

А.И. МОТИЕНКО, А.Г. ТАРАСОВ, И.В. ДОРОЖКО, О.О. БАСОВ
**ПРОАКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ
СИСТЕМАМИ СПАСЕНИЯ ПОСТРАДАВШИХ**

Мотиенко А.И., Тарасов А.Г., Дорожко И.В., Басов О.О. **Проактивное управление робототехническими системами спасения пострадавших.**

Аннотация. В статье рассматривается задача реализации проактивного управления робототехническими системами (РТС) спасения пострадавших. Применение широкой номенклатуры сенсорных элементов в составе РТС позволяет расширить перечень контролируемых параметров и сформировать управляющие воздействия с использованием прогнозирующих и упреждающих возможностей, базирующихся на методах и технологиях комплексного моделирования. Представлен комплекс моделей для выработки решения на оказание помощи пострадавшему. Оценена эффективность такого решения.

Ключевые слова: проактивное управление, робототехническая система, байесовская сеть доверия, комплексное моделирование, показатели эффективности.

Motienko A.I., Tarasov A.G., Dorozhko I.V., Basov O.O. **Proactive Control of Robotic Systems for Rescue Operations.**

Abstract. This paper considers the task of implementing proactive control of robotic systems (RS) for rescuing victims. The use of a wide range of sensory elements in the RS allows one to expand the list of monitored parameters and to generate the control action with the use of predictive and proactive capabilities based on the methods and technology of integrated modeling. A complex of models for making decisions about assistance to victims is presented. The efficiency of such decisions is evaluated.

Keywords: proactive control; robotic system; Bayesian belief network; integrated modelling; indicators of efficiency.

1. Введение. Стремление человека заменить техническими средствами свое прямое участие в выполнении различных видов работ является неотъемлемым элементом цивилизационного процесса. Современные достижения в области робототехники нашли достаточно широкое применение при решении задач автоматизации на опасных производствах, при выполнении монотонных и высокоточных работ. Активное внедрение автоматизированных систем в процессы управления и, соответственно, сокращение эксплуатирующего персонала, с одной стороны, и принципиальная ограниченность привлечения персонала для устранения нештатных ситуаций с позиций безопасности, с другой стороны, требуют решения задачи автоматизации процесса устранения неисправности для обеспечения необходимого уровня оперативности и безопасности.

Одной из задач, решаемых автоматизированными системами управления, является парирование отказов и недопущение возникновения нештатных ситуаций, которые не могут быть решены при реализации реактивного управления, требующего учета всей имеющейся

статистической информации, расширенного контроля параметров для осуществления мониторинга и координации.

В этих условиях целесообразно переходить к новой технологии управления, базирующейся на концепции проактивного управления, которое, применительно к организационно-техническим объектам, включает в себя, как функции целеполагания, планирования, регулирования, так и функции учета и контроля, мониторинга и координации.

2. Концепция проактивного управления. Проактивное управление объектами предполагает предотвращение возникновения нештатных ситуаций за счет создания в соответствующей системе управления принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей при формировании и реализации управляющих воздействий, базирующихся на методах и технологиях системного (комплексного) моделирования [1].

Методология проактивного управления направлена на выявление инициирующих событий, формирование и реализацию управляющих воздействий, нацеленных на парирование не следствий, а причин, вызывающих возможные нештатные, аварийные и кризисные ситуации в объекте управления [2]. Анализ современных АСУ показал, что в них реализованы технические средства контроля и управления, фиксирующие последствия нештатных и аварийных ситуаций и обеспечивающие реактивное управление. Для реализации методологии проактивного управления необходимо разрабатывать средства и методы выявления инициирующих событий.

Для реализации методологии проактивного управления в качестве технических средств контроля и управления в условиях нештатной ситуации целесообразно применять робототехнические системы (РТС), которые обладают свойствами манипуляции и локомоции [3, 4]. Ввиду сложности точного априорного определения всего спектра и характеристик нештатной ситуации необходимо разрабатывать образцы РТС с возможностью алгоритмической и структурной реконфигурации для ликвидации непредвиденных нештатных ситуаций. Такие РТС должны строиться по модульной архитектуре, предусматривающей подключение широкого спектра измерительных средств (датчиков, видеокамер, систем технического зрения и др.), а также различных исполнительных механизмов.

В качестве примера применения методологии проактивного управления рассмотрим задачу принятия решения на оказание помощи пострадавшему в зоне аварии ракеты космического назначения (РКН).

В случае аварии РКН образуется зона, характеризующаяся

возникновением опасных, с точки зрения воздействия на людей и окружающую среду, факторов. Для обследования данной зоны необходимо применять РТС, способные обнаружить пострадавших, провести осмотр, опрос и манипуляции для определения их состояния, определить наиболее безопасное положение для транспортировки и реализовать структуру для безопасной транспортировки пострадавшего [5-8]. Особенность решения представленных задач заключается в том, что пострадавших может быть несколько, и при их обнаружении РТС должно на месте спрогнозировать возможность спасения пострадавшего [9-11]. Для решения представленной совокупности задач необходимо разработать комплекс моделей, которые позволят выработать решение на оказание помощи пострадавшему. Такое решение должно осуществляться с позиций системного подхода, который заключается в рассмотрении исследуемых систем в их взаимосвязи и взаимодействии со средой [12-14].

3. Комплекс моделей для выработки решения на оказание помощи пострадавшему. В случае обнаружения пострадавшего в зоне действия опасных факторов необходимо оценить его текущее состояние, спрогнозировать изменение состояния с учетом времени на оценку текущего состояния и эвакуацию из опасной зоны и выработать решение на проведение эвакуации или дальнейший поиск других пострадавших.

Для определения района обследования, рельефа местности, активности воздействия опасных факторов разрабатывается модель оценивания окружающей обстановки. Формирование оптимальной траектории обследования заданного района и создание необходимой для соответствующего положения транспортирования пострадавшего структуры производится на основе модели движения и реконфигурации РТС в различных условиях обстановки. Для определения позы для транспортировки пострадавшего разрабатывается модель выбора положения для транспортировки пострадавшего. Выработка решения на проведение эвакуации или дальнейший поиск других пострадавших производится на основе модели оценивания эффективности оказания помощи пострадавшему. Взаимодействие данных моделей показано на рисунке 1.

