации. Применение указанного метода направлено на снижение затрат на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации судна путем уменьшения ошибок при проектировании, сокращения стоимости кабельной инфраструктуры, снижения трудоемкости электромонтажных работ и повышения надежности сетей передачи данных.

Актуальность и постановка задачи

Relevance and formulation of task

Рост количества судовых информационных сетей ведет к усложнению проектирования. Традиционные подходы к проектированию становятся неэффективными при увеличении масштабов и сложности судовых сетей, поэтому требуется внедрение автоматизированных решений. Без цифровой трансформации невозможно повышение конкурентоспособности отечественного судостроения.

Создание современных сетей передачи данных требует новых подходов к проектированию, основанных на следующих ключевых требованиях:

- высокая надежность и отказоустойчивость – обеспечение бесперебойной работы критически важных систем судна;
- автоматизация проектирования – снижение влияния субъективных решений при выборе точек размещения коммутаторов;
- снижение затрат на кабельную инфраструктуру и снижение трудоемкости на электромонтажные работы;
- оптимизация обслуживания – снижение затрат на диагностику и обслуживание сетей.

Проектирование и прокладка судовой сети требуют значительных человеческих и материальных ресурсов. Длина кабельных трасс напрямую влияет на стоимость проекта: чем длиннее кабели, тем выше расходы на их покупку, монтаж и обслуживание. Кроме того, увеличение длины кабелей повышает риск технических проблем, таких как сигнальный шум, задержки в передаче данных и повышенное энергопотребление.

Целью работы является создание алгоритма оптимизации размещения коммутаторов. Коммутатор – это узел распределенной судовой сети, обеспечивающий связь с подключенными абонентами. Он выполняет следующие функции:

- обработка и передача данных – объединяет информацию от подключенных систем и передает ее другим узлам сети;
- маршрутизация сетевого трафика – распределяет потоки данных между устройствами;

- локальное хранение информации – может сохранять критически важные данные и работать в автономном режиме.

Алгоритм основан на методе кластеризации – *k*-средних, который решает следующие задачи:

1. Минимизация затрат – автоматическое определение оптимальных точек размещения коммутаторов сокращает длину кабельных трасс.
2. Сокращение времени проектирования – исключение длительных ручных расчетов позволяет сократить время разработки сети.
3. Объективность в принятии решений – математический подход обеспечивает равномерное распределение абонентов между коммутаторами, минимизирует расстояние и снижает риски ошибок.

Таким образом, разработка данного алгоритма направлена на преодоление существующих проблем, повышая эффективность судовых информационных сетей.

Выбор оптимальных точек для размещения коммутаторов всегда был сложной задачей. Традиционно использовались следующие подходы (табл. 1).

Ручной выбор представляет собой традиционный метод, при котором специалисты принимают решения на основе своего опыта и экспертных оценок. Этот подход не требует использования сложных инструментов или программного обеспечения, но имеет существенные недостатки: высокую вероятность субъективности, длительное время проектирования и риск неоптимальных решений, что может привести к увеличению затрат на кабельную инфраструктуру и снижению надежности системы.

«Жадные» алгоритмы – это методы, которые на каждом шаге выбирают локально оптимальное решение с надеждой достичь глобального оптимума. Они работают быстро и могут быть полезны для задач с простыми ограничениями, однако часто приводят к неравномерному распределению нагрузки между коммутаторами и длинным кабельным трассам, т.к. не учитывают общую картину системы. Например, «жадный» алгоритм может назначить абонентов к ближайшему коммутатору, даже если он перегружен.

Комбинаторные методы основаны на принципе полного перебора всех возможных конфигураций размещения коммутаторов и выбора оптимальной среди них. Этот подход гарантирует нахождение глобального оптимума, т.к. учитывает все варианты размещения коммутаторов относительно помещений с абонентами. Однако его главный недостаток – высокая вычислительная сложность: время выполнения возрастает факториально с увеличением количества помещений и коммутаторов.

Кластеризационные методы группируют данные (в данном случае помещения с абонентами) в кластеры таким образом, чтобы объекты внутри одного кластера были максимально похожи, а между кластерами – различны.

Описание работы алгоритма

Description of algorithm operation

В данной работе выбран метод кластеризации – *k*-средних, который обеспечивает компромисс между точностью и скоростью работы алгоритма.

Работа алгоритма представлена на структурной схеме рис. 1.

В качестве исходных данных для алгоритма используются:

- координаты помещений на судне (X, Y, Z) – определяют физическое пространство для прокладки кабелей;
- число абонентов в каждом помещении;
- коммутаторы либо задаются пользователем, либо подбираются автоматически.

