

УДК 004.986

В.Г. ШЕРСТЮК

Херсонський національний технічний університет

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНОЙ СИСТЕМЕ

В статье рассмотрены вопросы поиска решений задачи динамического удовлетворения ограничений, устанавливающих пределы изменения параметров и моментов приложения управляющих воздействий для согласования с текущим состоянием объекта и внешней среды. Предложен метод поиска решений, учитывающий динамическое изменение ограничений и обеспечивающий их представление в правдоподобной форме. Эффективность предложенного метода позволяет использовать его в реальном времени в процессе верификации решений в динамической сценарно-прецедентной системе.

Ключевые слова: сценарий, параметр, управляющее воздействие, правдоподобие, ограничение, решение, переменная, алгоритм.

В.Г. ШЕРСТЮК

Херсонський національний технічний університет

РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ДОТРИМАННЯ ОБМЕЖЕНЬ У ДИНАМІЧНІЙ СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНІЙ СИСТЕМІ

У статті розглянуто питання пошуку рішень задачі динамічного дотримання обмежень, що встановлюють межі зміни параметрів і моментів застосування керуючих впливів для узгодження з поточним станом об'єкта та зовнішнього середовища. Запропоновано метод пошуку рішень, що враховує динамічну зміну обмежень і забезпечує їх подання у правдоподібній формі. Ефективність запропонованого методу дозволяє використовувати його в реальному часі в процесі верифікації рішень в динамічній сценарно-прецедентній системі.

Ключові слова: сценарій, параметр, керуючий вплив, правдоподібність, обмеження, рішення, змінна, алгоритм.

V. SHERSTJUK

Kherson National Technical University

SOLVING CONSTRAINT SATISFACTION PROBLEMS IN DYNAMIC CASE-SCENARIO SYSTEM

The paper deals with finding solutions to the dynamic constraint satisfaction problem, which sets a limit of parameter changes and control actions moments for the adjustment with the current object and the environment states. The method to find solutions, taking into account the dynamic constraints change and ensure their representation in a plausible way, is proposed in this paper. The proposed method can be used in real time during the solutions verification process in the dynamic case- scenario system due to appropriate efficiency.

Keywords: scenario, setting, control action, likelihood, constraint, decision, variable, algorithm.

Постановка проблемы

Динамические сценарно-прецедентные системы (ДСПС) поддержки принятия решений предназначены для решения трудноформализуемых задач в слабоструктурированных предметных областях [1]. Их предметные области, как правило, включают сложные динамические системы (СДС), внутри которых взаимодействует множество динамических объектов (ДО). Так, при принятии решений по управлению эргатическими ДО при множественных ситуационных и экстремальных внешних возмущениях оператору (ЛПР) приходится анализировать значительные объемы неполной и неточной исходной информации при существенных ограничениях во времени на оценку обстановки и принятие решения, а также увеличенной продолжительности процедур принятия решений, что вызывает для ЛПР информационно сложные ситуации.

Целесообразным является решение проблемы управления ДО как проблемы поддержки принятия решений ЛПР на основании накопленного опыта интуитивно-эвристическими методами в соответствии со сценарно-прецедентным подходом [2], позволяющим формировать эффективные сценарии управляющих воздействий на органы управления ДО для компенсации возникающих ситуационных возмущений, при условии наличия у ДСПС достаточной для поиска прецедентов накопленной компетенции.

В то же время, одной из наиболее сложных проблем при использовании сценарно-прецедентного

подхода к принятию решений в проблемных ситуациях является проблема формирования в реальном времени параметров управляющих воздействий сценария при наличии нескольких органов управления. Суть данной проблемы заключается в том, что параметры органов управления и моменты приложения управляющих воздействий необходимо соотносить с текущими значениями параметров состояния ДО и внешней среды, обеспечивая согласование с predetermined системой ограничений R , устанавливающей пределы изменения параметров органов управления при возмущениях различной интенсивности и направленности, а также при различных значениях технических параметров ДО.