Наиболее сложной является задача разработки модели оценивания окружающей обстановки, так как она связана с учетом большого числа неопределенных, слабо формализуемых факторов. В работе [15] приводится методика расчета выбросов несимметричного диметилгидразина при заданных объеме опасного вещества, площади пролива и данных атмосферы. Для случая аварии РКН на активном участке полета эти данные необходимо

рассчитывать, в связи с чем в статье предлагается модель расчета массы компонентов топлива на активном участке полета РКН, на основании которой с использованием известных методик определяются радиусы зон поражения. При наличии атмосферных данных может быть спрогнозирована динамика изменения агрессивности среды, по которой определяется среднее время выживания с момента возникновения аварии до гибели пострадавшего.



Рис. 1. Комплекс моделей для выработки решения на оказание помощи пострадавшему

Модель выбора положения для транспортировки пострадавшего описана в [16]. В данной работе уточнена ее структура, добавлены переменные, обозначающие обнаружение пострадавшего, активность среды и способы определения признаков травм. Полученные из модели оценивания обстановки радиусы зон повреждений определяют степень активности среды («высокая», «средняя», «низкая», «отсутствует»), которая, в свою очередь, влияет на возможность проведения мероприятий определения признаков травм (осмотр, опрос, манипуляции) в модели выбора положения для транспортировки пострадавшего.

Модель движения и реконфигурации РТС определяется решаемыми задачами, особенностями применения и характеристиками РТС, в настоящее время прорабатывается и является направлением дальнейших исследований.

Модель оценивания эффективности оказания помощи пострада-

давшему основана на известных подходах к оцениванию эффективности и учитывает неопределенность, нечеткость величины ущерба.

4. Модель оценивания обстановки в результате аварии РКН.

Данная модель по результатам анализа телеметрической информации и определения времени аварии известного типа РКН позволяет рассчитать радиусы зон поражения.

В случае экстремальной ситуации на стартовом столе огневое кольцо не распространится более чем на 300 м от пусковой установки. При разгерметизации баков с компонентами ракетного топлива (КРТ) в результате падения РКН образуется облако с КРТ, масса которого определяется по следующей формуле [17]:

$$M_{\text{обл}} = M_{\Gamma} + M_{\text{Ж}} + M_{\text{И}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{обл}}$ — масса КРТ в первичном облаке; M_{Γ} — масса КРТ, переходящая в первичное облако в виде газа при мгновенном вскипании КРТ; $M_{\text{Ж}}$ — масса КРТ, переходящая в первичное облако в виде аэрозоля; $M_{\text{И}}$ — масса КРТ, переходящая в первичное облако в виде газа при кипении пролива.

Площадь поверхности пролива $S_{\text{прол}}$ на открытой местности при свободном растекании определяется по формуле:

$$S_{\text{прол}} = \frac{\pi \left(\sqrt[3]{25,5 \frac{M_{\text{КРТ}} - M_{\Gamma} - M_{\text{Ж}}}{\rho_{\text{КРТ}}}} \right)^2}{4}, \quad (2)$$

где $M_{\text{КРТ}}$ — масса КРТ в РКН на момент аварии; $\rho_{\text{КРТ}}$ — плотность КРТ.

Радиус первичного облака КРТ $R_{\text{обл1}}$ в момент детонации баков РКН определяется как:

$$R_{\text{обл1}} = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \frac{M_{\text{обл}}}{\rho_{\text{выб}}}}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{выб}}$ — плотность КРТ в первичном облаке в начальный момент времени.

Радиус вторичного облака $R_{\text{обл2}}$, образующегося при испарении КРТ из пролива, определяется как:

$$R_{\text{обл2}} = 0,56\sqrt{S_{\text{прол}}} \cdot \quad (4)$$

В случае экстремальной ситуации при подготовке и пуске РКН результаты воздействия на людей и окружающую среду зависят от количества топлива, оставшегося в баках ракеты-носителя, и, соответственно, времени полета. По статистическим и техническим данным, наиболее значительные последствия (взрыв, удар о земную поверхность, пожар) возможны в первые 25÷40 секунд полета, т.е. в радиусе 30 км от стартового комплекса. После этого критического периода полета высота становится значительной, а остатки топлива, наоборот, незначительными.

По характеристикам двигательных установок можно рассчитать расход КРТ и, приняв его постоянным, определить массу КРТ ($M_{\text{КРТ}}$) в процессе полета РКН для различных моментов времени возникновения ЭС. Для наиболее критического периода полета (0÷40 секунд) данные по массе КРТ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Массовые характеристики КРТ на начальном этапе полета РКН

Время полета, с	Масса КРТ в боковых блоках, кг	Масса КРТ в центрально м блоке, кг	Масса КРТ в 3 ступени, кг	Общая масса КРТ, кг	Масса О, кг	Масса Г, кг
0	39162	90160	23204	270012	191941	78071
10	35911	87228	23204	254076	180612	73463
20	32660	84296	23204	238140	169284	68856
30	29409	81364	23204	222203	157956	64248
40	26158	78432	23204	206267	146627	59640

В случае возникновения ЭС без возгорания КРТ кислород, который используется в качестве окислителя (О), быстро испаряется с образованием «белого облака». Керосин, который используется в качестве горючего (Г), в результате детонации частично перейдет в газообразное и аэрозольное состояние с образованием первичного облака, а оставшаяся часть образует «пятно загрязнения» на поверхности Земли. Для рассматриваемого примера были получены данные, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Пространственные характеристики в случае возникновения ЭС без возгорания КРТ на начальном этапе полета РКН

Время полета, с	Масса горючего (M), кг	M_{Γ} , кг	$M - M_{\Gamma}$, кг	$M_{\text{Ж}}$, кг	$M_{\text{И}}$, кг	$M_{\text{обл}}$, кг	$R_{\text{обл}}$, м	$S_{\text{прол}}$, м ²	$R_{\text{обл2}}$, м
0	78071	30606	47465	30606	16860	61211	6	52	4
10	73463	28799	44664	28799	15865	57599	6	50	4
20	68856	26993	41863	26993	14870	53986	5	48	4
30	64248	25187	39061	25187	13875	50373	5	46	4
40	59640	23380	36260	23380	12879	46761	5	43	4

Значительно чаще в результате экстремальной ситуации происходит возгорание КРТ, из-за чего возникает более сложная задача моделирования проливов КРТ с последующим возгоранием и образованием облака с продуктами горения токсичных КРТ. В данном случае необходимо рассмотреть воздействие ударной волны и динамику распространения токсонагрузки вредных веществ.