Алгоритм реализован на языке программирования VBA для Excel, что делает его доступным для широкого круга специалистов без специальных навыков программирования. Excel предоставляет

Таблица 1. Сравнение подходов к размещению коммутаторов

Table 1. Comparison of approaches to the arrangement of switches

Метод	Преимущества	Недостатки
Ручной выбор	Простота реализации	Субъективность, неоптимальность
«Жадные» алгоритмы	Быстрота выполнения	Локальные оптимумы, неравномерное распределение нагрузки
Комбинаторный перебор	Высокая точность	Высокая вычислительная сложность, длительное выполнение
Кластеризационные методы	Учет пространственной структуры данных	Требуют адаптации под специфические условия судна

Рис. 1. Структурная схема алгоритма *k*-средних

Fig. 1. Functional chart of *k*-average algorithm

удобный интерфейс для работы с данными и позволяет легко интегрировать алгоритм в существующие процессы проектирования.

Работу алгоритма можно представить в виде блок-схемы рис. 2.

Описание математических формул

Description of mathematical expressions

Расчет расстояний между помещениями:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}, \quad (1)$$

где x_1, y_1, z_1 – координаты первого помещения; x_2, y_2, z_2 – координаты второго помещения; d – расстояние между помещениями.

С помощью этой формулы определяется минимальное необходимое количество коммутаторов, чтобы все абоненты были подключены.

1. Выбор первого коммутатора:

$$d_i = \max \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \quad (2)$$

где x, y, z – координаты помещений с абонентами; d_i – расстояние от помещения i до всех остальных помещений с абонентами.

Суммируются расстояния между каждым помещением и всеми остальными. Помещение с максимальной суммой расстояний выбирается как первое положение для коммутатора.

Первый коммутатор размещается в самом удаленном помещении, чтобы уменьшить вероятность перегруженности в центральных частях системы.

Рис. 2. Блок-схема алгоритма *k*-средних

Fig. 2. Block diagram of *k*-average algorithm

2. Выбор последующих помещений:

$$P(i) = \frac{D(i)^2}{\sum D(j)^2}, \quad (3)$$

где $D(i)^2$ – расстояние помещения i до ближайшего уже выбранного коммутатора; $P(i)$ – вероятность выбора помещения i в качестве следующего коммутатора.

Новые коммутаторные помещения выбираются с учетом уже выбранных, чтобы распределить коммутаторы равномерно. Чем дальше помещение от установленных коммутаторов, тем выше вероятность, что новый коммутатор поставят туда.

3. Оптимизация расположения коммутаторов:

$$X_c = \left(\frac{\sum x_i}{N}\right), \; Y_c = \left(\frac{\sum y_i}{N}\right), \; Z_c = \left(\frac{\sum z_i}{N}\right), \quad (4)$$

где (x_i, y_i, z_i) – координаты помещений, подключенных к коммутатору; N – количество помещений; (X_c, Y_c, Z_c) – новый центр коммутатора.

Коммутатор перемещается в центр своей группы, чтобы минимизировать среднее расстояние от абонентов до коммутатора.

4. Назначение абонентов к ближайшему коммутатору:

$$\min \sqrt{(x_i - X_j)^2 + (y_i - Y_j)^2 + (z_i - Z_j)^2}, \quad (5)$$

где (x_i, y_i, z_i) – координаты помещений с абонентами; (X_j, Y_j, Z_j) – координаты коммутатора.

Каждое помещение подключается к ближайшему коммутатору, чтобы уменьшить суммарное расстояние.

Тестирование метода *k*-средних

Testing the method of *k*-averages

Для оценки эффективности алгоритма размещения коммутаторов с использованием метода *k*-средних было проведено сравнение с ручным методом.

Возьмем схемы:

- 11711.362641.3001Э6 – связь телефонная постов управления;
- 11711.362641.3006Э6 – связь телефонная постов радиотехнической части;
- 11711.362641.3007Э6 – связь телефонная постов ракетно-артиллерийской части.

Оценка проводилась по четырем ключевым метрикам, которые позволяют комплексно анализировать эффективность распределения:

1. Общая длина расстояний – сумма всех расстояний между абонентами и назначенными им коммутаторами, отражающая общие затраты на кабельную инфраструктуру.
2. Самая большая длина из списка – максимальное расстояние между абонентом и его назначенным коммутатором. Слишком большая длина кабеля может привести к снижению надежности и повышенным затратам на усиление сигнала.
3. Среднее значение длины из списка – среднее арифметическое всех расстояний между абонентами и их коммутаторами. Является индикатором общей эффективности распределения.
4. Среднеквадратическое отклонение (СКО) – статистическая мера, показывающая, насколько индивидуальные расстояния между абонентами и коммутаторами отклоняются от среднего значения. Отображает неравномерность распределения в сети.

