МЕТОД ПОШАГОВОЙ ВЕРИФИКАЦИИ РЕШЕНИЙ В СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

УДК 656.612

ШЕРСТЮК Владимир Григорьевич
к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных технологий
Херсонского национального технического университета.
Научные интересы: интеллектуальные системы принятия решений
реального времени, принятие решений на основе прецедентов, мультиагентные системы,
комбинированные логические системы представления знаний.
e-mail: v_sherstyuk@bigmir.net

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Управляемый оператором динамический объект (ДО) при взаимодействии с другими ДО на некотором ограниченном пространстве формирует открытую полиэргатическую сложную динамическую систему (СДС) [1]. В полиэргатических СДС знания операторов ДО о текущей ситуации, как правило, неполны и неточны, действия операторов взаимодействующих ДО непредсказуемы, а нормативные правила, регулирующие взаимодействие ДО, являются противоречивыми и недостаточно определенными. Кроме того, результаты применения запланированных управляющих воздействий (УВ) на исполнительные органы ДО не всегда приводят к требуемому результату вследствие стохастических воздействий внешней среды, а сами воздействия носят протяженный во времени и пространстве характер.

При наличии в СДС стесненных условий [2] и множественных ситуационных возмущений [3] складываются информационно сложные для оператора ситуации [4], обусловленные неполнотой и неточностью исходной информации, значительными объемами требуемых вычислений, а также серьезными ограничениями во времени, что существенно усложняет принятие оператором адекватных решений по управлению ДО в сложившейся ситуации, а в некоторых случаях приводит к инцидентам и авариям, которые принято классифицировать как «воздействие человеческого фактора» [5].

Снизить зависимость от «человеческого фактора» возможно путем автоматизации процесса принятия решений оператором ДО, используя методы искусственного интеллекта [6]. В [7] предложено с целью компенсации влияния «человеческого фактора» на процесс управления ДО в информационно-сложных ситуациях использовать интеллектуальную систему управления (ИСУ) ДО на основе сценарно-прецедентного подхода. Как показано в [8], ИСУ ДО должна: а) функционировать в реальном времени; б) автоматически генерировать уместные в сложившейся ситуации решения.

Сценарно-прецедентные ИС (СПИС) являются классом интеллектуальных систем автоматизированного вывода решений, основанным на принципах: а) повторяемости ситуаций; б) возможности использования ранее принятых решений в случае возникновения сходных проблемных ситуаций; в) представления решений в форме сценариев [9].

Решение, принятое ранее в контексте некоторой сходной (эталонной) ситуации, для использования в контексте вновь сложившейся ситуации необходимо вначале адаптировать к контексту сложившейся ситуации, а затем верифицировать. Процесс верификации сводится к оценке возможности решить проблему сложившейся ситуации с помощью отобранного и адаптированного решения [10].

Как показывает практика [11], в реальных прецедентных и сценарно-прецедентных ИС на фазах адаптации и верификации либо используются интерактивные методы, предполагающие непосредственное участие оператора, в то время как оператор и без того перегружен; либо в условиях реального времени цикл принятия решений сокращается, адаптация и верификация не выполняются.

Следовательно, синтез сценарно-прецедентных ИСУ ДО требует разработки автоматических методов отбора, адаптации и верификации решений, не требующих участия человека-оператора (ЛПР).

Задачей данной работы является анализ сценарно-прецедентной модели принятия решений по управлению ДО и разработка в ее рамках метода автоматической пошаговой верификации решений на многоагентной модели совместной активности в ИСУ ДО, работоспособного при жестких временных ограничениях (в реальном времени).

Целью данной работы является дальнейшее развитие теории СПИС и решение задач синтеза ИСУ ДО реального времени на основе сценарно-прецедентного подхода.

Задача верификации принятого решения. Сценарно-прецедентная ИСУ ДО, получая описание сложившейся (проблемной) ситуации s_I, отыскивает с использованием заданной функции подобия множество сходных эталонных (хранимых в памяти СПИС) ситуаций $\{e_S\}$, $e_i = \langle s_i, r_i \rangle$, для которых $s_i \cong s_I$, и определяет наиболее уместный прецедент $e_O \in \{e_S\}$, решение которого $r_O \in e_O$ становится опорным решением. На основании опорного решения r_O в процессе адаптации решения формируется адаптированное решение r_A, привязанное к контексту проблемной ситуации. Особенность СПИС при работе в полиэргатических СДС состоит в том, что r_A представляет собой некоторый план Π_A, включающий множество последовательно или параллельно выполняемых сценариев $\Pi_A \supset \{\Sigma_j\}$ управляющих воздействий, прикладываемых к исполнительным органам ДО для достижения некоторой цели G.

Верификация адаптированного плана Π_A является проверкой возможности успешно решить возникшую проблемную ситуацию s_I с помощью r_A.

Верификация производится автоматически на модели СДС Ξ:

$$\left(r.e_A = \tilde{r}.e_I\right) \overset{\Xi}{\rightarrowtail} \left(r.e_R = \overline{r}.e_I\right). \qquad (1)$$

Задача верификации решения r_A предполагает получение ответа на вопрос:

- достигается ли поставленная цель G выполнением плана $\Pi_A \in r_A$;
- удовлетворяются ли в процессе выполнения Π_A ограничения $R \in \mathbf{R}$;
- является ли план Π_A оптимальным в смысле критерия $Q \in \mathbf{Q}$.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДО В ПОЛИЭРГАТИЧЕСКИХ СДС

Пусть задано время T. Введем шкалу времени, задав отношение частичного порядка $<_T$ и начальное значение времени t_0. Пусть также известно множество Y некоторой природы, и на этом множестве задана алгебра σ_Y.

Зададим пространство состояний C. Введем абстрактную норму и зададим соответствующую ей метрику. Для решения задачи управления ДО достаточным является линейное нормированное равномерное (Чебышевское) пространство C с нормой [12]:

$$\|y\|_c = \min_{t \in [0,T)} \left(y(t)\right), \qquad (2)$$

Рассмотрим множество сложных эргатических ДО $\mathbf{A} = \{A_0, A_1, \dots A_n\}$, таких что:

- каждый из ДО A_i выполняет некоторую активность на пространстве C, связанную с достижением заданной цели $G_i \in C$;
- в процессе совместной активности некоторое подмножество ДО $\mathbf{A}^{\Xi} = \{A_0, A_l, \dots A_m\}$ взаимодействует, образуя полиэргатическую СДС Ξ;
- состав СДС Ξ динамически изменяется;
- существует оперирующий ДО A_0, с позиций кото-

рого рассматривается задача управления. Известно, что $\forall t \in T \;\; A_0 \in \mathbf{A}^{\Xi}$;

- цель G_i ДО A_i в общем случае неизвестна ни одному из $A_j, j \neq i$;
- всякая цель G_i имеет количественное и/или качественное описание (в пространстве C);
- активность ДО A_i является выполнением заданной ЛПР программы (плана) Π_i, представляющей собой некоторую последовательность операций управления $[\lambda_1, \ldots \lambda_k]$, приближающих ДО A_i к цели G_i.

