

Методика обоснования способа применения робототехнических систем ликвидации экстремальных ситуаций при проведении испытаний и эксплуатации ракетно-космической техники

Methodology of justification for the method of application of robotic systems of response to emergency situations when testing and operating of rocket-and-space equipment

Груздев / Gruzdev N.

Николай Валентинович

(nikgruzdev@rambler.ru)

кандидат военных наук, доцент.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ

(ВКА имени А. Ф. Можайского),

старший научный сотрудник.

г. Санкт-Петербург

Крупский / Krupsky K.

Кирилл Анатольевич

(kirill11223@gmail.com)

кандидат технических наук.

ВКА имени А. Ф. Можайского,

заместитель начальника отдела.

г. Санкт-Петербург

Тарасов / Tarasov A.

Анатолий Геннадьевич

(Atol-77@mail.ru)

кандидат технических наук.

ВКА имени А. Ф. Можайского,

заместитель начальника кафедры.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: : испытания – testing; эксплуатация – operation; ракетно-космическая техника – rocket-and-space equipment; экстремальная ситуация – emergency situation; робототехническая система – robotic system; ключевая зона применения – key application area.

В статье предлагаются способы применения робототехнических систем, предназначенных для проведения работ по предупреждению или ликвидации последствий нештатных и аварийных ситуаций на объектах ракетно-космических комплексов. В работе представлены результаты оценивания оперативности ликвидации экстремальных ситуаций и расходов ресурсов локомоторной и манипуляционной подсистем робототехнических систем при их равномерном и неравномерном распределении по узлам ключевых зон применения.

The article offers methods of application of robotic systems intended for work on prevention or response and recovery of emergency and extremal situations at the rocket-and-space vehicles. The paper presents results of calculation of the efficiency of response to emergency situations and consumption of locomotion and manipulation subsystems of robotic systems resources under their equal and unequal distribution at the units of key areas of application.

При проведении испытаний и эксплуатации ракетно-космической техники существуют высокие риски, обусловленные угрозами возникновения техногенных экстремальных ситуаций и катастроф. Этот фактор вызывает необходимость поиска наиболее эффективных путей улучшения работы по предупреждению, выявлению, локализации экстремальных ситуаций и ликвидации их последствий. Уменьшить степень участия человека при проведении работ в опасных условиях можно, используя дистанционно управляемое оборудование. В связи с этим весьма актуальным является применение робототехнических комплексов, предназначенных для проведения работ по предупреждению или ликвидации последствий нештатных и аварийных ситуаций.

Подготовка и пуск ракет космического назначения (РКН) всегда были и остаются наиболее опасными операциями с точки зрения возможных последствий аварийных ситуаций, при выполнении задач выведения космических аппаратов (КА) и осуществления пилотируемых пусков. Под экстремальной ситуацией (ЭС) при подготовке и пуске РКН понимается обстановка, складывающаяся в позиционном районе ракетно-космического комплекса, характеризующаяся возникновением факторов непосредственной угрозы