Работа программы со схемой связи телефонной постов управления:

- введем шесть помещений для размещения абонентов (рис. 3);
- затем введем количество подключений к каждому коммутатору (рис. 4);

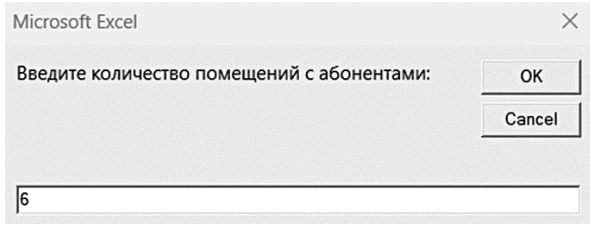

Рис. 3. Ввод количества помещений
Fig. 3. Input of the number of rooms

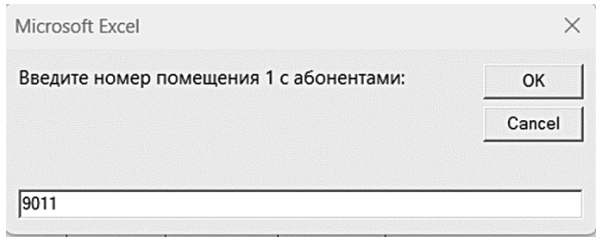

Рис. 4. Ввод помещения с абонентами
Fig. 4. Input of the room with subscribers

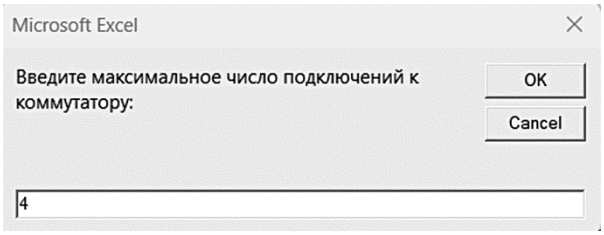

Рис. 5. Ввод максимального числа подключений
Fig. 5. Input of the maximum number for connection

- введем количество как в ручном выборе: четыре (рис. 5);
- программа выдаст результат расчета оптимального помещения для трех коммутаторов (рис. 6);
- повторим шаги, показанные на рис. 3–6, для схем:
  - 11711.362641.3006Э6 – связь телефонная постов радиотехнической части;
  - 11711.362641.3007Э6 – связь телефонная постов ракетно-артиллерийской части.

Результаты работы алгоритма с учетом изменений метрик в процентах представлены в табл. 2–4 и на рис. 7–9.

Таким образом, автоматический метод более эффективен в минимизации общей длины, особенно для сетей с большим количеством абонентов, таких как связь телефонная постов управления, где используется 33 абонента. Алгоритм обеспечивает равномерное распределение нагрузки между коммутаторами, минимизируя расстояние между абонентами и коммутаторами. Это достигается за счет пространственной оптимизации с помощью метода *k*-средних, что снижает вероятность перегрузки отдельных участков сети.

Заключение
Conclusion

Разработанный алгоритм автоматизирует процесс выбора оптимального размещения коммутаторов на судне, предоставляя математически обоснованное решение для размещения коммутаторов, а также

Название помещения абонента	X абонента	Y абонента	Z абонента	Номер помещения коммутатора	X коммутатора	Y коммутатора	Z коммутатора
Помещение чистки арсенала команды	114	5,375	5	Тамбур	105,5	5,725	7,65
Хранилище АО	113,2	-6,9	5	Тамбур	105,5	5,725	7,65
Каюта офицера	106,175	5,175	10,4	Тамбур	105,5	5,725	7,65
ГКП	103,725	5,8	10,4	Коридор	103	5,725	7,65
ГКП	103,725	5,8	10,4	Коридор	103	5,725	7,65
ЦП ЗОС	80,225	7,125	6,45	Коридор	103	5,725	7,65
Помещение чистки арсенала	47,75	-3,2205	2,4	Помещение чистки арсенала	47,75	-3,2205	2,4

Рис. 6. Результат оптимизации
Fig. 6. Optimization result

Таблица 2. 11711.362641.3001Э6 – связь телефонная постов управления
Table 2. 11711.362641.3001E6 – telephone communication between control stations

Метод	Общая длина расстояний, м	Самая большая длина из списка, м	Среднее значение длины из списка	СКО
Ручной	160,9	31,2	22,3	68,8
Автоматический	133,8	25,44	19,1	68,1
Сравнение эффективности, %	–17 %	–19 %	–15 %	–1 %