Например, выполнение элементарного маневра поворота (рис. 1) для морского ДО само по себе несложно, и допускает широкий диапазон значений параметра органа управления – угла перекаладки руля – в соответствующем сценарии управляющих воздействий (рис. 2).

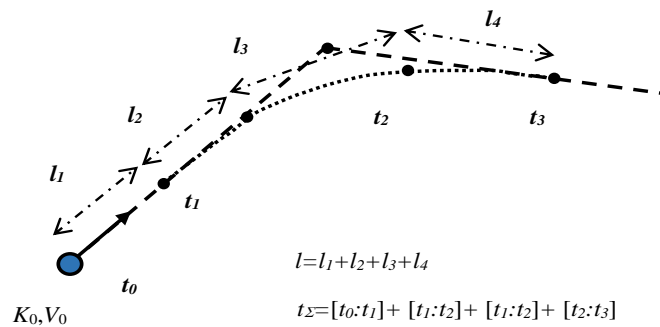


Рис. 1. Маневр поворота ДО вправо

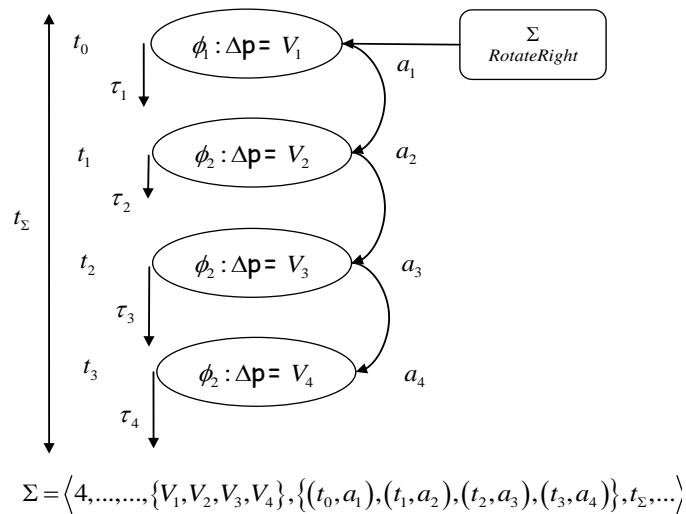


Рис. 2. Сценарий управляющих воздействий для реализации маневра

Однако, при сильном волновом воздействии диапазон возможных значений параметра сокращается. Наличие сильного ветрового воздействия также сокращает пределы выбора значений, а при определенном превышении значений крена или дифферента ДО выполнение маневра может быть запрещено.

Нарушение ограничений вызывает критические ситуации; в результате одной из таковых произошла катастрофа теплохода «Булгария» [3].

Решение данной проблемы лежит в использовании для верификации решений в ДСПС методов удовлетворения ограничений (Constraint Satisfaction Problem, CSP), которые, однако, относятся к классу NP-трудных и могут требовать перебора экспоненциального числа решений [4], что может существенно ограничивать быстродействие ДСПС.

В соответствии с [5] для решения проблемы управления ДО необходимо синтезировать разрешающую процедуру Ω , вполне допустимое решение которой является решением задачи управления. Тогда построение процедуры Ω будет требовать решения задачи удовлетворения ограничений (ЗУО), связанной с формированием параметров управляющих воздействий на органы

управления ДО в активном сценарии Σ (рис. 3).

$$\begin{aligned}
 t_{\Sigma} &= t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \\
 V_{14} &= f(V_{16}, V_{17}) & V_{24} &= f(V_{22}, V_{23}) \\
 V_{15} &= f(V_{18}, V_{19}) & V_{31} &= f(V_{18}, V_{19}, V_{23}) \\
 V_2 &= f(V_{14}, V_{15}, V_{24}, V_{31}) \\
 &\dots
 \end{aligned}$$

Рис. 3. Система ограничений на выполнение сценария управляющих воздействий

Таким образом, в свете участвовавших аварий и инцидентов ДО проблема своевременного и эффективного решения ЗУО в ДСПС приобретает особую актуальность.