Определение 1 *Управлением* в СДС Ξ называется функция эргатической ИСУ ДО $A_0 \in \mathbf{A}^{\Xi}$, обеспечивающая реализацию заданных целей G_0 с помощью планов Π_0 [13].

Пусть для достижения некоторой цели G необходимо выполнить в пространстве C множество поисковых операций (итераций или рекурсий) $\{\lambda_1, \ldots \lambda_k\}$, что обусловлено структурной и параметрической нестационарностью, неполнотой и неточностью исходных данных, ограниченной наблюдаемостью состояний СДС Ξ и т.д.

Пусть всякая *итеративная операция* осуществляет приближение к цели G одним из заданных методов $\mathrm{M}_q \in \mathbf{M}$, а всякая *рекурсивная операция* последовательно отбирает лучший в некотором смысле метод $\mathrm{M}^* \in \mathbf{M}_G$ из подмножества $\mathbf{M}_G \in \mathbf{M}$ подходящих методов для достижения G [14].

Степень достижения цели G будем характеризовать *вектором критериев* $\mathbf{Q}$, где каждый *критерий* $Q_i \in \mathbf{Q}$ представляет собой шкалу для оценки *близости* к цели. Для каждого $Q_i \in \mathbf{Q}$ построим процедуру γ_i, позволяющую всякому решению $y \in Y$ поставить в соответствие значение целевой функции Q_i:

$$\|y\|_c = \gamma_i(y), \tag{3}$$

Пусть на каждом шаге $j = 1..k$ выполнения последовательности операций управления $[\lambda_1, \ldots \lambda_k]$ ДО A_i переходит из состояния $x_j \in C$ в состояние $x_{j+1} \in C$. Введем показатель расстояния δ до цели G в некотором состоянии $x \in C$:

$$\delta = \|x - G\|. \tag{4}$$

Пусть на каждом шаге процедуры поиска решения проблемы существует подмножество $\mathbf{M}_G \in \mathbf{M}$ подходящих методов. Тогда на шаге j при $z = |M_q|$ для каждого из методов $\mathrm{M}_q \in \mathbf{M}$, можно оценить расстояние δ_q^{j+1}, что дает возможность выбрать «наилучший» для данного шага метод:

$$q^* = \arg \; \min(\delta_1, \delta_2, \ldots \delta_z), \tag{5}$$

т.е. тот метод M_{q^*}, который ближе всего приводит к цели G.

Введем вектор ограничений $\mathbf{R}$, включающий ограничения $R_i \in \mathbf{R}$, составляющие обратные связи по управлению через внешнюю среду W. Для каждого ограничения $R_j \in \mathbf{R}$ построим процедуру ζ_j, позволяющую некоторому состоянию $x \in C$ поставить в соответствие значение R_j:

$$\|y\|_c = \zeta_j(x), \tag{6}$$

Определение 2 Задача удовлетворения ограничений (ЗУО) $\mathbb{R}$ есть $\mathbb{R} = (x, y, \mathbf{R})$.

Определение 3 Задача удовлетворения ограничений $\mathbb{R}$ называется *согласованной*, если все имеющиеся ограничения $R_j \in \mathbf{R}$ не противоречат друг другу.

Определение 4 Задача удовлетворения ограничений называется *выполненной* для $y \in \mathbb{R}$, если:

а) ЗУО является согласованной;

б) $\forall x \in \mathbb{R} \;\; \zeta_j(x) \notin \mathbf{R}$.

Определение 5 *Обобщенная проблема управления* ДО $\mathbb{F}$ в полиэргатической СДС Ξ, связанная с достижением цели G, есть процедура:

$$\Omega_{G|\mathbb{R}} x \to y, \tag{7}$$

где $x \in C$ – исходное множество данных и знаний;

$y \in Y$ – решение;

$\Omega_{G|\mathbb{R}}$ – процедура (план, программа, алгоритм) получения решения $y \in Y$, позволяющего достичь цели G или максимально приблизиться к ней при выполнении заданного вектора ограничений $\mathbf{R}$.

Для *описания проблемы* $\mathbb{F}$ необходимо задать:

а) цель управления G;

б) вектор критериев $\mathbf{Q}$ и вектор ограничений $\mathbf{R}$;

в) библиотеку методов $\mathbf{M}$;

г) метрику с нормой $\|y\|$ при известном начальном состоянии $x_0 \in C$.

Методы могут быть формализованными, интеллектуальными и эвристическими [15].

Решение проблемы управления ДО в полиэргатических СДС формализованными (регулярными) методами невозможно как по причине отсутствия адекватных математических моделей и присутствия стохастических воздействий внешней среды, так и по причине отсутствия строгих методов решения проблем управления на основе вектора критериев и ограничений $\mathbf{Q} \cup \mathbf{R}$.

Для интеллектуальных методов (систем правил и моделей) наблюдается экспоненциальный рост пространства возможных состояний $x \in C$ в процессе поиска решения $y \in Y$, что недопустимо в условиях реального времени. Таким образом, целесообразно использовать эвристические методы, инвариантные к неопределенности в постановке проблемы $\mathbb{F}$.

Для *решения проблемы* $\mathbb{F}$ необходимо:

а) синтезировать процедуру Ω, для чего могут быть использованы методы $\mathrm{M} \in \mathbf{M}$;

б) выполнить ЗУО $\mathbb{R}$ для $(x, y) \in \mathbb{F}$.

Для обеспечения конечности процесса поиска решения проблемы $\mathbb{F}$ процедурой Ω требуется установить критерий остановки процедуры.

<u>Определение 6</u> *Близкой ε-окрестностью G* называется малое положительное число ε, определяющее на пространстве C вокруг точки G окружность радиуса ε.

