
Алгоритм концептуального проектирование системы мониторинга объекта коллаборативной мультиагентной робототехнической системой

Г.А. Филяев¹, В.Я. Вилисов²

¹Ракетно-космическая корпорация «Энергия», Королев,

²Технологический университет, Королев

Аннотация: Рассматриваются вопросы моделирования взаимодействия человека и роботов в общей операционной среде в целях выбора оптимальных параметров такой системы. Контекстом применения мультиагентных робототехнических систем (МРТС) является мониторинг пожароопасной территории. В состав гомогенной МРТС входят беспилотные летательные аппараты (БПЛА), циклически выполняющие операции облета своего участка территории (с идентификацией возгораний) в автономном режиме, возвращение на базу зарядки, ожидание зарядки, зарядка, возвращение в зону своей ответственности, облет своего участка и т.д. В зоне зарядки работает оператор, к которому БПЛА не должны приближаться менее, чем на определенное расстояние. Система представлена в виде многоканальной системы массового обслуживания (в зоне зарядки). Строится имитационная модель, позволяющая по данным многих прогонов построить полиномиальные регрессионные зависимости показателей качества работы МРТС от ее параметров, по которым решить многокритериальную задачу выбора оптимальных параметров зарядного терминала МРТС.

Ключевые слова: коботы, имитационное моделирование, беспилотные летательные аппараты, система массового обслуживания, уравнения регрессии, оптимизация.

Введение

В условиях лавинообразного развития робототехники в самых разных теоретических и прикладных направлениях [1] в качестве одних из наиболее важных, выделяются такие направления, как: *проблемы этики и безопасности людей в общей среде обитания с роботами*; социальное взаимодействие роботов с людьми и обучение роботов. В рамках этих направлений развития робототехнических систем (РТС) в последнее время большое внимание стало уделяться коллаборативным роботам (коботам) [2, 3]. В отличие от традиционных промышленных [4] или мобильных [5] роботов, коботы должны работать в единой рабочей зоне с человеком-партнером или с другими людьми, не причиняя им вреда. Основным принципом их функционирования является обеспечение безопасности людей. У коботов, в сравнении с другими типами роботов, должны быть более

развитыми: сенсорный аппарат; алгоритмы принятия решений в разнообразных ситуациях взаимодействия с человеком в общей операционной среде [6]; координация совместной работы групп роботов и групп людей [1]. Такие «команды» иногда называют *смешанной рабочей силой*, а с учетом необходимости гибкого поведения роботов в таких конфигурациях, иногда их именуют «мягкими роботами».

Появление класса коботов переводит традиционную задачу управления роботом в категорию задач взаимодействия человека с системой, обладающей функциями искусственного интеллекта.

Важной сферой применения коботов являются экстремальные приложения, в частности ликвидация пожаров и ЧС [2] т. к. в этих случаях часто возникают ситуации, представляющие угрозу жизни и здоровью человека. В этой сфере сейчас, в основном, применяются РТС с дистанционным управлением. Однако, при использовании для этих целей коботов, возникает задача перехода от управления движением платформы к управлению в диалоге с роботом как на стадии его обучения, так и при практическом применении.

В приложениях, связанных с ликвидацией пожаров и ЧС, для коботов существует широкий спектр применений, в частности, это:

- обезвреживание опасных предметов и объектов;
- радиационная и химическая разведка;
- выполнение различных работ в зонах природных и техногенных аварий и катастроф;
- выполнение спасательных операций.

В статье рассматриваются вопросы моделирования работы мультиагентной РТС (МРТС) [7] в общей операционной среде с человеком, а значит в условиях нестационарности [8], для выбора оптимальных параметров такой системы на ранних стадиях ее проектирования.