Анализ последних исследований и публикаций

Как показано в [2], сложность решения задачи удовлетворения ограничений в ДСПС обусловлена следующими особенностями:

- 1) воздействие различных факторов неопределенности требует использования в ДСПС моделей представления знаний, учитывающих неполноту, неточность и противоречивость информации, для чего предложено использовать универсальную модель правдоподобия ℓ . Следовательно, ограничения также могут быть заданы в рамках модели ℓ , т.е. могут быть нечеткими, интервальными и т.д.;
- 2) значительная динамика параметров состояния внешней среды приводит к динамическому изменению действующей системы ограничений, что обуславливает необходимость динамической корректировки уже полученных решений ЗУО;
- 3) необходимость принятия решений по управлению ДО в реальном времени требует принятия ряда мер по повышению эффективности решения ЗУО, в частности, путем исключения комбинаторного перебора возможных решений.

Таким образом, ЗУО в ДСПС представляет собой динамическую задачу [6] и решается на основе модели правдоподобия ℓ [2]. В то же время, существующие методы решения динамических ЗУО [7], как правило, не учитывают возможность нечеткого либо приближенного представления ограничений, а известные методы решения ЗУО с правдоподобными ограничениями имеют низкую эффективность поиска решений [8].

Следовательно, необходимо разработать метод поиска решений задачи динамического удовлетворения ограничений, адекватный правдоподобному представлению информации – параметров управляющих воздействий и их ограничений, и позволяющий решать данную задачу в реальном времени.

Цель исследования

Цель данной статьи состоит в разработке метода поиска решений задачи удовлетворения ограничений в динамических сценарно-прецедентных системах, учитывающего динамику действующей системы ограничений на параметры управляющих воздействий для формируемых разрешающих процедур и обеспечивающего возможность представления ограничений в правдоподобном виде.

Эффективность поиска решений ЗУО должна обеспечивать выработку сценариев управляющих воздействий и формирование разрешающей процедуры Ω в реальном времени.

Изложение основного материала исследования

Построение разрешающей процедуры Ω производится на основе установки, включающей цель управления G , вектор критериев Q , где каждый критерий $Q_j \in Q$ представляет собой шкалу для оценки близости к цели G , и вектор ограничений R , включающий ограничения $R_j \in R$.

Пусть для каждого ограничения $R_k \in R$ задана процедура $\zeta_k : X_i^{t_j} \rightarrow R$, позволяющая выполнить проверку ограничения $\zeta_k(X_i^{t_j}) < R_k$, а для каждого критерия $Q_l \in Q$ построена процедура γ_l , позволяющая определить значение целевой функции $Q_l : \gamma_l : \|X_i^{t_j}\|_c \rightarrow R$.

Пусть задан некий универсум Y . Введем, основываясь на [8], правдоподобное расширение Y .

Правдоподобным расширением универсума Y будем называть любую конечную систему *Y его подмножеств, содержащую \emptyset , Y и замкнутую относительно пересечения множеств. Элементы множества *Y будем называть правдоподобными значениями, а элементы ${}^*Y^n$ – векторами правдоподобных значений.

Рассмотрим множество всех вещественных чисел *R , в котором элементы $y \in {}^*R$ в рамках

модели правдоподобия ℓ могут представлять собой [9]:

- интервал $[\min(y), \max(y)]$ (недоопределенное значение);
- α -срез $(\mu(y), \alpha)$ (нечеткое значение);
- область $[y, \bar{y}]$ (приближенное значение);
- четкое значение y или вектор соответствующих значений $y = (y_1, \dots, y_n)$.