<u>Определение 7</u> *Критерием достижения цели G* на шаге l, останавливающим процедуру Ω, является ее близкая ε-окрестность:

$$\delta = \|x_l - G\| \le \varepsilon . \tag{8}$$

<u>Определение 8</u> *Критерий приближения к цели* есть производная расстояния $\dot{\delta}$: если $\dot{\delta} < 0$, движемся к цели, если $\dot{\delta} > 0$ – движемся от цели, если $\dot{\delta} = 0$ – движемся вокруг цели.

<u>Определение 9</u> Проблема $\mathbb{F}$ является *разрешимой*, если существует процедура $\Omega_{G|\mathbb{R}}$, которая с помощью методов из множества $\mathbf{M}$ за конечное число шагов k приводит к близкой ε-окрестности G. В противном случае проблема $\mathbb{F}$ *неразрешима*.

Неразрешимость $\mathbb{F}$ означает недостижимость G на основании имеющейся у процедуры $\Omega_{G|\mathbb{R}}$ информации. Если на каком-либо шаге процедура $\Omega_{G|\mathbb{R}}$ не приводит к нахождению решения y, может быть выполнена подстановка квазирешения $\tilde{y}$, наиболее близко ведущего к G (*регуляризация* $\Omega_{G|\mathbb{R}}$), смена метрики, варьирование параметрами процедуры $\Omega_{G|\mathbb{R}}$, смена выполняемого метода $\mathrm{M} \in \mathbf{M}$ и т.д.

<u>Определение 10</u> Процедура $\Omega_{G|\mathbb{R}}$ *корректна* (по Адамару), если для любого состояния $x \in C$ она гарантированно находит устойчивое и единственное решение $y \in Y$.

Особенности полиэргатических СДС приводят к тому, что корректную процедуру $\Omega_{G|\mathbb{R}}$ синтезировать формальными методами невозможно, а для решения проблемы $\mathbb{F}$ требуется использовать эвристические процедуры $\Omega'_{G|\mathbb{R}}$, для которых существование решения, а тем более его единственность, недоказуемы. Для обеспечения эффективного управления ДО необходимо обладать достаточно полными (*компетентными*) библиотеками метрик, функций, методов и эвристик [15].

СПИС использует для поиска процедуры $\Omega'_{G|\mathbb{R}}$, решающей $\mathbb{F}$, эвристику «в сходных ситуациях используют сходные решения». Модели и методы сценарно-прецедентного принятия решений в динамических предметных областях представлены в [16]. Процесс верификации решений в СПИС предполагает в первую очередь решение задачи удовлетворения ограничений и оптимизационной задачи.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ

Одной из наиболее серьезных проблем сценарно-прецедентного подхода к принятию решений в проблемных ситуациях является проблема формирования параметров исполнительных органов для управляющих воздействий в принятом к исполнению сценарии Σ_0, проиллюстрированная на рис. 1.

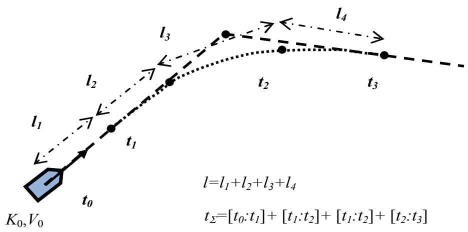
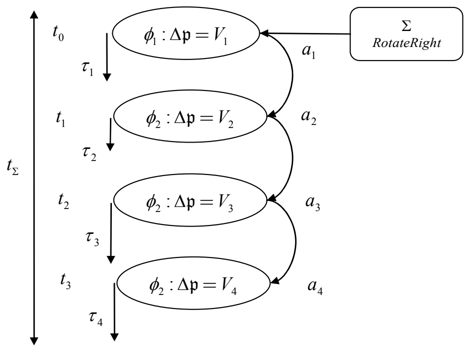


Рисунок 1 – Схема выполнения маневра поворота ДО вправо

Параметры исполнительных органов и моменты приложения управляющих воздействий необходимо соотносить с текущими значениями параметров ДО и внешней среды (рис. 2), обеспечивая согласование с системой ограничений $\mathbf{R}$, задающей пределы изменения параметров при возмущениях различной интенсивности и направленности, а также при различных значениях технических параметров самого ДО.



$$\Sigma = \left\langle 4,\ldots,\ldots,\{V_1,V_2,V_3,V_4\},\{(t_0,a_1),(t_1,a_2),(t_2,a_3),(t_3,a_4)\},t_\Sigma,\ldots\right\rangle$$

Рисунок 2 – Сценарий реализации маневра поворота ДО вправо

Например, выполнение элементарного маневра поворота морского ДО (рис. 1) само по себе несложно, и допускает широкий диапазон значений угла перекладки руля. Однако, при сильном волновом воздействии диапазон возможных значений параметра сокращается. Наличие сильного ветрового воздействия дополнительно сокращает пределы выбора значений, а при некотором критическом превышении значений крена или дифферента ДО выполнение маневра может быть запрещено.

На рис. 3 представлены ограничения, накладываемые на выполнение сценария маневра поворота ДО вправо (рис. 1).

$$t_\Sigma = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$$

$$V_{14} = f(V_{16}, V_{17}) \qquad V_{24} = f(V_{22}, V_{23})$$

$$V_{15} = f(V_{18}, V_{19}) \qquad V_{31} = f(V_{18}, V_{19}, V_{23})$$

$$V_2 = f(V_{14}, V_{15}, V_{24}, V_{31})$$

$$\ldots$$

Рисунок 3 – Ограничения на выполнение сценария выполнения маневра поворота ДО вправо

Решение проблемы формирования параметров сценариев лежит в использовании для верификации решений методов удовлетворения ограничений (*Constraint Satisfaction Problem*, CSP), которые, однако, относятся к классу *NP*-трудных и могут требовать перебора экспоненциального числа решений [17].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ

Пусть задан универсум X .

Введем, основываясь на [18], правдоподобное расширение универсума X .

Определение 11 *Правдоподобным расширением* универсума X называется любая конечная система ${}^*X$ его подмножеств, содержащая $\varnothing$, X и замкнутая относительно пересечения множеств.

Элементы множества ${}^*X$ назовем *правдоподобными значениями*, а элементы ${}^*X^n$ – *векторами правдоподобных значений*.

Рассмотрим множество всех вещественных чисел ${}^*\mathbb{R}$. Элемент $x \in {}^*\mathbb{R}$ в рамках принятой в СПИС модели правдоподобия ℓ может представлять собой:

– интервал $\left[\min(x), \max(x)\right]$ (недоопределенное значение);

– α -срез $(\mu(x), \alpha)$ (нечеткое значение);

– область $[\underline{x}, \overline{x}]$ (приближенное значение);

– четкое значение x ;

– вектор соответствующих значений $\boldsymbol{x} = (x_1, \ldots x_n)$.