Постановка задачи

Концептуальное проектирование. РТС, как сложная техническая система, должна выполнять возложенный на нее комплекс функциональных задач. Перед заказчиком РТС и ее разработчиком стоят несколько отличающиеся задачи. Заказчик должен выдвинуть реалистичные, реализуемые на практике, требования, позволяющие ему, после создания РТС, обеспечить эффективное выполнение стоящих перед ним прикладных задач. Этот этап называют внешним, или *концептуальным*, проектированием [9], в ходе которого формируются облик системы и тактико-технические требования (ТТТ) к ней. Разработчик выполняет внутреннее проектирование (структурно-параметрический синтез системы), обеспечивая выполнение ТТТ. Для РТС характерно, в силу еще неустоявшейся технологии их разработки, то, что оба вида проектирования, как правило, выполняются разработчиком.

Важным и часто эффективным инструментом концептуального проектирования новой техники, и РТС в том числе, является имитационное моделирование [6, 9], позволяющее оперативно оценивать варианты по различным показателям и выбирать наилучший.

В данном исследовании для моделирования (в целях концептуального проектирования) коллаборативных МРТС, используемых при ликвидации пожаров и ЧС, выбрана среда разработки Unity и язык программирования С# (Си шарп), позволяющие использовать достаточно развитые библиотеки. Из математических средств используется аппарат теории массового обслуживания, регрессионного анализа и многокритериальной оптимизации.

Из множества показателей эффективности коллаборативной МРТС следует выделить три группы [3], по убыванию приоритетов:

- *безопасность* (для оператора, партнера, постороннего человека);

- *эффективность* решения поставленных перед РТС функциональных задач;
- *быстродействие*, как один из важных показателей при ликвидации пожаров и ЧС.

Мониторинг пожарной обстановки. Мониторинг пожаров на заданной территории (объекте) является одной из важных сфер использования РТС, в частности, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), при выполнении задач МЧС России. Необходимость внедрения БПЛА в практику выполнения операций МЧС России вписано в приоритетных направлениях развития науки, техники и технологий в МЧС РФ, определенных на перспективу до 2030 года. К числу основных приоритетных направлений отнесены, кроме прочих, такие направления как *«... разработка и внедрение новых образцов аварийно-спасательной техники, оборудования, робототехники, беспилотных авиационных систем и технологий»*.

Особенностями применения беспилотных авиационных систем, в том числе и БПЛА, является то, что этот класс РТС находится еще в начальной стадии развития и многие его функции пока далеки от совершенства. Отмечаются [2] такие несовершенства современных БПЛА как:

- малый срок службы. Так для аппаратов Inspider он составляет от 1 до 3 лет, для Phantom - срок службы - около 2-х лет. Поэтому такого типа системы быстро вырабатывают свой ресурс;
 - относительно небольшая дальность полета (обычно это около 2 км.) и малое время пребывания в воздухе (в основном - около 25 минут);
 - существенная зависимость от погодных и климатических условий, что делает практически невозможным использование БПЛА при сильном ветре, снегопаде и дожде.
-

Однако, применение БПЛА в МЧС России продолжается, набирает силу и развивается [2]. Так БПЛА проводят мониторинг пожароопасной обстановки в ряде южных регионов РФ (Курская, Воронежская, Белгородская области). Учитывая то обстоятельство, что для мониторинга используются имеющиеся сегодня в распоряжении МЧС БПЛА с относительно небольшой продолжительностью полета, возникает потребность в их регулярной дозаправки (дозарядки) на наземной станции обслуживания. Это обстоятельство порождает задачу выбора оптимальных параметров МРТС, в числе которых: количество портов зарядки и их характеристик, количество роботов в составе группировки, размеров зоны безопасного подлета к оператору и др.

Решение задачи

В силу того, что каждый БПЛА из состава группировки барражирует в определенных зонах (на определенных маршрутах), на величину остаточного запаса заряда его аккумуляторной батареи действует множество факторов, позволяющих считать его случайным, в частности:

- ветер может требовать дополнительного расхода электроэнергии для удержания на маршруте;
- расстояние до пункта дозаправки (ПДЗ) постоянно меняется (в силу движения по маршруту) и критический момент для возврата на дозаправку может наступить в любой точке маршрута;
- фото, видеоаппаратура и другие бортовые системы могут вносить нестационарность (неравномерность) в процесс потребления электроэнергии.