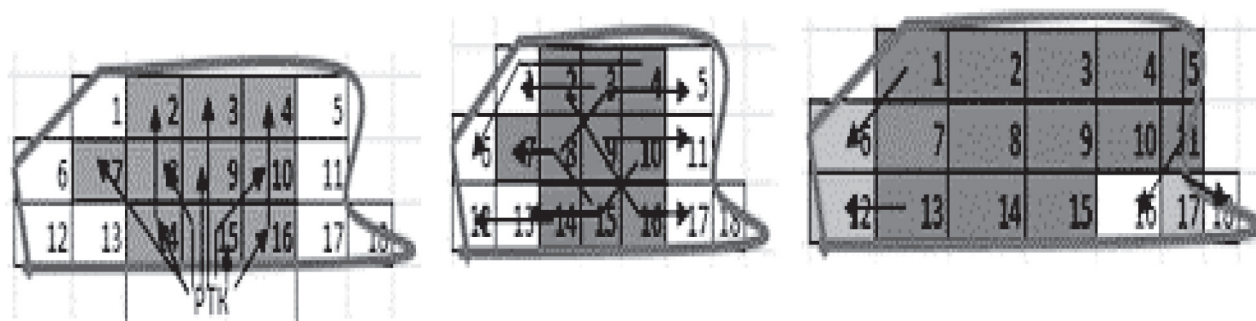


Рис. 1. Назначение РТС по узлам КЗП при неравномерном распределении

для здоровья и жизни людей или угрозы срыва их деятельности по решению задач своевременной подготовки и пуска РКН. Накопленный опыт эксплуатации космических средств позволяет выделить наиболее часто встречающиеся типы ЭС при подготовке и пуске РКН на стартовом комплексе (СК): пожар; взрыв РКН на СК или взрыв в сооружении; затопление сооружений СК; пролив компонентов ракетного топлива; разрыв сосудов, работающих под высоким давлением; аварии в результате отказа технологического оборудования; повреждение РКН, делающее невозможным продолжение работ по ее подготовке к пуску; аварийный пуск РКН. В связи с этим ликвидацию ЭС, возникающих на СК при подготовке и пуске РКН, необходимо проводить при помощи технических средств, обладающих средствами передвижения и манипуляции, способных частично или полностью выполнять функции человека, а именно роботов [1–3].

Под робототехническим комплексом (РТК) ликвидации ЭС в работе понимается управляемый и контролируемый оператором автоматизированный комплекс с динамично формируемыми и изменяющимися в соответствии с решаемыми задачами и условиями обстановки составом и связями между входящими в него РТС, предназначенный для выполнения тяжелых и опасных для человека операций на РКК в ходе подготовки и пуска РКН при возникновении ЭС и ликвидации их последствий.

Таким образом, необходимость применения РТК при подготовке и пуске РКН обусловлена:

- необходимостью минимизации участия человека в ряде опасных операций при подготовке и пуске РКН;
- возрастающей актуальностью решения задач по устранению нештатных ситуаций и ликвидации последствий аварий на стартовом комплексе, возможность решения которых с непосредственным участием человека-оператора сильно затруднена.

Рассмотрим вариант применения робототехнических систем ликвидации экстремальных ситуаций при их равномерном и неравномерном распределении по ключевым зонам применения при проведении испытаний и эксплуатации ракетно-космической техники на космодроме. Космодром представляет собой район

местности, оборудованный в инженерном и топогеодезическом отношении, с размещенными на нем сооружениями, коммуникациями, силами и средствами, осуществляющими и обеспечивающими хранение, содержание в установленных готовностях, подготовку к пуску, пуск и контроль полета ракет космического назначения на участке выведения [4]. Ключевыми зонами применения (КЗП) робототехнических систем (РТС) могут являться объекты ракетно-космического комплекса космодрома: технический комплекс (ТК), стартовый комплекс, заправочная станция (ЗС). Задача планирования применения робототехнических систем ликвидации ЭС решается как задача их развертывания в зоне обеспечения и задача целераспределения по узлам ключевых зон применения [5–15].

При неравномерном распределении по узлам ключевых зон применения робототехнические системы направляются в любой узел КЗП и в необходимом для полной ликвидации опасных факторов количестве, которое определяется из соотношения запаса ресурса РТС и уровня опасных факторов (рис. 1).

При равномерном распределении по узлам КЗП РТС направляются в ближайший узел КЗП в единственном числе. Если ресурса РТС недостаточно для полной ликвидации опасных факторов (ОФ) в КЗП, то в данный узел на следующем этапе назначается свободная РТС или РТС, у которой остался запас ресурса после применения на предыдущем этапе (рис. 2).

При равномерном распределении по узлам КЗП РТС направляются в ближайший узел КЗП в единственном числе. Если ресурса РТС недостаточно для полной ликвидации опасных факторов (ОФ) в КЗП, то в данный узел на следующем этапе назначается свободная РТС или РТС, у которой остался запас ресурса после применения на предыдущем этапе (рис. 2).

По представленному алгоритму определены следующие показатели, характеризующие каждый способ распределения РТС по узлам КЗП:

1) при неравномерном распределении определяется количество РТС, предназначаемых для применения в каждом узле

$$N_{oi} = E \left[N_{\text{РТС}} \cdot \Delta W_{\text{РТС}} / \eta \{ t_{0m}^{\text{max}} \} \right];$$