Определение 12 Для данного множества переменных $V = \{x_1, x_2, \ldots x_m\}$ и их областей значений $D_1, \ldots, D_m$ *отношением* $\mathrm{þ}$ на множестве переменных

$V \in X$ называется любое подмножество декартова произведения их областей значений.

<u>Определение 13</u> Множество переменных, на котором определено отношение þ, называется *диапазоном отношения* $\operatorname{scope}(\text{þ}) = V$.

<u>Определение 14</u> *Областью определения* (доменом) $dom(x_j)$ переменной x_j в ${}^*X$ называется вектор $\boldsymbol{x} = \left(x_{j_1}, \ldots x_{j_n}\right) \in {}^*\mathbb{R}$.

<u>Определение 15</u> *Ограничением* $R \in \mathbf{R}$ называется пара $R = (\text{þ}, \pi_R)$, где $\text{þ} \subseteq {}^*X^m$ – произвольное m-арное отношение на ${}^*X$, а $\pi_R : {}^*X^n \to {}^*X^m$ – функция, проецирующая вектор $\boldsymbol{x} = (x_1, \ldots x_n) \in {}^*\mathbb{R}$ на некоторые его m компонент, так что $\pi_R(\boldsymbol{x}) = \left(x_{i_1}, \ldots x_{i_m}\right)$ для некоторых $i_1, \ldots i_m \in \{1, \ldots, n\}$.

<u>Определение 16</u> *Задача удовлетворения ограничений* (ЗУО) $\mathbb{R}$ на множестве переменных $V = \{x_1, x_2, \ldots x_m\}$, для каждой из которых задана область определения $dom(x_j)$, определяется конечным набором ограничений $\mathbf{R} = \cup_{m=1}^{M} R_m$ как $\mathbb{R} = (V, X, \mathbf{R}, \text{þ})$.

Обозначим как $\arg R$ множество индексов $\{i_1, \ldots i_m\}$, на которые функция π_R выполняет проецирование. Если переменные задачи обозначить $\{x_1, x_2, \ldots x_n\}$, ограничение $R = (\text{þ}, \pi_R) \in \mathbf{R}$ можно записать как $\text{þ}\left(\boldsymbol{x}_{i_1}, \ldots, \boldsymbol{x}_{i_m}\right)$.

Пусть $\pi_R(x_1, x_2, \ldots x_n) = \left(x_{i_1}, \ldots, x_{i_m}\right)$, а $\text{þ}\left(\boldsymbol{x}_{i_1}, \ldots, \boldsymbol{x}_{i_m}\right) = (\boldsymbol{y}_1, \ldots \boldsymbol{y}_m)$. Тогда

$$\text{þ}(\boldsymbol{x}_1, \ldots, \boldsymbol{x}_n) = (\boldsymbol{z}_1, \ldots \boldsymbol{z}_m), \tag{9}$$

где

$$\boldsymbol{z}_i = \begin{cases} \cap_{j: i_j = i} \boldsymbol{y}_j \,\middle|\, i \in \arg R \\ \boldsymbol{x}_j \,\middle|\, i \notin \arg R \end{cases}. \tag{10}$$

<u>Определение 17</u> *Множество решений* $\mathfrak{W}(\mathbb{R})$ задачи удовлетворения ограничений на ${}^*X$ определяется как

$$\mathfrak{W}(\mathbb{R}) = \left\{\boldsymbol{x} \in {}^*X^n \,\middle|\, (\forall R \in \mathbf{R}) \ \pi_R(\boldsymbol{x}) \in \text{þ}\right\}. \tag{11}$$

Пример фрагмента дерева зависимости переменных в сценарии выполнения маневра поворота ДО вправо представлен на рис. 4.

Целью решения ЗУО может являться нахождение одного или нескольких (всех) решений [19].

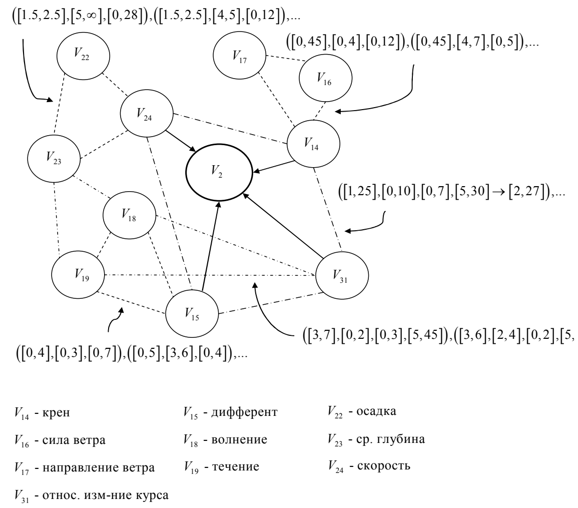


Рисунок 4 – Фрагмент дерева зависимости переменных

ДИНАМИЧЕСКОЕ УДОВЛЕТВОРЕНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ

Поскольку в процессе выполнения сценария Σ_0 параметры внешней среды и параметры ДО, для которых уже получено некоторое решение ЗУО, могут изменяться, соответственно и вектор $\mathbf{R}$ претерпевает изменения, всякий раз требуя заново решать ЗУО. Решение ЗУО при значительной динамике внешней среды составляет задачу динамического удовлетворения ограничений (ЗДУО, *Dynamic CSP*) [20], при этом ЗДУО рассматривалась как последовательность ЗУО, каждая из которых является следствием введения новых ограничений или отказа от существующих.

<u>Определение 18</u> *Задача динамического удовлетворения ограничений* $\mathbb{R}^*$ есть последовательность ЗУО $\mathbb{R}^* = \left[\mathbb{R}_{(0)}, \ldots \mathbb{R}_{(i)}, \ldots \mathbb{R}_{(n)}, \ldots\right)$ в моменты времени $t_0, \ldots t_i, \ldots t_n, \ldots$, каждая из которых связана с изменением предыдущей ЗУО в результате воздействий внешней среды.

<u>Определение 19</u> Ограничение R, такое, что $R \in \mathbf{R}_{(t)}$, называется *активным* в момент времени t ограничением.

Множество активных ограничений в последующие моменты времени может изменяться в результате известных из [21] операций *установления* и *снятия* ограничений, при этом предполагается $\mathbb{R}_{(0)} = (V, X, \varnothing, \text{þ})$. В случае, если ограничения заданы на модели правдоподобия ℓ, возможны также операции *смягчения* (расширения интервала значений) и *ужесточения* (сокращения интервала) ограничений.