Для некоторого множества переменных $V = \{y_1, \dots, y_m\}$ и их областей значений D_1, \dots, D_m отношением ю на множестве переменных $V \in Y$ является любое подмножество декартова произведения их областей значений. Множество переменных, на котором определено отношение ю , назовем диапазоном отношения $\text{score}(\text{ю}) = V$. Областью определения (доменом) $\text{dom}(y_j)$ переменной y_j в *Y назовем вектор $y = (y_{j1}, \dots, y_{jm}) \in {}^*R$.

Определение 1. Ограничением $R \in R$ называется пара $R = (\text{ю}, \pi_R)$, где $\text{ю} \subseteq {}^*Y^m$ – произвольное m -арное отношение на *Y , а $\pi_R : {}^*Y^m \rightarrow {}^*Y^m$ – функция, проецирующая вектор $y = (y_1, \dots, y_n) \in {}^*R$ на некоторые его m компонент, так что $\pi_R(y) = (y_{i1}, \dots, y_{im})$ для некоторых $i_1, \dots, i_m \in \{1, \dots, n\}$.

Определение 2. Задача удовлетворения ограничений R на множестве переменных $V = \{y_1, \dots, y_m\}$, для которых заданы области определения $\text{dom}(y_j)$, определяется конечным набором ограничений $R = \bigcup_{m=1}^M R_m$, где $R_m = \mathbf{k}(y_{im}, y_{jm})$, $y_{im} = V_{im}$, $y_{jm} = V_{jm}$, $V_{im}, V_{jm} \in \tilde{\mathcal{G}}^*$, как $R = (V, Y, R, \text{ю})$.

Обозначим как $\text{arg } R$ множество индексов $\{i_1, \dots, i_m\}$, на которые функция π_R выполняет проецирование. Если переменные задачи обозначить $\{y_1, \dots, y_n\}$, ограничение $R = (\text{ю}, \pi_R) \in R$ можно записать как $\text{ю}(y_{i1}, \dots, y_{im})$.

Пусть $\pi_R(y_1, \dots, y_m) = (y_{i1}, \dots, y_{im})$, а $\text{ю}(y_{i1}, \dots, y_{im}) = (z_1, \dots, z_m)$. Тогда

$$\text{ю}(y_1, \dots, y_n) = (z_1, \dots, z_m), \tag{1}$$

$$z_i = \begin{cases} \bigcap_{j:i_j=i} y_j & | i \in \text{arg } R \\ y_j & | i \notin \text{arg } R \end{cases}. \tag{2}$$

Множество решений $W(R)$ задачи удовлетворения ограничений на *Y определяется как

$$W(R) = \{y \in {}^*Y^n \mid (\forall R \in R) \pi_R(y) \in \text{ю}\}. \tag{3}$$

Целью решения ЗУО R является нахождение одного, нескольких или всех решений [10].

Поскольку в процессе выполнения всякого сценария Σ_t параметры внешней среды и самого ДО, для которых уже получено решение ЗУО, могут динамически изменяться, вектор R также претерпевает изменения, что требует заново решать ЗУО.

Решение ЗУО при значительной динамике внешней среды представляет задачу динамического удовлетворения ограничений (ЗДУО, Dynamic CSP) [6], при этом ЗДУО рассматривается как последовательность ЗУО, каждая из которых является следствием введения новых ограничений или отказа от существующих.

Определение 3. Задача динамического удовлетворения ограничений R^* есть последовательность ЗУО $R^* = [R_{(0)}, \dots, R_{(i)}, \dots, R_{(n)}, \dots]$ в моменты времени $t_0, \dots, t_i, \dots, t_n, \dots$.

Определение 4. Ограничение R , такое, что $R \in R_{(t)}$, называется активным в момент времени t ограничением.