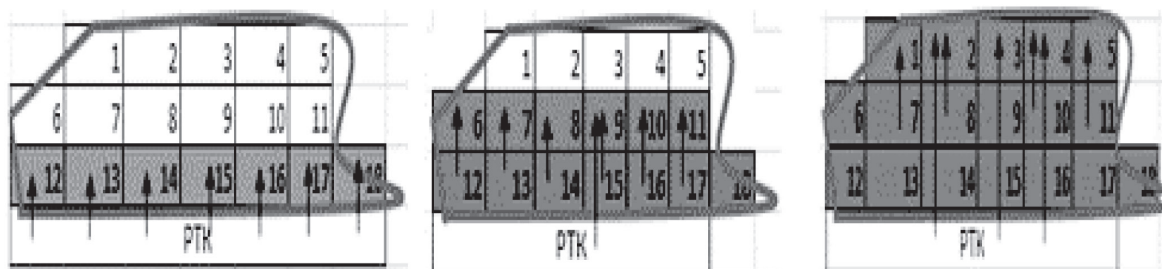


Рис. 2. Назначение РТС по узлам КЗП при равномерном распределении

Таблица 1

Расход и остаточный ресурсы ЛП и МП РТС, а также время применения по этапам ликвидации ОФ ЭС при неравномерном распределении по узлам КЗП

РТС	$W_{\text{РТС}}$, ед	$L_{\text{РТС}}$, ед	Этап 1							Этап 2							Этап 3						
			ΔW_{ij}	$\Delta W_{\text{РТС}}$	$t_{\text{ликв}}$	L_{0j}	$\Delta L_{\text{РТС}}$	$t_{\text{перев}}$	$t_{\text{общ}}$	ΔW_{ij}	$\Delta W_{\text{РТС}}$	$t_{\text{ликв}}$	L_{0j}	$\Delta L_{\text{РТС}}$	$t_{\text{перев}}$	$t_{\text{общ}}$	ΔW_{ij}	$\Delta W_{\text{РТС}}$	$t_{\text{ликв}}$	L_{0j}	$\Delta L_{\text{РТС}}$	$t_{\text{перев}}$	$t_{\text{общ}}$
1	26	800	20	6	10	200	600	4	14	0	6	0	0	600	0	0	6	0	3	141	259	1	2,5
2	26	800	18	8	9	300	500	5	14	8	0	4	341	159	6	10	0	0	0	141	159	1	2,5
3	26	800	18	8	9	241	559	5	14	0	8	0	0	559	0	0	6	2	3	241	0	2	4
4	26	800	18	8	9	241	559	5	14	8	0	4	441	117	8	12	0	0	0	100	117	1	2
5	26	800	18	8	9	100	700	2	11	8	0	4	241	459	5	9	0	0	0	0	559	1	2
6	26	800	16	10	8	341	459	6	14	10	0	5	100	359	2	7	0	0	0	0	176	2	4
7	26	800	16	10	8	341	459	6	14	10	0	5	100	359	2	7	0	0	0	0	117	2	4
8	26	800	16	10	8	141	659	3	11	10	0	5	100	559	2	7	0	0	0	0	559	1	3
9	26	800	16	10	8	141	659	3	11	10	0	0	100	559	2	2	0	0	0	0	959	0	0
10	26	800	14	12	7	283	517	5	12	12	0	0	400	117	7	7	0	0	0	0	817	0	0
Σ	260	8000	170	90	85	2329	5671	44	129	76	14	27	1823	3847	34	61	12	2	6	623	3722	11	24

где $\eta\{i_{0m}^{\max}\}$ – мощность множества $\{i_{0m}^{\max}\}$;

2) оцениваются затраты ресурсов локомоторной подсистемы (ЛП) для всех РТС на перемещения с точек рубежа применения до каждого i -го узла – ΔL_{0i}^k ;

3) определяется время применения каждой k -й РТС в i -м узле

$$\Delta t_i^k = (\Delta W_i / N_i \cdot \lambda_{\text{РТС}});$$

4) определяется время движения каждой k -й РТС из точки рубежа применения в i -й узел КЗП – Δt_{0i}^k и время начала их выдвижения в назначенные узлы КЗП – $t_{0i}^k = T_n - d \cdot \Delta t_i^k - \Delta t_{0i}^k$, где d – порядковый номер k -й РТС при воздействии на ОФ экстремальной ситуации в i -м узле;

5) оценивается время полной ликвидации ОФ ЭС в каждом выявленном узле

$$\Delta t_i = \Delta W_i / \lambda_{\text{РТС}};$$

6) оценивается остаточный ресурс манипуляционной подсистемы (МП) после применения в каждом i -м узле КЗП

$$\Delta W_{\text{РТС}_i}^k = (\Delta t_i - N_i \cdot \Delta t_i^k) \cdot \lambda_{\text{РТС}};$$

7) после применения в каждом i -м узле КЗП для РТС, у которых $\Delta W_{\text{РТС}_i}^k > 0$, повторяются пункты 2-6 для их воздействия по ОФ ЭС в других узлах КЗП.