Случайный характер потребления электроэнергии приводит к тому, что БПЛА возвращаются в ПДЗ, имея некоторый случайный остаток заряда, а значит и время их дозарядки до полной емкости становится случайным.

Схема моделируемой ситуации представлена на рис. 1.

Система в целом представляет собой замкнутую систему массового обслуживания (СМО), в которой заявки — это автономные БПЛА-роботы. Каждая свободная зона (всего m) мониторинга является заявкой, обслуживаемой свободным роботом (обслуживающим прибором для зон).

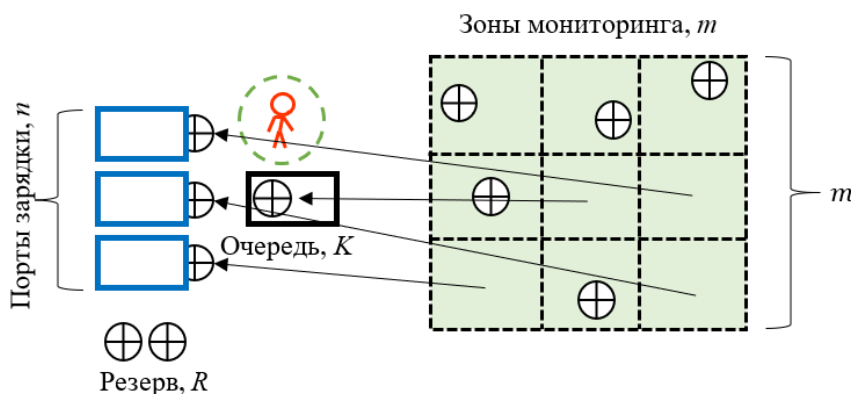


Рис.1. Схема элементов задачи мониторинга пожарной обстановки на территории

Выработавшие свой энергоресурс роботы являются заявками для портала зарядки, где каждый порт (их всего n) — это обслуживающий прибор для робота. Для патрулирования одной зоны требуется один робот. Имеется и очередь с числом мест - K (при занятости всех мест в очереди робот покидает очередь и становится в резерв (R - текущий объем резерва), а его место в мониторинге занимает готовый робот из резерва). Коллаборативная часть представлена зоной безопасности вокруг человека, обслуживающего порты зарядки, устройства старта и приземления, в которую не должны залетать роботы.

Заряженные БПЛА вылетают в свободные зоны мониторинга. Если все зарядные порты заняты, робот помещается в очередь, которую покидает после освобождения любого порта. В зависимости от дисциплины и принципов заполнения зон мониторинга, в работу может включаться и группа резервных БПЛА, которые находятся в постоянной готовности.

Поскольку анализируемая система не является простой стандартной СМО [10], то невозможно построить аналитические зависимости выходных показателей системы от ее параметров. Поэтому задача решается на основе имитационного дискретно-событийного моделирования.

При проектировании подобных СМО обычно принимается во внимание не один, а несколько показателей (в данном случае их девять), что придает задаче свойство многокритериальной оптимизации [10]. На рис. 2 приведена блок-схема алгоритма концептуального проектирования.

Алгоритм построен таким образом, что в модуле статистического имитационного моделирования реализуется логика работы МРТС (блок 3). В рассматриваемом ниже иллюстративном примере реализована не вся система, а лишь узел зарядки роботов.

Блоками 1 и 2 определяется область Ω варьирования параметров $\bar{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_p]^T$ (T - символ транспонирования), влияющих на показатели системы. Среди варьируемых параметров:

- скорость (интенсивность) поступления роботов в портал заправки (x_1 , 1/час);
- среднее время обслуживания зарядным устройством робота (x_2 , час);
- количество каналов обслуживания роботов, т.е. портов зарядки (x_2 , шт.).