Для определения радиуса действия ударной волны, сформировавшейся в результате взрыва топливоздушнoй смеси (ТВС), можно воспользоваться приближенной формулой [17]:

$$R = K \cdot W^{1/3} / (1 + (3180/W)^2)^{1/6}, \quad (5)$$

где коэффициент K определяется по справочным данным, а W — тротиловый эквивалент взрыва, определяемый из соотношения:

$$W = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{M_{\Gamma} q_{\Gamma}}{4,5 \cdot 10^6}, \quad (6)$$

где M_{Γ} — масса ТВС; q_{Γ} — теплота сгорания газа, величина которой определяется по справочным данным или оценивается по формуле [17]:

$$q_{\Gamma} = 44\beta, \quad (7)$$

где β — табличное значение корректировочного коэффициента для наиболее распространенных взрывоопасных веществ.

Для начального участка полета РКН «Союз-2» определены следующие значения радиусов действия ударной волны для зоны полного разрушения зданий R_1 ($K=3,8$), для зоны тяжелых повреждений R_2 ($K=5,6$) и для зоны средних повреждений R_3 ($K=9,6$), которые

представлены в таблице 3.

Таблица 3. Расчетные значения радиусов действия ударной волны в случае возникновения ЭС на начальном этапе полета РКН для различных зон повреждений

Время полета, с	$M_{Г}$, кг	W , МДж	R_1 , м	R_2 , м	R_3 , м
0	253152,29	129979,95	192,47	283,64	486,24
10	238211,17	122308,50	188,61	277,94	476,48
20	223270,06	114637,05	184,57	272,00	466,29
30	208328,94	106965,60	180,36	265,79	455,64
40	193387,83	99294,15	175,93	259,27	444,47

Таким образом, модель оценивания окружающей обстановки позволяет по известным характеристикам РКН (масса КРТ) и времени возникновения аварии рассчитать радиусы зон опасных факторов. На основании начальных радиусов зон поражения и данных атмосферы прогнозируются изменения агрессивности окружающей среды для выработки оптимальных маршрутов спасения пострадавших и времени нахождения пострадавшего в зоне действия опасных факторов с целью определения возможности спасения пострадавшего.

5. Модель выбора положения для транспортировки пострадавшего на основе байесовских сетей доверия. Для моделирования процесса выбора положения для транспортировки пострадавшего предпочтение было отдано байесовским сетям доверия (БСД), обладающими преимуществами по сравнению с деревьями решений, методами анализа иерархий, продукционными моделям представления знаний, нечеткими моделями и нейронными сетями [18]. БСД основаны на принципе максимального использования имеющейся априорной информации, ее непрерывного пересмотра и переоценки с учетом получаемых выборочных данных об исследуемом явлении или процессе. При этом новые наблюдения или решения применяются для модификации априорных вероятностей, которые, в свою очередь, необходимы для вычисления апостериорных вероятностей гипотез [19]. Кроме того, в отсутствие эмпирических данных БСД обеспечивают использование субъективных (экспертных) вероятностных оценок для априорных гипотез.

Разработанная математическая модель выбора положения для транспортировки пострадавшего в виде БСД имеет следующий вид:

$$\langle G, PAR \rangle, \quad (8)$$

где G — ациклический направленный граф; PAR — множество параметров, определяющих БСД.

Вершинами ациклического направленного графа G являются: (рисунок 2).

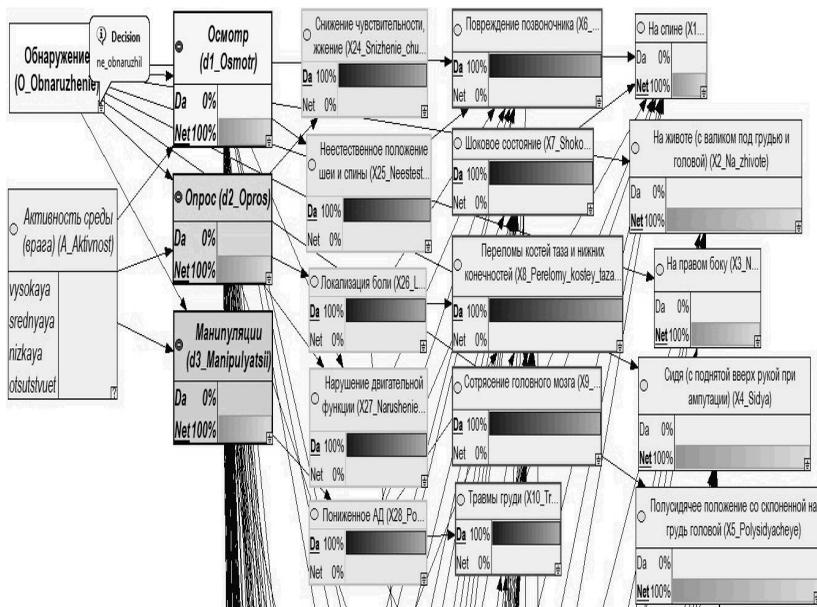


Рис. 2. Фрагмент БСД, когда пострадавший не обнаружен

1. Дискретные переменные, обозначающие:

- позы для транспортировки (на спине, на животе (с валиком под грудью и головой), на правом боку, сидя (с поднятой вверх рукой при ампутации), полусидячее положение со склоненной на грудь головой) — x_1, \dots, x_5 ;

- наиболее распространенные травмы (повреждение позвоночника, переломы костей таза и нижних конечностей, сотрясение головного мозга, травмы шеи и т.д.) — x_6, \dots, x_{23} ;

- признаки травм (потеря сознания, неестественное положение шеи и спины, тахикардия, головная боль, рвота, нарушение речи и т.д.) — x_{24}, \dots, x_{125} ;

- способы определения признаков травм (осмотр, опрос, манипуляции) — d_1, \dots, d_3 , которые связаны с переменными x_{24}, \dots, x_{125} . При этом, если признак травмы не обнаруживается одним из способов определения травм, то связь между ними отсутствует, например, при-

знак травмы «Шум в ушах» не имеет связи с «Осмотром» и «Манипуляциями»;

– активность среды (врага) — A («высокая», «средняя», «низкая», «отсутствует», от которых зависит применение способов определения травм). Информация об активности среды (врага) может быть введена в робота либо уточнена роботом с помощью имеющихся у него датчиков шума, газа и т.д.;

2. Вершина действия, обозначающая обнаружение (необнаружение) пострадавшего, — O .