Т.о., если $\mathbb{R}_{(i)} = \left(V, X, \mathbf{R}_{(i)}, \text{þ}\right)$, то $\mathbb{R}_{(i+1)} = \left(V, X, \mathbf{R}_{(i+1)}, \text{þ}\right)$, причем

$$\mathbf{R}_{(i+1)} = \left(\mathbf{R}_{(i)} \circ \mathrm{R}_{\ell}\right) \pm \mathrm{R}_{\Delta}, \qquad (12)$$

где R_{Δ} – изменения вектора $\mathbf{R}$, связанные с установлением (+) и снятием (-) ограничений;

R_{ℓ} – изменения вектора $\mathbf{R}$, связанные со смягчением или ужесточением активных ограничений.

ПОСТАНОВКА ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Решение ЗУО для t является множеством векторов $\left\{\boldsymbol{x}_t^j \in {}^*X^n\right\}$, каждый из которых в момент t удовлетворяет вектору заданных ограничений $\mathbf{R}_{(t)}$.

Задав на ${}^*X$ линейный порядок $\leq_{{}^*X}$, можно определить на $\left\{\boldsymbol{x}_t^j \in {}^*X^n\right\}$ *оптимизационную задачу* (ОЗ) $\mathbb{Q}$ для $Q \in \mathbf{Q}$, имеющую следующие особенности:

- пространство поиска оптимального решения ограничено множеством решений ЗУО $\mathfrak{W}(\mathbb{R})$;
- поиск решения ОЗ производится не по целевой функции, а по целевой переменной x_Q, соответствующей выбранному целевому критерию $Q^{\circ} \in \mathbf{Q}$;
- поскольку ЗУО решается как динамическая, ОЗ также должна решаться динамически, т.к. всякое изменение множества решений $\mathfrak{W}(\mathbb{R})$ требует повторного решения ОЗ;
- точность решения ОЗ (также и ЗУО) существенно зависит от точности исходной информации.

<u>Определение 20</u> Решение $\hat{\boldsymbol{x}}_{(t)} = \left(\hat{x}_{1(t)}, \ldots \hat{x}_{n(t)}\right) \in {}^*\mathbb{R}$ называется *субоптимальным* (на момент t), если для любого $\boldsymbol{x}_{i(t)} = \left(x_{1_i}, \ldots x_{n_i}\right) \in \mathfrak{W}_t(\mathbb{R})$ выполняется $\hat{x}_{Q(t)} \leq x_{Q_i(t)}$ ($\hat{x}_{Q(t)} = \arg\ \min\left(x_{Q_1(t)}, x_{Q_2(t)}, \ldots x_{Q_i(t)}\right)$).

<u>Определение 21</u> Решение $\hat{\boldsymbol{x}} = \left(\hat{x}_1, \ldots \hat{x}_n\right) \in {}^*\mathbb{R}$ называется *оптимальным* для сценария Σ по критерию $Q \in \mathbf{Q}$, если и только если на всем временном интервале выполнения сценария $[t_0, t_\Sigma]$ для любого $\boldsymbol{x}_i = \left(x_{1_i}, \ldots x_{n_i}\right) \in \mathfrak{W}(\mathbb{R})$ выполняется $\hat{x}_Q \leq x_{Q_i}$ ($\hat{x}_Q = \arg\ \min\left(x_{Q_1}, x_{Q_2}, \ldots x_{Q_i}\right)$).

Для решения ОЗ необходимо:

а) осуществить выбор целевого критерия $Q^{\circ} \in \mathbf{Q}$;

б) установить для данного целевого критерия связанную целевую переменную x_Q;

в) решить ЗУО и получить множество ее решений $\mathfrak{W}(\mathbb{R})$;

г) найти такое решение ЗУО, которое удовлетворяло бы опред. 20.

ЗДУО может быть решена с использованием алгоритма установления локальной совместности сети ограничений [22] при условии его обобщения на правдоподобные расширения ${}^*\mathbb{R}$ и инкрементного формирования множества ограничений $\mathbf{R}_{(t)}$. Данный алгоритм имеет полиномиальную оценку вычислительной сложности и является последовательно гарантирующим (на любом шаге $\boldsymbol{x}^{(k)} \subseteq \mathfrak{W}(\mathbb{R})$).

Для решения ОЗ может быть использован метод ветвей и границ [18]. Данный алгоритм не является полным и имеет экспоненциальную оценку сложности по числу переменных n, однако, для использования в ИСУ ДО существенно, что он также является последовательно гарантирующим, т.е. в любой момент может быть прерван (из-за недостатка времени на продолжение), при этом будет существовать решение, соответствующее верхней оценке целевой переменной.

Для повышения эффективности алгоритмов решения ЗДУО и ОЗ может быть использована следующая эвристика: множество переменных $V = \{x_1, x_2, \ldots x_m\}$ ранжируется по числу вхождений в максимальное число ограничений и по относительной ширине интервала ($(\overline{x} - \underline{x})/(\overline{x} + \underline{x})$), при этом вначале обрабатываются переменные, наиболее ограничивающие решение в количественном смысле (по числу вхождений в ограничения), а затем – в качественном смысле (сужающие решение интервалом значений).

Дальнейший ход процесса верификации решений связан с моделью совместной активности ДО.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ СДС

Используем для построения модели совместной активности множества ДО *парадигму многоагентного моделирования* [23]. Многоагентная модель представляет СДС в виде множества отдельно специфицируемых активных подсистем, называемых агентами. Каждый из агентов взаимодействует с другими агентами, образующими для него внешнюю среду, и в процессе функционирования может изменять как внешнюю среду, так и свое поведение.

Множество агентов образует многоагентную систему (МАС), являющуюся моделью СДС [24].

Построение многоагентной модели полиэргатической СДС Ξ, образованной совместной активностью множества ДО $\mathbf{A}$ на ограниченном пространстве H под воздействием внешней среды W, будем производить в соответствии с подходом, представленным в [25, 26]. Модель СДС Ξ основывается на *принципе замещения* каждого из ДО множества $\mathbf{A}$ его моделью – интеллектуальным агентом (ИА), действующим *автономно* и *асинхронно* относительно остальных ИА.