Таблица 3. 11711.362641.3006Э6 – связь телефонная постов радиотехнической части
Table 3. 11711.362641.3006E6 – telephone communication between radio rooms

Метод	Общая длина расстояний, м	Самая большая длина из списка, м	Среднее значение длины из списка	СКО
Ручной	209,2	95,0	16,1	554,3
Автоматический	194,1	84,0	14,9	440
Сравнение эффективности, %	–7 %	–12 %	–8 %	–21 %

Таблица 4. 11711.362641.3007Э6 – связь телефонная постов ракетно-артиллерийской части
Table 4. 11711.362641.3007Э6 – telephone communication between missile and artillery battle stations

Метод	Общая длина расстояний, м	Самая большая длина из списка, м	Среднее значение длины из списка	СКО
Ручной	745,5	79,1	22,6	243,4
Автоматический	592,3	72,7	14,9	192,1
Сравнение эффективности, %	–21 %	–8 %	–34 %	–20 %

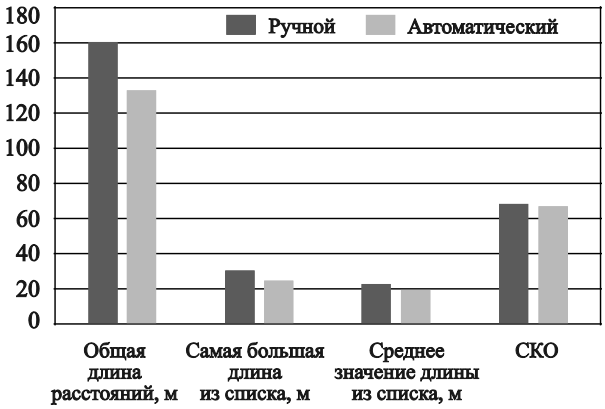

Рис. 7. Визуализация сравнения метрик для схемы 11711.362641.3001Э6

Fig. 7. Comparison of parameters for Variant 11711.362641.3001E6

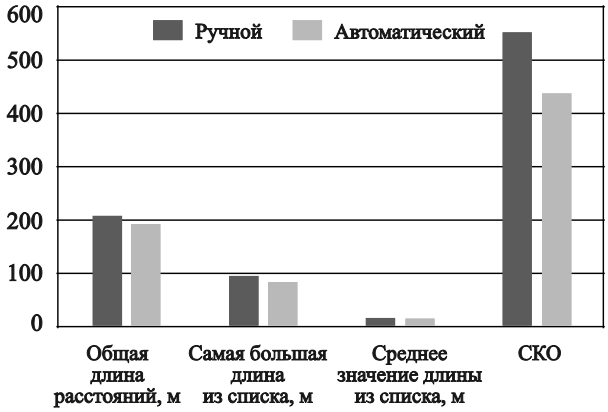

Рис. 8. Визуализация сравнения метрик для схемы 11711.362641.3006Э6

Fig. 8. Comparison of parameters for Variant 11711.362641.3006E6

существенно снижая влияние человеческого фактора и субъективность в проектировании судовых информационных сетей. Это позволяет исключить ошибки, связанные с ручным выбором местоположения коммутаторов, и обеспечивает более стабильные и воспроизводимые результаты.

На основе тестирования метода *k*-средних, проведенного на трех сетях, установлено, что автоматический метод демонстрирует значительные преимущества по сравнению с традиционным ручным методом.

Оптимизация сетей способствует улучшению качества связи и управления на борту судна, что напрямую влияет на безопасность экипажа и пассажиров. Более простая и понятная структура сети упрощает диагностику и обслуживание, что снижает нагрузку на инженерный персонал и повышает оперативность устранения неисправностей. Снижение длины кабельных трасс уменьшает количество используемых материалов, способствуя снижению стоимости судна на этапах проектирования, строительства и эксплуатации.

Предложенный подход на основе метода *k*-средних можно использовать не только для оптимизации размещения коммутаторов и подключения

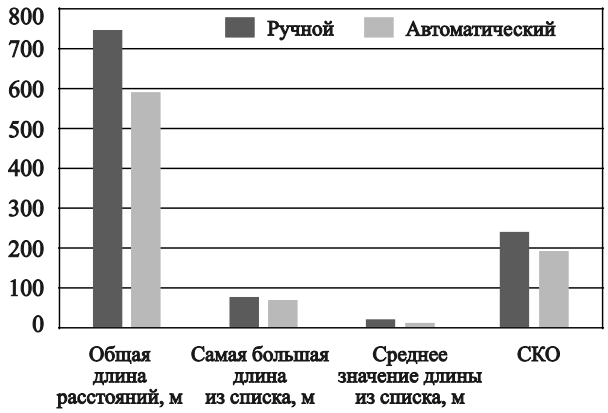

Рис. 9. Визуализация сравнения метрик для схемы 11711.362641.3007Э6

Fig. 9. Comparison of parameters for Variant 11711.362641.3007E6

абонентов. Алгоритм можно применять для размещения другого судового оборудования – распределения блоков управления, датчиков, систем кондиционирования и прочих элементов, требующих эффективного размещения на корабле.