Параметрами сети **PAR** являются [16]:

1. Для вершины A , не имеющей родительских переменных, априорные вероятности (безусловные вероятности) того, что активность среды (врага) «высокая», «средняя», «низкая», «отсутствует» — $P(\tilde{A}_m)$, $m = 1...4$. Знак « \sim » обозначает положительное или отрицательное означивание переменной.

2. Для вершин x_{24}, \dots, x_{125} задаются условные вероятности зависимости признаков травм от способов определения травм — $P(\tilde{x}_k | \tilde{d}_n)$, $k = 24...125$; $n = 1...3$.

3. Для вершин x_6, \dots, x_{23} задаются условные вероятности зависимости травм от признаков травм — $P(\tilde{x}_j | \tilde{x}_k)$, $j = 6...23$, $k = 24...125$.

4. Для вершин x_1, \dots, x_5 задаются условные вероятности зависимости положений для транспортировки от травм — $P(\tilde{x}_i | \tilde{x}_j)$, $i = 0...5$, $j = 6...23$.

В начальный момент времени (пострадавший не обнаружен) робот действий (осмотра, опроса, манипуляций) не производит, предполагается, что пострадавший где-то находится и у него присутствует весь набор признаков травм, положение для транспортировки при этом не выбирается (рисунок 2).

Главное назначение БСД — апостериорный вывод. Суть апостериорного вывода заключается в следующем: при поступлении свидетельства (новой информации) необходимо приравнять к нулю несовместимые со свидетельством вероятности исходов и нормировать оставшиеся вероятности, учитывая априорные данные с тем, чтобы вероятности оставшихся исходов в сумме снова давали единицу [18, 19]. Априорные данные пересчитываются, в результате получается апостериорная оценка, которая, в свою очередь, будет являться априорной информацией в случае поступления новых свидетельств. Апостериорный вывод

в БСД основан на процедуре опроса БСД. Под опросом БСД понимается вычисление безусловного распределения переменной на основе условных распределений БСД и поступивших данных (свидетельств).

На рисунке 3 представлен результат апостериорного вывода в БСД при поступлении информации о том, что пострадавший обнаружен, активность среды (врага) — «средняя» (проводится только «Осмотр» и «Опрос»), а также информации о пострадавшем [16] (таблица 4).

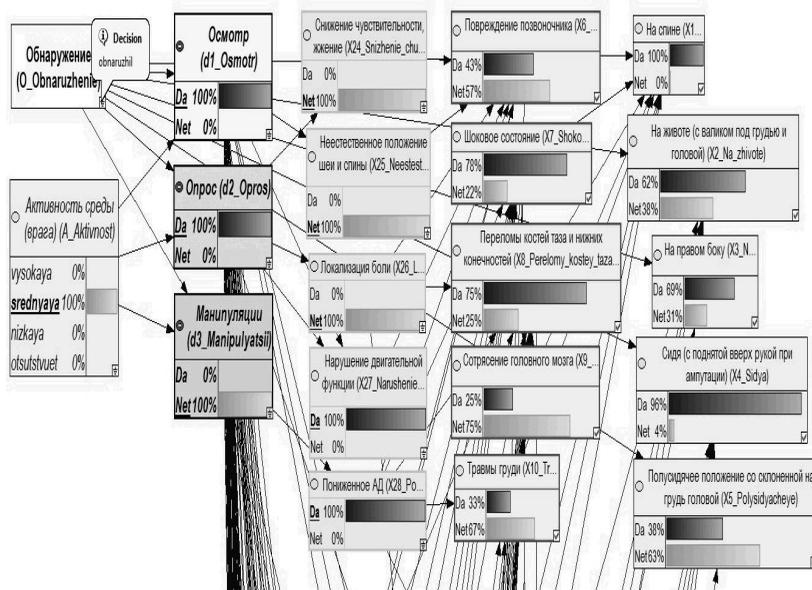


Рис. 3. Фрагмент БСД при поступлении информации

Если пострадавший обнаружен, то проводится действие «Осмотр», а в зависимости от активности среды — «Опрос» и «Манипуляции», в результате которых могут быть исключены определенные признаки травм, а следовательно, уменьшены вероятности связанных с ними травм, что влияет на выбор положения для транспортировки. Выбирается оптимальное положение для транспортировки:

$$x^* = \arg \max_{x_i \in \{x_1, \dots, x_s\}} \{P(x_i | \tilde{x}_6, \dots, \tilde{x}_{23})\}, \quad (9)$$