Модель совместной активности (МСА) M_{JM} включает множество моделей наблюдаемых ДО M_i, модель пространства M_H и модель нормативного регулятора активности (НРА) M_N на пространстве H (рис. 5):

$$M_{JM} = \left\{ M_H, M_N, \bigcup_{i=1}^{n} M_i \right\}. \qquad (13)$$

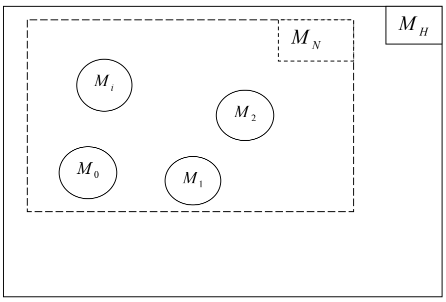


Рисунок 5 – Структура модели СДС

Модель НРА M_N отражает заданные для рассматриваемого класса ДО и заданного пространства H предписанные правила выполнения действий ЛПР в стандартных ситуациях и может быть логической моделью. Модель контролируемого пространства M_H также может быть логической моделью.

Выделим *оперирующий* ДО $A_0 \in \mathbf{A}$, с позиций которого рассматриваются процессы, проистекающие в СДС Ξ, и окружающие ДО $A_i \in \mathbf{A},\ i = \overline{1..n}$.

Согласно *принципу распределенного управления*, каждый ДО A_i, отрабатывая собственную стратегию действий по плану Π_i, изменяет состояние СДС Ξ, выполняя те или иные УВ. Совместный поиск каждым ДО A_i из множества $\mathbf{A}$, находящимся на контролируемом пространстве, способов и путей достижения своих целей G_i, приводит к их *взаимодействию*.

Т.о., МСА является моделью взаимодействия, а замещающей моделью ДО может служить ИА.

Динамическая модель *i*-го ДО является моделью *планирующего* логико-когнитивного ИА [27], и может быть представлена следующим образом (рис. 6):

$$M_i(t) = \left\langle \begin{matrix} \nu_j, CLS_i, EM_i(t,\nu_j), NM_i(t,\theta_j), MM_i^z(t,CLS_i), \\ G_i(t), \Pi_i(t), IS_i(t), SOL_i(t), CTL_i \end{matrix} \right\rangle, \qquad (14)$$

где $EM_i(t,h_j)$ – модель окружения (подпространства $h_j \in H$) ДО A_i в момент времени t;

$NM_i(t,h_j)$ – модель НРА на подпространстве $h_j \in H$ для ДО A_i в момент времени t;

$MM_i^z(t,CLS_i)$ – модель активности ДО A_i класса CLS_i с уровнем точности z на момент t;

$G_i(t)$ – цель активности ДО A_i на момент времени t;

$\Pi_i(t)$ – план активности, выполняемый ДО A_i в момент времени t;

$IS_i(t)$ – информационная структура ИА в момент времени t;

$SOL_i(t)$ – решатель ИА, используемый в момент времени t;

CTL_i – управляющий модуль ИА;

CLS_i – присвоенный ДО A_i *класс* согласно предопределенной классификации K [28].

Информационная структура ИА состоит из следующих элементов:

$$IS_i = \left\langle DB_i, KB_i, \left\langle MM_i^z \right\rangle, \mathbf{G}_i, \mathbf{\Pi}_i, \mathfrak{U}_i \right\rangle, \qquad (15)$$

где $\left\langle MM_i^z \right\rangle$ – библиотека моделей активности ДО A_i с различными уровнями точности z;

$\mathbf{G}_i$ – библиотека целей ДО A_i;

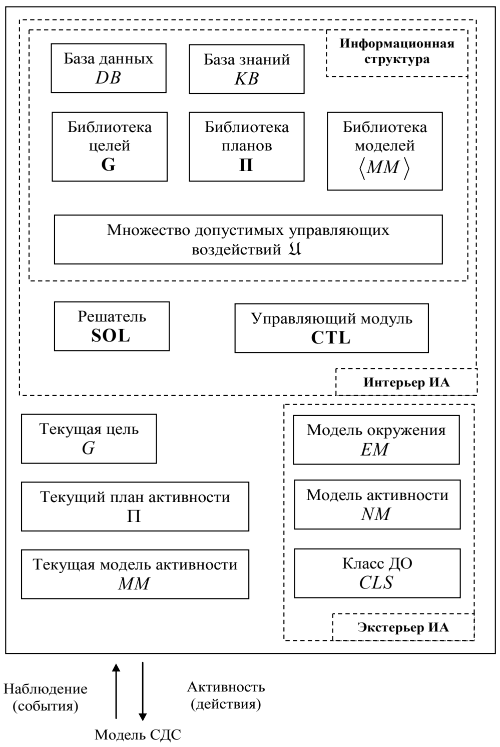


Рисунок 6 – Структура модели СДС

$\mathbf{\Pi}_i$ – библиотека планов и сценариев для ДО A_i;

$\mathfrak{U}_i$ – множество допустимых управляющих воздействий для ДО A_i;

KB_i – база знаний ИА, доступная для использования текущим решателем SOL_i;

DB_i – база данных ИА.

Структура МАС для построения МСА ДО может быть представлена следующим образом:

$$MAS = \left\langle \Phi, K, \mathfrak{d}, \left\langle NM \right\rangle, \mathbf{Q}, \mathbf{R} \right\rangle, \qquad (16)$$

где Φ – структура МАС, $\Phi_l = \{A_1, A_2, ..., A_m\}$;

K – система классификации, заданная в СДС Ξ;

$\mathfrak{d}$ – функция диагностирования состояния СДС Ξ;

$\left\langle NM \right\rangle$ – библиотека моделей НРА в СДС Ξ;

$\mathbf{Q}$ – система критериев управления ДО в СДС Ξ;

$\mathbf{R}$ – система ограничений на процесс управления ДО в СДС Ξ.

МЕТОД ПОШАГОВОЙ ВЕРИФИКАЦИИ РЕШЕНИЙ

Будем основываться на том, что:

1) для каждого из ДО построена модель в виде ИА A_i;

2) существует модель совместной активности ДО в виде МАС;

3) задана классификация K ДО в СДС Ξ;

4) для каждого ограничения $R_k \in \mathbf{R}$ задана процедура ζ_k:

$$\zeta_k : X_i^{t_j} \to \mathbb{R}, \qquad (17)$$

позволяющая выполнить проверку ограничения:

$$\zeta_k \left(X_i^{t_j} \right) < R_k. \qquad (18)$$

5) для каждого критерия $Q_l \in \mathbf{Q}$ построена процедура γ_l, позволяющая определить значение целевой функции Q_l:

$$\gamma_l : \left\| X_i^{t_j} \right\|_C \to \mathbb{R}. \qquad (19)$$

6) задана цель G_0 ДО A_0;

7) задан критерий достижения цели $\delta = \left\| x_l - G \right\| \le \varepsilon$;

8) построен план Π_0 достижения цели G_0;

9) распознаны планы Π_i для всех взаимодействующих ДО A_i, $i \ne 0$.