Распределение РТС по узлам КЗП ЭС проводилось при следующих исходных данных:

– область ЭС аппроксимирована 18 КЗП со следующими значениями ОФ в условных единицах: КЗП 1, 5, 13, 17=12; КЗП 2, 4, 14, 16=16; КЗП 3, 8, 10, 15=18; КЗП 6=10; КЗП 9=20; КЗП 12, 18=8; КЗП 7, 11=14;

Таблица 2

Расход и остаточный ресурсы ЛП и МП РТС, а также время применения по этапам ликвидации ОФ ЭС при равномерном распределении по узлам КЗП

РТС	$W_{\text{РТС}}, \text{ед}$	$L_{\text{РТС}}, \text{ед}$	Этап 1							Этап 2							Этап 3						
			ΔW_{ij}	$\Delta W_{\text{РТС}}$	$t_{\text{ликв}}$	L_{0j}	$\Delta L_{\text{РТС}}$	$t_{\text{перев}}$	$t_{\text{общ}}$	ΔW_{ij}	$\Delta W_{\text{РТС}}$	$t_{\text{ликв}}$	L_{0j}	$\Delta L_{\text{РТС}}$	$t_{\text{перев}}$	$t_{\text{общ}}$	ΔW_{ij}	$\Delta W_{\text{РТС}}$	$t_{\text{ликв}}$	L_{0j}	$\Delta L_{\text{РТС}}$	$t_{\text{перев}}$	$t_{\text{общ}}$
1	26	800	12	14	6	100	700	2	8	14	0	7	100	600	2	9	0	0	0	0	600	0	0
2	26	800	16	10	8	100	700	2	10	10	0	5	100	600	2	7	0	0	0	0	600	0	0
3	26	800	16	10	8	100	700	2	10	10	0	5	100	600	2	7	0	0	0	0	600	0	0
4	26	800	12	14	6	100	700	2	8	14	0	7	100	600	2	9	0	0	0	0	600	0	0
5	26	800	18	8	9	100	700	2	11	0	8	0	0	700	0	0	8	0	4	141	559	3	7
6	26	800	8	18	4	100	700	2	6	10	8	5	100	600	2	7	8	0	4	141	459	3	7
7	26	800	8	18	4	100	700	2	6	0	18	0	0	700	0	0	12	6	6	241	459	5	11
8	26	800	0	26	0	0	800	0	0	20	6	10	200	600	4	14	6	0	3	141	459	3	6
9	26	800	0	26	0	0	800	0	0	0	26	0	0	800	0	0	18	8	9	300	500	5	14
10	26	800	0	26	0	0	800	0	0	0	26	0	0	800	0	0	16	10	8	300	500	5	13
Σ	260	8000	90	170	45	700	7300	14	59	78	92	39	700	6600	14	53	68	24	34	1264	5336	24	58