Множество активных ограничений в последующие моменты времени может изменяться в результате выполнения операций установления и снятия ограничений [11], при этом предполагается $R_{(0)} = (V, Y, \emptyset, \text{ю})$. В случае, если ограничения заданы на модели правдоподобия ℓ , возможны также операции смягчения (расширения интервала значений) и ужесточения (сокращения интервала)

ограничений.

Таким образом, если $R_{(i)} = (V, Y, R_{(i)}, ю)$, то $R_{(i+1)} = (V, Y, R_{(i+1)}, ю)$, причем

$$R_{(i+1)} = (R_{(i)} \circ R_{\ell}) \pm R_{\Delta}, \tag{4}$$

где R_{Δ} – изменения вектора R , связанные с установлением (+) и снятием (-) ограничений;
 R_{ℓ} – изменения вектора R , связанные со смягчением или ужесточением активных ограничений.

Решение ЗДУО для t является множеством векторов $\{y_t^j \in {}^*Y^n\}$, каждый из которых в момент t удовлетворяет вектору заданных ограничений $R_{(t)}$ (рис. 4).

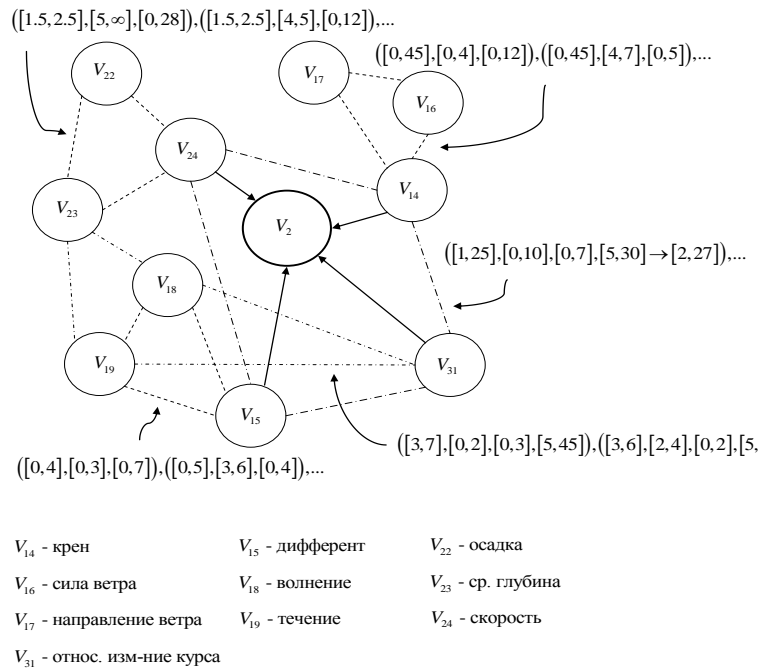


Рис. 4. Фрагмент дерева зависимости переменных для сценария

- пространство поиска оптимального решения ограничено множеством решений ЗДУО $W(R)$;
- поиск решения ОЗ производится не по целевой функции, а по целевой переменной X_Q , соответствующей выбранному целевому критерию $Q^0 \in Q$;
- поскольку ЗДУО решается как динамическая, ОЗ также должна решаться динамически, т.к. всякое изменение множества решений $W(R)$ требует повторного решения ОЗ;
- точность решения ОЗ (также и ЗДУО) существенно зависит от точности исходной информации (чем шире интервалы значений переменных (вследствие неточности наблюдений), тем более «размыто» решение).

Следует заметить, что если на *Y задать частичный порядок \prec_{Y^*} , можно производить поиск квазиоптимальных решений.

Определение 5. Решение $\hat{y}_{(t)} = (\hat{y}_{1(t)}, \dots, \hat{y}_{n(t)}) \in {}^*R$ называется квазиоптимальным на момент t , если и только если $\forall y_{i(t)} = (y_{1_i}, \dots, y_{n_i}) \in W_i(R)$ выполняется $\hat{y}_{Q(t)} \leq y_{Q(t)}$ ($\hat{y}_{Q(t)} = \arg \min(y_{Q_1(t)}, y_{Q_2(t)}, \dots, y_{Q_n(t)})$).