10) Сопоставим каждому из ИА A_i (т.е. моделям взаимодействующих ДО) соответствующую информационную структуру (рис. 7):

$$\begin{gathered} \left\langle LCM \right\rangle \to LCM_i;\ \left\langle MM_i^z \right\rangle \to MM_i^z; \\ \mathbf{G} \to G_i^*;\ G \to G_0;\ \mathbf{\Pi} \to \Pi_i^*; \\ \Pi_A \to \Pi_0; \\ \bar{X}_{A_i} \to X_{A_i};\ \mathfrak{U} \to \mathfrak{U}_i. \end{gathered} \qquad (20)$$

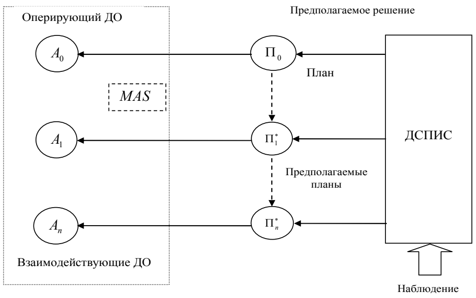


Рисунок 7 – Инициализация модели СДС

Выполнение операции сопоставления инициализирует МАС.

Используя заданные системы критериев $\mathbf{Q}$ и ограничений $\mathbf{R}$, на основе выбранной модели НРА NM и классификации K зададим структуру МАС Φ.

Построим шкалу ускоренного модельного времени $T_{\triangleright} = \left\langle [t, \infty), >_T \right\rangle$.

Зададим шаг модельного времени Δt, тогда на заданной шкале $t_{j+1} = t_j + \Delta t$.

Продвигая модельное время вдоль $T_{\triangleright}$, будем выполнять $\forall A_i \; do\left(\Pi_i \mid t_j\right)$. Соответственно, для каждого момента времени t_j

$$\eth\left(t_j\right) = \mathcal{C}_{\Xi}^{t_j}. \tag{21}$$

Основываясь на предполагаемом состоянии $\mathcal{C}_{\Xi}^{t_j}$ СДС Ξ в момент времени t_j, и зная Π_i, можно для каждого A_i определить его предполагаемое состояние $\widehat{\mathcal{C}}_i^{t_j}$, а значит, получить предполагаемые оценки его параметров $\widehat{X}_{A_i}$ на момент t_j.

Пошагово двигаясь от момента t приращением модельного времени Δt, и получая оценку параметров каждого ДО A_i в каждой очередной момент модельного времени, можно построить предполагаемую фазовую траекторию системы $\mathbf{\Phi}_{\Xi}^{*}$ в пространстве H (рис. 8).

Для оперирующего ДО A_0 на каждом шаге модельного времени решаются ЗДУО $\mathbb{R}^*$ и ОЗ $\mathbb{Q}$, выполняется вычисление функций:

$$\widehat{R}_k\left(t_j\right) = \zeta_k\left(\widehat{X}_i^{t_j}\right), \qquad \widehat{Q}_l\left(t_j\right) = \gamma_l\left(\widehat{X}_i^{t_j}\right). \tag{22}$$

<u>Определение 22</u> Решение r_A называется *допустимым*, если и только если существует такой момент модельного времени $t_e = t + n \cdot \Delta t$, что $\delta\left(t_e\right) < \varepsilon$.

<u>Определение 23</u> Решение r_A называется *вполне допустимым*, если r_A является допустимым и $\forall t_j \mid t \le t_j \le t_e$ выполняется $\forall k \;\; \widehat{R}_k\left(t_j\right) < R_k$.

<u>Определение 24</u> Решение r_A называется *оптимальным* в смысле критерия $Q_l \in \mathbf{Q}$, если r_A является вполне допустимым и $\exists \gamma \mid \widehat{Q}_l = \arg \;\; \max\left(\gamma_l^*(t), \ldots \gamma_l^*\left(t_e\right)\right)$.

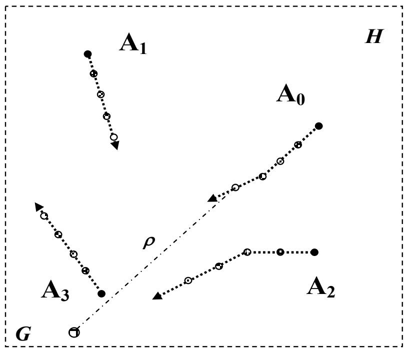


Рисунок 8 – Построение фазовой траектории системы $\mathbf{\Phi}_{\Xi}^{*}$

<u>Определение 25</u> Решение r_A называется *субоптимальным* в смысле критерия $Q_l \in \mathbf{Q}$, если r_A является вполне допустимым, $\exists t_j, t_m \mid t \le t_j \le t_m \le t_e$, такие что $\exists \gamma \mid \widehat{Q}_l = \arg \;\; \max\left(\gamma_l^*\left(t_j\right), \ldots \gamma_l^*\left(t_m\right)\right)$.

Пусть $\mathcal{V} = \left\{\mathcal{V}_0, \mathcal{V}_1, \mathcal{V}_2, \mathcal{V}_3, \mathcal{V}_4\right\}$, $\mathcal{V}_1 \sqsubseteq \mathcal{V}_2 \sqsubseteq \mathcal{V}_3 \sqsubseteq \mathcal{V}_4$, причем

$$\mathcal{V}_0 = \textit{недопустимый}; \;\; \mathcal{V}_1 = \textit{допустимый};$$
$$\mathcal{V}_2 = \textit{вполне допустимый};$$
$$\mathcal{V}_3 = \textit{субоптимальный}; \;\; \mathcal{V}_4 = \textit{оптимальный}.$$

Тогда процедура верификации $\vartheta : r_A \to \mathcal{V}$, соответствующая вышеописанному методу пошаговой верификации, возвращает для каждого адаптированного решения r_A его оценку $\mathcal{V}\left(r_A\right)$.

<u>Определение 26</u> Для всех r_A, таких что $\mathcal{V}\left(r_A\right) > \mathcal{V}_1$, план $\Pi_A \in r_A$ является *разрешающей процедурой* $\Omega_{G|\mathbb{R}}$.