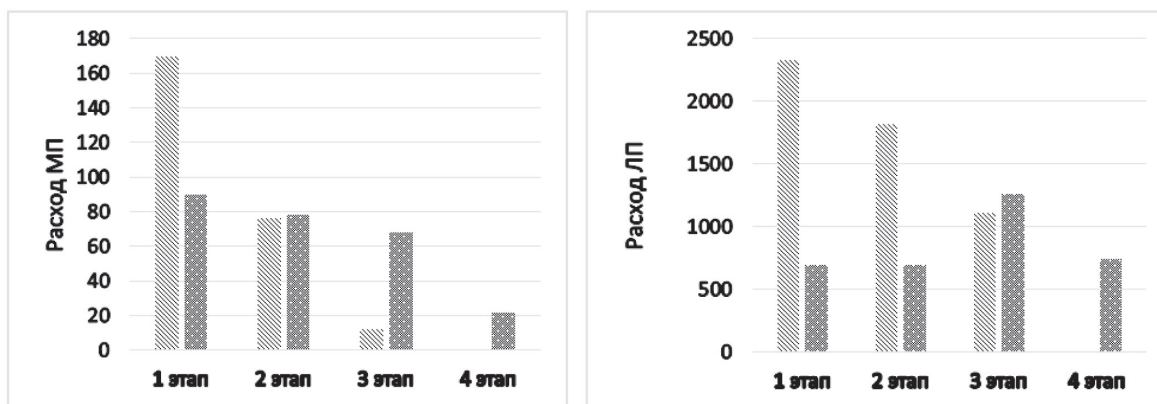


Рис. 3. Расход ресурса ЛП и МП РТС по этапам применения

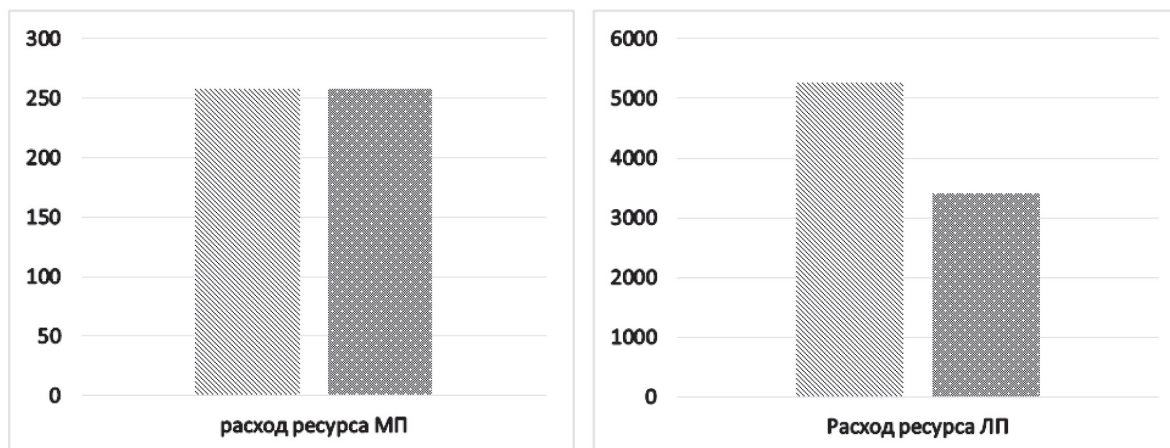


Рис. 4. Общий расход ресурса ЛП и МП РТС

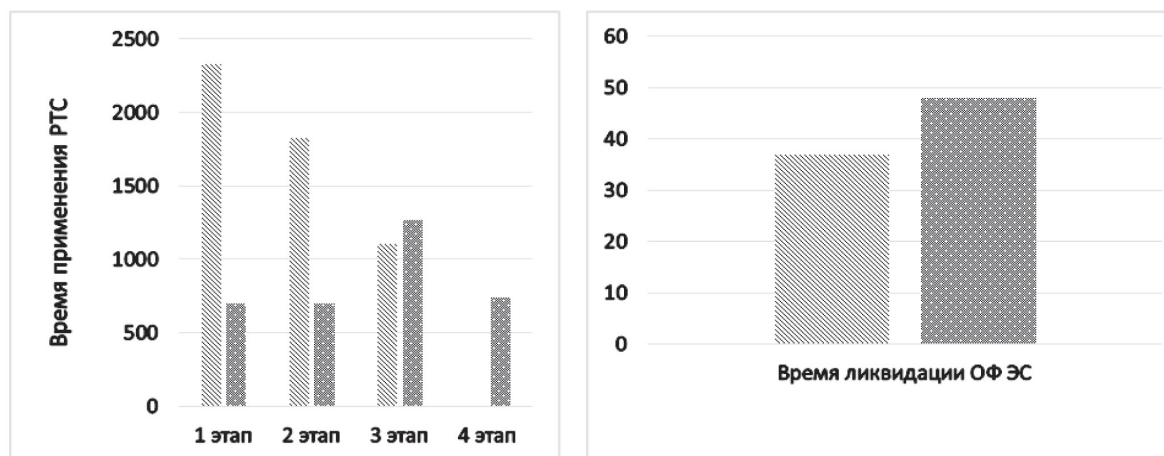


Рис. 5. Время (мин) ликвидации ОФ ЭС

– гомогенная структура включает 10 РТС со следующими характеристиками: ресурс МП $W_{\text{РТС}} = 26$ усл. ед.; ресурс ЛП $L_{\text{РТС}} = 800$ усл. ед.; средняя скорость передвижения $V_{\text{РТС}} = 60$ м/мин; производительность МП $\lambda_{\text{РТС}} = 5$ ед/мин.

Расход ресурсов ЛП и МП по этапам применения и общий за все время применения при неравномерном (наклонная штриховка) и равномерном (сплошная заливка) распределении РТС по узлам КЗП представлены на рис. 3 и 4.