Определение 6. Решение $\hat{y} = (\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_n) \in {}^*R$ называется оптимальным для сценария Σ по критерию $Q_i \in Q$, если и только если на всем временном интервале выполнения сценария $[t_0, t_{\Sigma}]$ $\forall y_i = (y_{1_i}, \dots, y_{n_i}) \in W(R)$ выполняется $\hat{y}_Q \leq y_Q$ ($\hat{y}_Q = \arg \min(y_{Q_1}, y_{Q_2}, \dots, y_{Q_n})$).

Для решения ОЗ необходимо:

- а) осуществить выбор целевого критерия $Q^0 \in Q$;
- б) установить для данного целевого критерия связанную целевую переменную y_Q ;
- в) решить ЗДУО и получить множество ее решений $W(R)$;
- г) найти такое решение ЗДУО, которое удовлетворяло бы определению б.

Для решения ЗДУО могут быть использованы методы прямого и обратного распространения ограничений, локального поиска и т.д. [12]. Для решения ЗДУО алгоритм должен быть *инкрементным*.

Примем за основу известный алгоритм установления локальной совместности сети ограничений АС [13], обобщив его на правдоподобные расширения R и обеспечив инкрементное формирование множества ограничений $R_{(t)}$. Алгоритм решения, имеющий полиномиальную оценку вычислительной сложности по $|R_{\Delta}|$ и являющийся последовательно гарантирующим [14] (на любом шаге его работы $y^{(k)} \subseteq W(R)$), представлен на рис. 5.

```

procedure DAC(v,t)
// v - вершина ПДСС
01: constraint struct (x,y)
02: constraintset worklist
03: real X,x,y
04: array of real vx,vy
05: time dt
06: foreach X in v do // Множество переменных X
07:   get D(X) // D(X) = {vx0, vx1... vxn} -возможные значения x
08:   foreach v.R1 ^ v.R2 in v do
// Множество унарных ограничений R1(x) для x
// Множество бинарных ограничений R2(x, y) для x и y
09:     t := ac3(X,D(X),R1,R2,t)
10:   end for
11: end for
12: end
13: function ac3(X, D, R1, R2,t)
14: foreach x in X do
15:   D(x) := { x in D(x) | R1(x) }
16:   worklist := { (x, y) | R2(x, y) v R2(y, x) }
17: end for
18: do
19:   foreach y in (x, y) from worklist do
20:     worklist := worklist - (x, y)
21:   end for
22:   if arc-reduce(x, y)
23:     if D(x)=∅ then
24:       return error
25:     end if
26:   else
27:     worklist := worklist+{(z,x) | z≠y ^ (R2(x,z) v R2(z,x))}
28:   end if
29: while worklist ≠ ∅
30:   t:= t+dt
31: return t
32: function arc-reduce(x,y)
33: bool change := false
34: foreach vx in D(x) do
35:   if vy := find(D(y) | R2(x, y) <= 0
36:     then {
37:       D(x) := D(x) - vx;
38:       change := true
39:     }
40:   end if
41: end for
42: return change

```

Рис. 5. Алгоритм решения задачи динамического удовлетворения ограничений

Для повышения эффективности алгоритмов решения ЗДУО и ОЗ используем следующую эвристику: множество переменных $V = \{y_1, \dots, y_m\}$ ранжируется по числу вхождений в максимальное число ограничений и по относительной ширине интервала $((\bar{y} - \underline{y}) / (\bar{y} + \underline{y}))$, поэтому вначале

обрабатываются переменные, наиболее ограничивающие решение в количественном смысле (по числу вхождений в ограничения), а затем – в качественном смысле (сужающие решение интервалом значений).