В числе показателей $\bar{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_q]^T$ следующие (вместе с их размерностями и операторами оптимизации):

1. Время ухода последнего робота (модельное время), y_1 , час, *min*.
 2. Среднее время ожидания робота в очереди, y_2 , час, *min*.
 3. Максимальное время ожидания робота в очереди, y_3 , час, *min*.
 4. Среднее количество роботов в очереди, y_4 , шт., *min*.
-



5. Максимальное количество роботов в очереди, y_5 , шт., *min*.
6. Время занятости каждого порта обслуживания, y_6 , час, *max*.
7. Количество обслуженных роботов, y_7 , шт., *max*.
8. Количество необслуженных роботов, y_8 , шт., *min*.
9. Процент необслуженных роботов, y_9 , %., *min*.

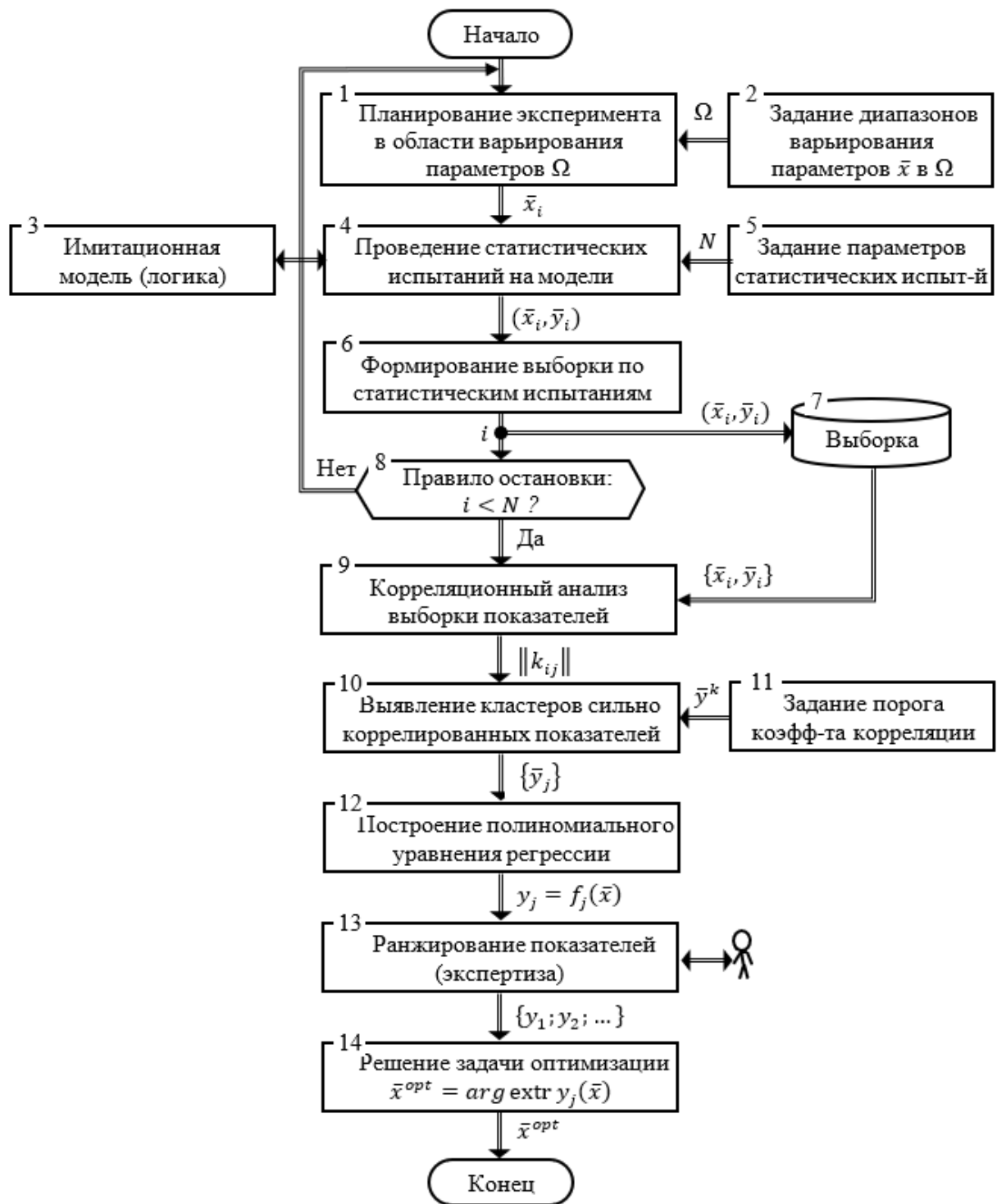


Рис. 2. Алгоритм выбора оптимальных параметров системы мониторинга пожароопасного района на основе использования МРТС

Проводятся (блоки 4, 5, 6) статистические испытания ($i = \overline{1, N}$) при различных сочетаниях входных переменных \bar{x}_i , выбранных с помощью

методов оптимального планирования эксперимента. Результаты составляют выборку $\{\bar{x}_i; \bar{y}_i\}$, необходимую для дальнейшего анализа.

В предположении, что не все из девяти показателей независимы, выполняется корреляционный анализ (блок 9), позволяющий выявить кластеры сильно коррелированных показателей k_{ij} (блоки 10, 11), и оставить по одному из каждого кластера (\bar{y}^k) для дальнейшего анализа. Порог значимой корреляции выбирается в интервале $[0,7;1]$. Для сокращенного числа показателей $\{y_j\}$ методами экспертного оценивания (парными сравнениями) проводится их ранжирование (блок 13).

По выборке (блок 7) проводится полиномиальный множественный регрессионный анализ путем последовательного наращивания степени полинома $y_j = f_j(\bar{x})$ (по переменным; по коэффициентам модели полином остается линейным) до тех пор, пока показатель детерминации существенно возрастает, приближаясь к единице.