Время применения РТС по этапам и общее за все время ликвидации ЭС при неравномерном (наклонная штриховка) и равномерном (сплошная заливка) распределении РТС по узлам КЗП представлены на рис. 5.

Полученные результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

- неравномерное распределение РТС по узлам КЗП обеспечивает лучшие показатели по времени ликвидации ЭС, но при этом значительно расходуется ресурс ЛП РТС;
- равномерное распределение РТС по узлам КЗП минимизирует расход ЛП, что в свою очередь позволяет повысить вероятность ликвидации ОФ при изменении прогнозируемых условий развития ЭС.

Заключение

Неравномерное распределение РТС по узлам КЗП целесообразно применять при достаточно полной информации о характеристиках ЭС. В случае наличия неопределенности характера ЭС целесообразно начать с равномерного распределения РТС по узлам КЗП и по мере поступления дополнительной информации о характеристиках ЭС переходить на неравномерное распределение РТС по узлам КЗП.

Применение робототехнических систем на объектах космоса позволит:

- выполнять работы в опасных зонах (разведка, взятие проб, земляные работы, демонтаж и разру-

шение строительных конструкций и оборудования, транспортирование опасных предметов);

- выполнять работы при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (осмотр мест аварий, разборка и разрушение поврежденных конструкций, манипуляции с компонентами ракетного топлива, борьба с огнем);

- проводить взрывотехнические работы (поиск, извлечение, транспортирование и обездвиживание или уничтожение взрывоопасных предметов; взрывные работы).

Литература

1. Тарасов, А. Г. Робототехнические комплексы автоматизированных систем управления подготовкой и пуском ракет космического назначения и показатели эффективности их применения / А.Г. Тарасов, Е.П. Минаков // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2015. – № 6. – С. 19–24.
2. Минаков, Е. П. Обоснование необходимых условий и вариантов применения робототехнических систем и комплексов ликвидации экстремальных ситуаций / Е.П. Минаков, А.Г. Тарасов, В.А. Онов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2016. – Вып. № 3 (39). – С. 17–25.
3. Тодосейчук, С. П. Научно-методические основы создания и применения робототехнических средств для решения задач МЧС России / С.П. Тодосейчук, К.И. Самойлов, Н.Г. Климачева. – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. – 192 с.
4. ГОСТ Р 53802–2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2011. – 40 с.
5. Письменная, В. А. Решение задачи целераспределения с использованием венгерского алгоритма / В.А. Письменная, А.В. Якутин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – № 2. – С. 32–36.
6. A Lagrange Relaxation Method for Solving Weapon-Target Assignment Problem / M. Ni [et al.] // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering. – 2011. – Vol. 1. – P. 1–10.
7. Gainanov, D. An inference algorithm for monotone boolean functions associated with undirected graphs / D. Gainanov, V. Rasskazova // Bulletin SUSU. – 2016. – Vol. 9, No. 3. – P. 17–30.

8. Sikanen, T. Solving Weapon Target Assignment Problem with Dynamic Programming / T. Sikanen. – Independent research projects in applied mathematics, 2008. – 32 p.

9. Mukhedkar, R. Weapon Target Allocation Problem Using Fuzzy Model / R. Mukhedkar, S. Naik // Intern. J. of Application or Innovation in Engineering & Management. – 2013. – Vol. 2, No. 6. – P. 279–289.

10. Yang Xin-quan. The Algorithms Optimization of Artificial Neural Network Based on Particle Swarm / Yang Xin-quan // The Open Cybernetics & Systemics Journal. – 2014. – Vol. 8. – P. 519–524.

11. Lu, Y. The Air Defense Missile Optimum Target Assignment Based on the Improved Genetic Algorithm / Y. Lu, W. Miao, M. Li // J. of Theoretical and Applied Information Technology. – 2013. – Vol. 48, No. 2. – P. 809–816.

12. A Hybrid Heuristic Ant Colony System for Coordinated Multi-Target Assignment / B. Lie [et al.] // Information Technology Journal. – 2009. – Vol. 8, No. 2. – P. 156–164.

13. A Flexible and Scalable SLAM System with Full 3D Motion Estimation / S. Kohlbrecher [et al.] // Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), IEEE International Symposium on. 2011. – P. 155–160.

14. Zavlanos, M. Dynamic assignment in distributed motion planning with limited information / M. Zavlanos, G. Pappas // Proc. of the American Control Conference. – USA, New-York City, 2007. – P. 1173–1178.

15. Каляев, И. А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян. – М.: Физматлит, 2009. – 278 с.