Метод, основанный на анализе пространственного расположения объектов и минимизации расстояний, обеспечивает универсальность и может быть адаптирован под различные инженерные задачи судостроения.

Список использованной литературы

1. *Таненбаум Э., Уэзеролл Д.* Компьютерные сети. 5-е изд. Санкт-Петербург [и др.] : Питер, 2021. 955 с. (Классика Computer Science).
2. *Xu R., Wunsch D.* Survey of clustering algorithms // IEEE Transactions on Neural Networks. 2005. Vol. 16, No. 3. P. 645–678. DOI: 10.1109/TNN.2005.845141.
3. *Гитис Л.Х.* Кластерный анализ в задачах классификации, оптимизации и прогнозирования. Москва : Московский гос. горный институт, 2001. 103 с. (Серия «Практическая статистика для горных инженеров»; вып. 2).
4. *Горин Е.А.* Цифровые технологии в отечественном судостроении // Бюллетень науки и практики. 2017. № 11(24). С. 236–242.
5. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети: Принципы, технологии, протоколы : учебное пособие. Санкт-Петербург [и др.] : Питер, 2001. 672 с.
6. Информационные технологии в образовании / *Е.В. Баранова, М.И. Бочаров, С.С. Куликова* [и др.]. 2-е изд., стер. Санкт-Петербург : Лань, 2022. 296 с.
7. *Масюк Н.Н., Блюдик А.Р.* Современные тенденции цифровой трансформации в морской отрасли // Естественно-гуманитарные исследования. 2022. № 6(44). С. 203–206.
8. ГОСТ Р 53246-2008. Информационные технологии. Системы кабельные структурированные. Проектирование основных узлов системы. Общие требования. Москва : Стандартинформ, 2009. 121 с.

References

1. *Tanenbaum A., Wetherall D.* Computer Networks. 5th edition (*Russian translation*). St. Petersburg [et al.]. Piter, 2021. 955 p. (*Classics of Computer Science* series).
2. *Xu R., Wunsch D.* Survey of clustering algorithms // IEEE Transactions on Neural Networks. 2005. Vol. 16, No. 3. P. 645–678. DOI: 10.1109/TNN.2005.845141.
3. *Gitis L.H.* Cluster analysis in classification, optimization and prediction tasks. Moscow : Moscow State Mining Institute, 2001. 103 p. (*Practical Statistics for Mining Engineers* series) (*in Russian*).
4. *Gorin Ye.A.* Digital technologies in Russian shipbuilding // *Bulletin of Science and Practice*. 2017. No. 11(24). P. 236–242 (*in Russian*).
5. *Olifer V.G., Olifer N.A.* Computer networks: principles, technologies, protocols. Student's Guide. St. Petersburg [et al.] : Piter, 2001. 672 p. (*in Russian*).
6. Information technologies in education / *Ye.V. Baranova, M.I. Bocharov, S.S. Kulikova* [et al.]. 2nd edition, stereotype. St. Petersburg : Lan', 2022. 296 p. (*in Russian*).
7. *Masyuk N.N., Blyudik A.R.* Modern trends of digital transformation in marine industry // *Natural & Humanitarian Studies*. 2022. No. 6(44). P. 203–206 (*in Russian*).
8. GOST R 53246-2008. Information technologies. Structured cabling systems. Main system elements design. General requirements. Moscow : Standartinform, 2009. 121 c. (*in Russian*).

Сведения об авторе

Попов Сергей Сергеевич, инженер-конструктор 3-й категории АО «Невское проектно-конструкторское бюро». Адрес: 199226, Россия, Санкт-Петербург, Галерный проезд, д. 3. E-mail: stevkafor1@yandex.ru

About the author

Sergey S. Popov, 3rd Category Design Engineer, JSC CDB Nevskoe. Address: 3, Galerny pr., St. Petersburg, Russia, post code 199226. E-mail: stevkafor1@yandex.ru.

Поступила / Received: 16.06.25
Принята в печать / Accepted: 14.11.25
© Попов С.С., 2025