Таблица 4. Поступившая информация о пострадавшем

Усл. обозн.	Наличие	Усл. обозн.	Наличие	Усл. обозн.	Наличие
A	средняя	X ₇₄	Нет	X ₁₂₂	Нет
d ₁	Да	X ₇₅	Нет	X ₁₂₃	Нет
d ₂	Да	X ₇₆	Да	X ₁₂₄	Нет
d ₃	Нет	X ₇₈	Нет	X ₁₂₅	Нет
X ₂₅	Нет	X ₇₉	Нет	X ₂₆	Нет
X ₃₀	Да	X ₈₁	Нет	X ₂₉	Нет
X ₃₁	Да	X ₈₂	Нет	X ₃₆	Нет
X ₃₇	Да	X ₈₅	Нет	X ₅₃	Нет
X ₃₈	Да	X ₈₆	Нет	X ₅₄	Нет
X ₃₉	Да	X ₈₇	Да	X ₅₅	Нет
X ₄₀	Нет	X ₈₉	Да	X ₅₆	Нет
X ⁴²	Да	X ₉₄	Нет	X ₅₈	Нет
X ₄₃	Да	X ₉₅	Нет	X ₆₄	Нет
X ₄₅	Да	X ₉₆	Нет	X ₆₆	Нет
X ₄₆	Да	X ₉₉	Нет	X ₆₈	Нет
X ₄₇	Нет	X ₁₀₁	Нет	X ₇₇	Нет
X ₄₈	Нет	X ₁₀₂	Нет	X ₈₃	Нет
X ₄₉	Да	X ₁₀₃	Да	X ₉₀	Нет
X ₅₀	Да	X ₁₀₄	Да	X ₉₂	Нет
X ₅₁	Да	X ₁₀₆	Нет	X ₉₇	Нет
X ₅₂	Да	X ₁₀₇	Нет	X ₁₀₀	Нет
X ₅₇	Нет	X ₁₀₉	Нет	X ₁₀₈	Нет
X ₅₉	Нет	X ₁₁₀	Нет	X ₁₁₅	Нет
X ₆₃	Нет	X ₁₁₁	Нет	X ₁₁₉	Нет
X ₆₅	Нет	X ₁₁₂	Нет	X ₂₇	Да
X ₆₇	Нет	X ₁₁₇	Нет	X ₄₁	Да
X ₇₁	Нет	X ₁₁₈	Нет	X ₄₄	Да
X ₇₂	Нет	X ₁₂₀	Нет	X ₈₈	Нет
X ₇₃	Да	X ₁₂₁	Нет	X ₉₃	Нет

6. Модель оценивания эффективности оказания помощи пострадавшему. С точки зрения системного подхода, эффективность рассматривается как обобщенное свойство системы, характеризующее степень или полноту достижения цели ее функционирования. Основным требованием при выборе показателя эффективности является соответствие показателя эффективности цели операции A_0 , которая отображается требуемым результатом Y^{TP} .

Кроме того, показатель эффективности должен удовлетворять следующим требованиям [20]:

- содержательности (физический, экономический или иной смысл);
- интерпретируемости (истолкованием полученных математических зависимостей и результатов применительно к рассматриваемой конкретной области);
- измеримости;
- соответствия системе предпочтений лица, принимающего решение.

Можно выявить два типа основных показателей эффективности применения РТС [21].

Первый тип зависимости эффективности (\mathcal{E}) от допущенного ущерба (Y_D) характеризуется наличием порогового ущерба (Y^*) (рисунк 5, а). Если величина допущенного ущерба превосходит величину порогового ущерба, то цель применения РТС можно считать не достигнутой; если же не превосходит — цель применения РТС достигнута. Наиболее емким ПЭ в этом случае является вероятность $\mathcal{E} = P(Y_D \leq Y^*)$ того, что в результате применения РТС будет допущен ущерб не больше порогового, т.е. вероятность достижения поставленной цели.

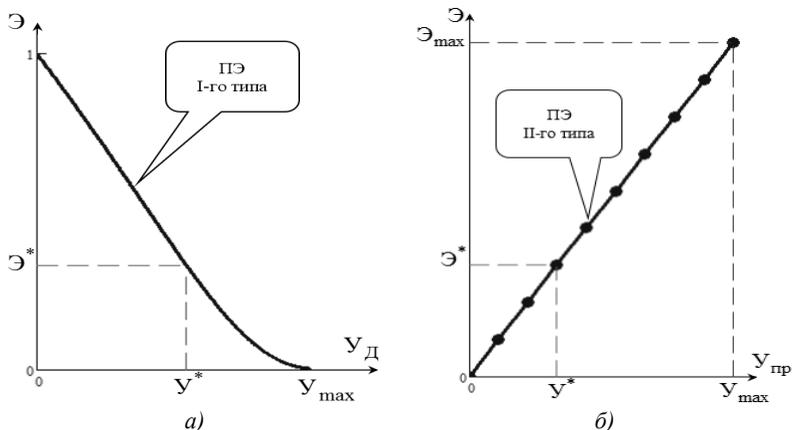


Рис. 4. Гипотетические графики типов показателя эффективности от допущенного и предотвращенного ущерба

Второй тип зависимости эффективности от предотвращенного ущерба имеет место, когда целью применения РТС является макси-

мальное сокращение возможного числа пострадавших (рисунок 5, б). Показателем эффективности при этом является математическое ожидание предотвращенного ущерба — $\mathcal{E} = M(Y_{\text{пр}})$.

Главной целью спасения пострадавших является обнаружение максимального числа живых пострадавших и их эвакуация из опасной зоны. В соответствии с этой целью показателем эффективности будет математическое ожидание числа обнаруженных и спасенных пострадавших ($N_{\text{сп}}$) — $\mathcal{E} = M(N_{\text{сп}})$. В качестве критерия эффективности спасения пострадавших $K_{\text{сп}}$ может быть принят критерий оптимальности, в соответствии с которым необходимо обнаружить и спасти максимальное число пострадавших в единицу времени:

$$K_{\text{сп}} = \frac{M[N_{\text{сп}}]}{T_{\text{п}}} \rightarrow \max, \quad (10)$$

где $T_{\text{п}}$ — время проведения поиска и спасения пострадавших.

За основу для определения эффективности работ по спасению пострадавших примем закон гибели пострадавших:

$$N = N_0 e^{-\alpha T_{\text{п}}}, \quad (11)$$

где N — число погибших в данный момент времени, чел.; N_0 — число изначально живых в первый момент после возникновения экстремальной ситуации, чел.; ч.; α — показатель темпа гибели:

$$\alpha = \frac{1}{T_{\text{сп}}}, \quad (12)$$

где $T_{\text{сп}}$ — среднее время выживания с момента возникновения экстремальной ситуации до гибели пострадавшего.