Поскольку для решения проблемы управления ДО $\mathbb{F}$ необходимо синтезировать процедуру $\Omega_{G|\mathbb{R}}$, *вполне допустимое решение* r_A *и является решением задачи управления* ДО.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Метод пошаговой верификации решений на основе многоагентной модели совместной активности ДО позволяет определить возможность достижения заданного целевого состояния путем выполнения плана, содержащегося в решении прецедента, в условиях взаимодействия ДО на ограниченном пространстве при наличии множественных ситуационных возмущений, а также нормативного регулятора активности, построенного на основе логической модели.

Присвоение численных значений переменным сценариев и параметрам управляющих воздействий целесообразно производить на фазе верификации, пошагово решая задачу динамического удовлетворения ограничений, обеспечивая согласование с заданной системой ограничений и одновременно решая задачу оптимизации для заданного вектора критериев оптимальности. Это позволяет соотносить параметры исполнительных органов и моменты приложения управляющих воздействий с текущими значениями параметров ДО и внешней среды, обеспечивая согласование пределов изменения параметров при возмущениях различной интенсивности и направленности.

Решением проблемы управления ДО является синтезированная в процессе поиска уместных решений, согласованная на множестве ограничений и удовлетворяющая критериям оптимальности процедура, являющаяся решением адаптированного прецедента, верифицированного на модели совместной активности с оценкой не ниже чем «вполне допустимо».

ЛИТЕРАТУРА

1. Шерстюк, В. Логико-вероятностный подход к оцениванию состояния динамической системы /В.Г. Шерстюк //Вестник Херсонского национального технич. университета. – 2010. – №3 (39). – С.514-520.
2. Шерстюк, В. Информационная технология поддержки принятия решений по управлению движением судна /В.Г. Шерстюк //Вестник Херсонского национального технического университета. – 2008. – №4 (33). – С.180-189.
3. Мальцев, А. Маневрирование судов при расхождении /А.С. Мальцев. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2004. – 212 с.
4. Сиек, Ю. Принципы синтеза интеллектуальных систем управления морскими динамическими объектами /Ю.Л. Сиек, Соэ Мин Лвин //Искусственный интеллект. – 2009. – №4. – С.448-456.
5. Топалов, В. К проблеме человеческого фактора в судоходстве /В.П. Топалов, В.Г. Торский, Ю.В. Торский //Судовождение. – 2004. – Вып. 8. – С.94-102.
6. Шерстюк, В. Принципы интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению движением судна /В.Г. Шерстюк //Вестник Херсонского национального технического университета. – 2009. – №3 (36). – С.133-141.
7. Шерстюк, В. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений по управлению судном в условиях неполной и противоречивой информации /В.Г. Шерстюк, А.П. Бень //Судовождение. – 2007. – Вып. 14. – С.141-144.
8. Мальцев, А. Интеллектуальные гибридные системы поддержки принятия решений при расхождении судов /А.С. Мальцев //Судовождение. – 2006. – Вып. 11. – С.74-86.
9. Шерстюк, В. Сценарно-прецедентный подход к формированию управляющих воздействий в системе управления морского подвижного объекта /В.Г. Шерстюк //Проблемы информационных технологий. – 2009. – №2 (6). – С.69-77.
10. Aamodt, A. Case-based reasoning: foundational issues, methodological variations, and system approaches /A. Aamodt, E. Plaza //AI Communications. – 1994. – Vol. 7. – №1. – Pp.39-59.
11. Варшавский, П. Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений /П.Р. Варшавский, А.П. Еремеев //Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009. – №1. – С.45-57.
12. Карлин, С. Чебышевские системы и их применение в анализе и статистике /С. Карлин, В. Стадден. – М.: Наука, 1976. – 567 с.
13. Большаков, А. Синтез интеллектуальных организационно-технических систем управления /А.А. Большаков //Вестник Тамбовскогоо государственного технического университета. – 2004. – Т.10. – №4. – С.954-959.
14. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами /Под ред. А.А. Большакова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 160 с.
15. Люгер, Дж. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем /Дж. Ф. Люгер. – М.: Вильямс, 2003. – 864 с.
16. Шерстюк, В. Основы теории динамических сценарно-прецедентных интеллектуальных систем /В.Г. Шерстюк. – Херсон: Феникс, 2012. – 432 с.

17. Щербина, О. Удовлетворение ограничений и программирование в ограничениях /О.А. Щербина //Препринт. – University of Vienna, 2008. – 82 p.
18. Телерман, В. Удовлетворение ограничений в задачах математического программирования /В.В. Телерман, Д.М. Ушаков //Вычислительные технологии. – 1998. – Т.3. – №2. – С.45-54.
19. Щербина, О. Локальные элиминационные алгоритмы для задач удовлетворения ограничений /О.А. Щербина //Таврический вестник информатики и математики. – 2007. – №1. – С.24-39.
20. Macho-González, S. Open, Interactive and Dynamic CSP /S. Macho-González, P. Meseguer //Proc. Int. Workshop on Constraint Solving under Change and Uncertainty CP-2005. – Sitges, Spain, 2005. – Pp.13-17.
21. Bessiere, C. Arc-Consistency in Dynamic Constraint Satisfaction Problems /C. Bessiere //Proc. of 9th National Conf. on Artificial Intelligence. – Anaheim, CA: AAAI Press/MIT Press, 1991. – Vol.1. – Pp.221-226.
22. Mohr, R. Arc and Path Consistency Revisited /R. Mohr, T.C. Henderson //Artificial Intelligence. – 1986. – Vol.28. – Pp.225-233.
23. Тарасов, В. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика /В.Б. Тарасов. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.
24. Wooldridge, M. An Introduction to MultiAgent Systems /Michael Wooldridge. – N.Y.: J.Wiley & Sons, 2002. – 366 p.
25. Шерстюк, В. Моделирование навигационных ситуаций на основе логико-когнитивных агентов /В.Г. Шерстюк //Вестник Херсонского национального технич. университета. – 2009. – №1 (34). – С.24-30.
26. Шерстюк, В. Построение многоагентной логико-когнитивной модели совместного перемещения подвижных объектов /В.Г. Шерстюк //Вестник Херсонского национального технического университета. – 2011. – №1 (40). – С.204-211.
27. Linder, B. Modal Logics for Rational Agents: PhD thesis /B. van Linder. – Utrecht, Holland: Utrecht University, 1996.
28. Шерстюк, В. Классификация целей в бортовой интеллектуальной системе управления морского подвижного объекта /В.Г.Шерстюк //Вестник Херсонского национального технического университета. – 2010. – №2 (38). – С.172-179.