Для решения ОЗ используем метод ветвей и границ [15]. Данный алгоритм не является полным (в том смысле, что получаемый вектор содержит субоптимальное, но не оптимальное решение) и имеет экспоненциальную оценку сложности по числу переменных n , однако, для использования в ДСПС важно, что он также является последовательно гарантирующим, так как ввиду значительной динамики СДС последовательно гарантирующий алгоритм всегда может быть прерван (из-за недостатка времени на продолжение), при этом на каждом шаге выполнения алгоритм будет давать решение, соответствующее верхней оценке целевой переменной y_0 . Для решения ОЗ могут быть использованы и другие алгоритмы, например, генетический алгоритм [16].

Выводы

Присвоение численных значений переменным сценариев и параметрам управляющих воздействий в ДСПС 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 управляющих воздействий на органы управления и моменты их приложения с текущими значениями параметров ДО и внешней среды, обеспечивая согласование пределов изменения параметров при возмущениях различной интенсивности и направленности.

Предложенный в данной работе метод поиска решений задачи динамического удовлетворения ограничений позволяет учесть динамику изменения действующей системы ограничений на параметры управляющих воздействий для формируемых разрешающих процедур под воздействиями внешней среды, а также обеспечивает возможность представления ограничений в нечеткой, интервальной либо приближенной форме.

Эффективность предложенного метода поиска решений задачи удовлетворения ограничений обеспечивает выработку сценариев управляющих воздействий и формирование разрешающей процедуры в ДСПС в реальном времени.

Список использованной литературы

1. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика / Д.А. Поспелов. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
2. Шерстюк В.Г. Сценарно-прецедентное управление эргатическими динамическими объектами / В.Г. Шерстюк. – Saarbrücken, Deutschland: Lambert Academic Publishing, 2013. – 407 p.
3. news.mail.ru/incident/6316167
4. Шерстюк В.Г. Позиционно-целевое управление подвижными объектами в полиэргатических системах / В.Г. Шерстюк // Вестник Херсонского нац. техн. ун-та. – 2012. – №1(44). – С.18-26.
5. Щербина О. Удовлетворение ограничений и программирование в ограничениях / О. А. Щербина // Препринт. – University of Vienna, 2008. – 82 p.
6. 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.
7. Lecoutre, C. Constraint Networks: Techniques and Algorithms / C. Lecoutre. – N.Y.: ISTE/Wiley, 2009. – 592 p.
8. Телерман В. Удовлетворение ограничений в задачах математического программирования / В.В. Телерман, Д. М. Ушаков // Вычислительные технологии. – 1998. – Т.3. – №2. – С.45-54.
9. Нариньяни, А. НЕ-факторы: неточность и недоопределенность – различие и взаимосвязь / А.С. Нариньяни // Изв. РАН: Теория и системы управления. – 2000. – №5. – С.44-56.
10. Щербина, О. Локальные элиминационные алгоритмы для задач удовлетворения ограничений / О. А. Щербина // Таврический вестник информатики и математики. – 2007. – №1. – С.24-39.
11. 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.
12. Mackworth A. Consistency in networks of relations / A. K. Mackworth // Artificial Intelligence. – 1977. – Vol.8. – Pp.99-118.
13. Mohr R. Arc and Path Consistency Revisited / R. Mohr, T. C. Henderson // Artificial Intelligence. – 1986. – Vol.28. – Pp.225-233.
14. Shary, S. On optimal solution of interval linear equations / S. P. Shary // SIAM J. Numer. Anal. – 1995. – Vol.32. – Pp.610-630.
15. Юхименко Б. Ускоренный алгоритм метода ветвей и границ для решения задачи целочисленного линейного программирования / Б.И. Юхименко // Труды Одесского политехнического университета. – 2004. – Вып.2. – С.223-226.
16. Гладков, Л. Биоинспирированные методы в оптимизации / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик [и др.]. – М.: Физматлит, 2009. – 384 с.