Из формулы (11) видно, что чем быстрее будет оказана помощь пострадавшим, тем больше число спасенных. Опыт показывает, что сокращение времени начала спасательных работ в завалах зданий (сооружений) с 6 часов до 1 часа уменьшает общие потери на 30÷40%, а повышение темпа работ в два раза также увеличивает число спасенных на 30÷40% [22]. Таким образом, в качестве показателя эффективности применения РТС спасения пострадавших целесообразно использовать темп (интенсивность) извлечения пострадавших (число спасенных за час работы), который в том числе зависит от выбора положения для транспортировки пострадавшего. Правильное положение транспортировки пострадавшего позволит повысить выживаемость

пострадавшего за счет сокращения времени действия агрессивной среды, а неправильное положение транспортировки пострадавшего уменьшит среднее время выживания, тем самым увеличив показатель темпа гибели. Учитывая данные обстоятельства, показатель темпа гибели будет определяться следующим выражением:

$$\alpha = \frac{K_{\text{пол}}^{\text{П}}}{T_{\text{ср}}}, \quad (13)$$

где $K_{\text{пол}}^{\text{П}}$ — коэффициент влияния положения для транспортировки пострадавшего на темп гибели:

$$K_{\text{пол}}^{\text{П}} = \begin{cases} K_{\text{пол}}^{\text{П}} = 1, & \text{при правильном положении;} \\ K_{\text{пол}}^{\text{П}} > 1, & \text{при неправильном положении.} \end{cases}$$

Время проведения поиска и спасения пострадавших при применении РТС будет определяться следующим выражением:

$$T_{\text{П}} = t_{\text{обн}}^{\text{ЭС}} + t_{\text{разв}}^{\text{РТС}} + t_{\text{п}}^{\text{П}} + t_{\text{сп}}^{\text{П}}, \quad (14)$$

где $t_{\text{обн}}^{\text{ЭС}}$ — время обнаружения экстремальной ситуации; $t_{\text{разв}}^{\text{РТС}}$ — время развертывания РТС; $t_{\text{п}}^{\text{П}}$ — время поиска пострадавшего; $t_{\text{сп}}^{\text{П}}$ — время спасения пострадавшего.

Время спасения пострадавшего складывается из времени определения положения для транспортировки пострадавшего, времени погрузки и эвакуации пострадавшего, которые зависят от характеристик РТС и способов их применения.

Оценивание эффективности мероприятий по спасению пострадавших показало, что число пострадавших в значительной мере зависит от характеристик и способов применения РТС. Представленные модели могут быть использованы для формирования требований к тактико-техническим характеристикам перспективных РТС спасения пострадавших для соответствия их требованиям по эффективности.

7. Заключение. В случае возникновения нештатных и аварийных ситуаций параметры объекта управления или взаимодействующей с ним среды представляют серьезную опасность для жизни и здоровья людей, в связи с чем устранение подобных ситуаций с позиций безопасности возможно только с применением РТС. В состав РТС входит сенсорная система (датчики, система технического зрения и т.д.), благодаря чему появляется возможность получения дополнительных све-

дений об объекте исследования, которые целесообразно использовать для мониторинга и координации управления. Для реализации данных функций и перехода от реактивного на проактивное управление необходима разработка комплекса моделей и методик, которые позволяют формировать управление с учетом развивающейся ситуации. Комплекс моделей для выработки решения на оказание помощи пострадавшему демонстрирует необходимость прогнозирования ситуации, так как можно потратить значительный ресурс на спасение пострадавших и не получить ожидаемого эффекта. Неправильные решения по выбору маршрута эвакуации пострадавших (без прогнозирования изменения агрессивности среды и расчета времени выживания), положения транспортирования пострадавшего (без оценивания признаков пострадавшего) могут привести к гибели пострадавших при их спасении, что доказывает правильность и целесообразность принятого подхода.

Литература

1. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1(162). С.162–174.
2. *Охтилев М. Ю., Мустафин Н. Г., Миллер В. Е., Соколов Б. В.* Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. № 11. С.7–15.
3. *Тарасов А.Г.* Перспективы создания робототехнических средств и комплексов подготовки и пуска ракет космического назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2014. № 6. С.72–75.
4. *Тарасов А.Г., Минаков Е.П.* Робототехнические комплексы автоматизированных систем управления подготовкой и пуском ракет космического назначения и показатели эффективности их применения // Промышленные АСУ и контроллеры. 2015. № 6. С. 19–24.
5. *Мотиенко А.И., Басов О.О., Ронжин А.Л.* Автоматизированные робототехнические средства транспортировки раненых // Труды первой военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации». М. 2016. С. 242–247.
6. *Калинин В.Н., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Басов О.О., Ватаманюк И.В., Ронжин А.Л.* Теоретические и прикладные аспекты управления структурной динамикой робототехнических комплексов // Труды первой военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации». М. 2016. С. 369–372.
7. *Солдатов Е.А., Жигалов А.А.* Формирование семейства медицинских робототехнических комплексов военного назначения для эвакуации раненых и пострадавших с поля боя // Труды первой военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации». М. 2016. С. 267–270.
8. *Козыренко Н.С., Мещеряков Р.В., Ходашинский И.А., Ануфриева Н.Ю.* Математическое и алгоритмическое обеспечение оценки состояния здоровья человека // Труды СПИИРАН. 2014. Вып. 33. С. 117–146.
9. *Карпов А.А.* Автоматическое распознавание аудиовизуальной русской речи с применением асинхронной модели // Информационно-измерительные и