На основе метода последовательных уступок (величина уступок принимается в интервале $[0; 10]\%$) или доминирующего критерия [10] решается задача многокритериальной оптимизации (блок 14):

$$\bar{x}^{opt} = \arg \operatorname{extr}_{\bar{x} \in \Omega} y_j(\bar{x}). \quad (1)$$

В модельном примере при пороговом значении корреляции 0,7 выделены два кластера показателей, из которых выбраны в качестве представителей - y_9, y_4 , где первый доминировал. Регрессионный анализ позволил построить следующее уравнение для доминирующего показателя:

$$y_9 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 =$$

$$\begin{aligned} &= 0,0402 + 0, \\ &2145x_1 + 0,1958x_2 - 0,1942x_3 - 0,0199x_1^2 - 0,0130x_2^2 + 0,0015x_3^2 - 0, \\ &0071x_1x_2 + 0,0160x_1x_3 + 0,0097x_2x_3 \end{aligned} \quad (2)$$

Решением уравнения (2) является точка в области варьирования параметров со следующими координатами: $x_1^{opt} = 1,23$ 1/час; $x_2^{opt} = 1,18$ час; $x_3^{opt} = 3$ шт.

Данное решение свидетельствует о том, что энергоемкость бортового аккумулятора робота должна обеспечить поступление их на зарядку, в среднем, не чаще, чем 1,23 робота в час. Тип бортового аккумулятора и соответствующее ему зарядное устройство должны обеспечить зарядку робота, в среднем, не дольше, чем за 1,18 часа. Количество зарядных устройств должно быть не менее трех.

Выводы

Предложенный подход к задачам концептуального проектирования систем мониторинга пожароопасной обстановки на основе использования БПЛА-роботов, построенный на основе методов статистического имитационного моделирования, позволяет строить гибкие и удобные в использовании полиномиальные модели. На основе таких моделей можно рассматривать и выбирать для реализации большой спектр конфигураций систем, работающих, в том числе и в коллаборации с человеком, на разных стадиях их проектирования.

Литература

1. Yang G.Z., Bellingham J., Dupont P.E., et al. The grand challenges of Science Robotics. Science Robotics 31 Jan 2018: Vol. 3, Issue 14, eaar7650 DOI: 10.1126/scirobotics.aar7650

2. Галин Р.Р., Трефилов П.М. Влияние коллаборативных робототехнических решений на повышение эффективности деятельности человека // Экстремальная робототехника. Труды XXX Междунар. науч.-тех. конф. СПб: Гангут. 2019. 510 с. С. 466-468.

3. Ющенко А.С. Состояние и перспективы коллаборативной робототехники // Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции. Труды XXIX Междунар. науч.-тех. конф. СПб: Гангут. 2018. 542 с. С. 107-113.

4. Тренды в области промышленных роботов. URL: robotrends.ru/robopedia/trendy-v-oblasti-promyshlennyh-robotov.

5. Половко С.А., Попов А.В. Перспективы применения гибридных групп мобильных роботов специального назначения // Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции. Труды XXIX Междунар. науч.-тех. конф. СПб: Гангут. 2018. 542 с. С. 25-33.

6. Вилисов В.Я., Мурашкин Б.Ю., Куликов А.И. Имитационная модель взаимодействия двух роботов в общей операционной среде // Экстремальная робототехника. Труды XXX Междунар. науч.-тех. конф. СПб: Гангут. 2019. 510 с. С. 473-476.

7. Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Шаповалов И.О. Алгоритм управления движением группы мобильных роботов в условиях неопределенности // Инженерный вестник Дона, 2018, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5221.

8. Чачхиани Т.И., Серова М.Г. Мобильный робот в нестационарной среде // Инженерный вестник Дона, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4546

9. Тачков А.А. Концептуальное проектирование мобильных робототехнических систем на основе статистического имитационного

моделирования // Экстремальная робототехника. Труды XXVII Междунар. науч.-тех. конф. СПб: АП4Принт. 2016. 480 с. С. 66-71.

10. Taha H.A. Operation research: An Introduction. 10th ed. Pearson Prentice Hall. New Jersey. 2017. 849 p.

References

1. Yang G.Z., Bellingham J., Dupont P.E., et al. Science Robotics 31 Jan 2018: Vol. 3, Issue 14, eaar7650 DOI: 10.1126/scirobotics.aar7650

2. Galin R.R., Trefilov P.M. Ekstremal'naya robototekhnika. Trudy XXX Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. SPb: Gangut. 2019. 510 p. pp. 466-468.

3. YUshchenko A.S. Ekstremal'naya robototekhnika i konversionnye tendencii. Trudy XXIX Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. SPb: Gangut. 2018. 542 p. pp. 107-113.

4. Trendy v oblasti promyshlennyh robotov URL: robotrends.ru/robopedia/trendy-v-oblasti-promyshlennyh-robotov.

5. Polovko S.A., Popov A.V. Ekstremal'naya robototekhnika i konversionnye tendencii. Trudy XXIX Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. SPb: Gangut. 2018. 542 p. pp. 25-33.

6. Vilisov V.YA., Murashkin B.YU., Kulikov A.I. Ekstremal'naya robototekhnika. Trudy XXX Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. SPb: Gangut. 2019. 510 p. pp. 473-476.

7. Gajduk A.R., Kapustyan S.G., Shapovalov I.O. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5221.

8. Chachkhiani T.I., Serova M.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4546.

9. Tachkov A.A. Ekstremal'naya robototekhnika. Trudy XXVII Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. SPb: AP4Print. 2016. 480 p. pp. 66-71.

10. Taha H.A. Operation research: An Introduction. 10th ed. Pearson Prentice Hall. New Jersey. 2017. 849 p.