- управляющие системы. М. : Радиотехника. 2010. № 7. Т. 8. С. 91–96.
10. *Ронжин А.Л., Юсупов Р.М.* Многомодальные интерфейсы автономных мобильных робототехнических комплексов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. № 1(162). С. 195–206.
 11. *Басов О.О.* Принципы построения полимодальных инфокоммуникационных систем на основе многомодальных архитектур абонентских терминалов // *Труды СПИИРАН*. 2015. Вып. 39. С. 109–122.
 12. *Калинин В.Н.* Морфологический анализ проблематики теории системных исследований // *Труды СПИИРАН*. 2013. Вып. 1(24). С. 89–107.
 13. *Калинин В.Н.* Космический аппарат как объект системных исследований // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2014. Вып. 640. С. 80–89.
 14. *Калинин В.Н.* О некоторых задачах оптимального управления информационным взаимодействием космического аппарата с поверхностью Земли // *Труды СПИИРАН*. 2015. Вып. 4(41). С.34–56.
 15. *Шатов С.В.* Расчет поражающих факторов и их вероятных зон действия при выбросе жидкой фазы несимметричного диметилгидразина // *Труды Военно-космической академии*. 2015. Вып. 648. С.187–191.
 16. *Мотиенко А.И., Макеев С.М., Басов О.О.* Анализ и моделирование процесса выбора положения для транспортировки пострадавшего на основе байесовских сетей доверия // *Труды СПИИРАН*. 2015. Вып. 6 (43). С. 135–155.
 17. *Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: сборник документов. 3-е изд., испр. и доп.* // М.: Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности. 2010. Серия 27. Выпуск 2. 208 с.
 18. *Jensen F.V., Nielsen T.D.* Bayesian networks and decision graphs // Berlin: Springer, 2007. 457 p.
 19. *Perl J.* Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference // NY etc.: Morgan Kaufmann Publ. 1994. 552 p.
 20. *Куренков В.И.* Методы исследования эффективности ракетно-космических систем. Методические вопросы // Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). 2012. 201 с.
 21. *Петухов Г.Б.* Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч.1. Методология, методы, модели // МО СССР. 1989. 665 с.
 22. *Попов П.А., Федорук В.С., Баринов М.Ф., Мясников Д.В.* Основы моделирования и оценки эффективности действий сил РСЧС при ведении аварийно-спасательных и других неотложных работ: учебное пособие // Химки: АГЗ МЧС России. 2014. 61 с.

References

1. Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. [Theoretical and technological foundations of the concept of proactive monitoring and management of complex objects]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki — Proceedings of the JuFU. Technical Sciences*. 2015. vol. 1(162). pp. 162–174. (In Russ.).
2. Okhtilev M. Yu., Mustafin N. G., Miller, V. E., Sokolov B. V. [The Concept of proactive control over complex objects: theoretical and technological framework]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie — proc. Instrumentation*. 2014. vol. 11. pp. 7–15. (In Russ.).
3. Tarasov A.G. [Prospects of creation of robotic tools and systems training and startup space rockets]. *Naukoemkie tehnologii v kosmicheskikh issledovaniyah Zemli — H@ES Research*. 2014. vol. 6. no. 6. pp. 72–75. (In Russ.).

4. Tarasov A.G., Minakov E.P. [Robotic systems of automated control systems preparation and launching of a space rocket and indicators of efficiency of their application]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery — Industrial automation and controllers*. 2015. vol. 6. pp. 19–24. (In Russ.).
5. Motienko A.I., Basov O.O., Ronzhin A.L. [Automated robotic means of transportation of the wounded]. *Trudy pervoy voenno-nauchnoj konferencii «Robotizacija Vooruzhennykh Sil Rossijskoj Federacii»* [Proceedings of the first military-scientific conference "Robotics of the Armed Forces of Russian Federation"]. M. 2016. pp. 242–247. (In Russ.).
6. Kalinin V.N., Ohtilev M.Ju., Sokolov B.V., Basov O.O., Vatamanjuk I.V., Ronzhin A.L. [Theoretical and applied aspects of management of structural dynamics of robotic complexes]. *Trudy pervoy voenno-nauchnoj konferencii «Robotizacija Vooruzhennykh Sil Rossijskoj Federacii»* [Proceedings of the first military-scientific conference "Robotics of the Armed Forces of Russian Federation"]. M. 2016. pp. 369–372. (In Russ.).
7. Soldatov E.A., Zhigalov A.A. [Formation of the family of medical robotic complexes for military use for the evacuation of wounded and injured from the battlefield]. *Trudy pervoy voenno-nauchnoj konferencii «Robotizacija Vooruzhennykh Sil Rossijskoj Federacii»* [Proceedings of the first military-scientific conference "Robotics of the Armed Forces of Russian Federation"]. M. 2016. pp. 267–270. (In Russ.).
8. Kozyrenko N.K., Meshcheryakov R.V., Hodashinsky I.H., Anufrieva N.A. [Mathematical Model and Algorithms of People Health Evaluation]. *Trudy SPIIRAN — SPIIRAS Proceedings*. 2014. vol. 33. pp. 117–146. (In Russ.).
9. Karpov A.A. [Automatic recognition of audio-visual russian speech by asynchronous model]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy — Information-measuring and operating systems*. M.: Radiotekhnika. 2010. vol. 7. no. 8. pp. 91–96. (In Russ.).
10. Ronzhin A.L., Yusupov R.M. [Multimodal interfaces for autonomous robotic systems]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki — Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2015. vol. 1(162). C. 195–206. (In Russ.).
11. Basov O.O. [Principles of construction of polymodal info-communication systems based on multimodal architectures of subscriber's terminals]. *Trudy SPIIRAS — SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 39. pp. 109–122. (In Russ.).
12. Kalinin V.N. [Morphological analysis of problems of the system researches theory]. *Trudy SPIIRAN — SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 1(24). pp. 89–107. (In Russ.).
13. Kalinin V.N. [The spacecraft as object of system researches]. *Trudy Voennokosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskogo — Proceedings of the Military-space academy named after A.F. Mozhajskiy*. 2014. vol. 640. pp. 80–89. (In Russ.).
14. Kalinin V.N. [On some optimal control problems of informational interaction of the spacecraft with the surface of the Earth]. *Trudy SPIIRAN — SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 4(41). pp. 34–56. (In Russ.).
15. Shatov S.V. [Calculation of amazing factors and their probable operative ranges at emission of the liquid phase asymmetrical dimethylhydrazine]. *Trudy Voennokosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskogo — Proceedings of the Military-space academy named after A.F. Mozhajskiy*. 2015. vol. 648. pp. 187–191. (In Russ.).
16. Motienko A.I., Makeev S.M., Basov O.O. [Analysis and Modeling of the Process of a Choice of Position for Transportation of the Sufferer on the basis of Bayesian Belief Networks]. *Trudy SPIIRAN — SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 6 (43). pp. 135–155. (In Russ.).
17. *Metodiki ocenki posledstvij avarij na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektah: sbornik dokumentov. 3-e izd., ispr. i dop.* [Evaluation Methods of Accident Consequences at Hazardous Industrial Units: A Source Book. 3rd ed., revised and enlarged]. M. M.:

- Nauchno-tehnicheskij centr issledovanij problem promyshlennoj bezopasnosti. 2010. Series 27. vol. 2. 208 p. (In Russ.).
18. Jensen F.V., Nielsen T.D. Bayesian networks and decision graphs. Berlin: Springer. 2007. 457 p.
 19. Perl J. Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference. NY etc. Morgan Kaufmann Publ. 1994. 552 p.
 20. Kurenkov V. I. *Metody issledovaniya jeffektivnosti raketno-kosmicheskikh sistem. Metodicheskie voprosy* [Methods for investigating the efficiency of rocket-space systems. Methodological issues]. Samara: Samar. gos. ajerokosm. un-t im. S. P. Koroleva (nac. issled. un-t). 2012. 201 p. (In Russ.).
 21. Petukhov G.B. *Osnovy teorii jeffektivnosti tselenapravlennykh protsessov. Ch.I. Metodologiya, metody, modeli* [Fundamentals of the theory of the effectiveness of targeted processes. Part 1. Methodology Methods, Models]. MO SSSR [Ministry of Defense of the USSR]. 1989. 665 p. (In Russ.).
 22. Popov A.P., Fedoruk V.S., Barinov M.F., Myasnikov D.V. *Osnovy modelirovaniya i ocenki jeffektivnosti dejstvij sil RSChS pri vedenii avarijno-spasatel'nyh i drugih neotlozhnyh rabot* [Fundamentals of modeling and evaluating the effectiveness of emergency prevention and response forces in the conduct of rescue and other emergency operations. Training manual]. Khimki: AHP of EMERCOM of Russia, 2014. 61 p. (In Russ.).

Мотиенко Анна Игоревна — научный сотрудник исследовательской группы информационных технологий в образовании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), преподаватель кафедры физики, математики и информатики, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (ГБОУ ВПО ПСПбГМУ им. И. П. Павлова Минздрава России). Область научных интересов: информационные технологии в образовании, информационные технологии в медицине, аварийно-спасательные роботы. Число научных публикаций — 8. anna.gunchenko@gmail.com; 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)328-03-82.

Motienko Anna Igorevna — researcher of research group of information technologies in education, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), teacher of physics, mathematics and informatics department, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University. Research interests: information technologies in education, information technologies in medicine, rescue robots. The number of publications — 8. anna.gunchenko@gmail.com; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328-03-82.

Тарасов Анатолий Геннадьевич — к-т техн. наук, докторант кафедры автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: автоматизация технологических процессов, контроль технического состояния автоматизированных систем подготовки и пуска, разработка учебно-тренировочных средств подготовки специалистов, робототехника. Число научных публикаций — 48. Atol-77@mail.ru; Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812) 347-95-26.

Tarasov Anatoly Gennadevich — Ph.D., doctoral student of automated systems preparation and launching of space rockets department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: automation of technological processes, control of technical condition of the automated systems of preparation and launch, development of training tools, robotics. The number of

publications — 48. Atol-77@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 347-95-26.

Дорожко Игорь Владимирович — к-т техн. наук, преподаватель кафедры автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА имени А.Ф. Можайского). Область научных интересов: техническая диагностика, надежность, автоматизированные системы управления, байесовские сети доверия, нейронные сети, нечеткая логика, контроль и диагностирование автоматизированных систем управления сложными техническими объектами. Число научных публикаций — 30. Doroghko-Igor@yandex.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812) 347-95-26.

Dorozhko Igor Vladimirovich — Ph.D., lecturer of automated systems preparation and launching of space rockets department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: control and diagnostics of automated control systems of complex technical objects. The number of publications — 30. Doroghko-Igor@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 347-95-26.

Басов Олег Олегович — к-т техн. наук, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: обработка и кодирование речевых и иконических сигналов, проектирование полимодальных инфокоммуникационных систем. Число научных публикаций — 165. oobasov@mail.ru; Приборостроительная, 35, Орел, 302034; р.т.: +7(4862)549533.

Basov Oleg Olegovich — Ph.D., researcher, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: processing and coding of speech and iconic signals, polymodal infocommunicational systems design. The number of publications — 165. oobasov@mail.ru; 35, Priborostroitelnaya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(4862)549533.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-08-00696-а).

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant 16-08-00696-а).

РЕФЕРАТ

Мотиенко А.И., Тарасов А.Г., Дорожко И.В., Басов О.О. **Проактивное управление робототехническими системами спасения пострадавших.**

Анализ основных тенденций развития робототехнических систем (РТС) показывает, что магистральным направлением является использование их в различных экстремальных ситуациях, что, в частности, относится к проведению аварийно-спасательных работ и ликвидации последствий аварий и катастроф. Применение РТС, оснащенных сенсорными элементами, вычислительными средствами, системами манипуляции и локомоции требует развития новых подходов к управлению данными системами. Перспективным для данного типа систем является реализация проактивного управления, включающего в себя применительно к организационно-техническим объектам как функции целеполагания, планирования, регулирования, так и функции учета и контроля, мониторинга и координации. Внедрение проактивного управления требует разработки комплекса моделей и методик, которые позволяют формировать управление с учетом прогнозирования дальнейшего развития сложившейся ситуации.

В работе предложен комплекс моделей, позволяющий реализовать проактивное управление в РТС спасения пострадавших. Рассмотренный комплекс моделей по результатам оценивания сложившейся обстановки и характеристик РТС спасения пострадавших позволяет сформировать оптимальное управление РТС (минимизируется время проведения работ) для обеспечения необходимых показателей эффективности спасения пострадавших.

SUMMARY

Motienko A.I., Tarasov A.G., Dorozhko I.V., Basov O.O. **Proactive Control of Robotic Systems for Rescue Operations.**

An analysis of the main trends in the development of robotic systems (RS) shows that the main trend is to use such systems in different extreme situations such as rescue works and liquidation of consequences of accidents and disasters. The use of RS, equipped with sensor elements, computing facilities, systems of manipulation and locomotion requires taking new approaches to such systems management. In this respect, implementation of proactive control appears to be a promising direction. However, it requires designing a complex of models and techniques that help carry out control based on forecasting of the further development of the situation.

In this paper, we propose a complex of models for transportation positions of the victim based on Bayesian networks, which will allow proactive control of RS for rescuing victims. This set of models enables one to carry out the optimal management of RS based on the results of evaluating the existing situation and characteristics of RS, which minimizes the time of rescuing process.