УДК 519.816

А.Е. ЛИТВИНЕНКО, О.В. НЕЛИН

ВЫРАБОТКА РЕШЕНИЙ В СИСТЕМАХ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОГО ПЕРЕБОРА ВАРИАНТОВ

Abstract: *A logical-linguistic model for a situational control of a complex systems is introduced. A procedure of its transformation to the canonical view of extreme combinatorial problems is described. An algorithm of decision making, which implements a strategy of directed-goal consequent examining variants, is presented.*
Key words: *situational control, choice, combinatorial problems.*

Анотація: *Наведена логіко-лінгвістична модель ситуаційного управління складними організаційно-технологічними об'єктами. Описана процедура її перетворення до канонічного виду екстремальних комбінаторних задач. Викладений алгоритм вироблення управлінських рішень, що реалізує стратегію направленого перебору варіантів.*
Ключові слова: *ситуаційне управління, вибір, комбінаторні задачі.*

Аннотация: *Приведена логико-лингвистическая модель ситуационного управления сложными организационно-техническими объектами. Описана процедура ее преобразования к каноническому виду экстремальных комбинаторных задач. Изложен алгоритм выработки управленческих решений, реализующий стратегию направленного перебора вариантов.*
Ключевые слова: *ситуационное управление, выбор, комбинаторные задачи*.

1. Введение

Слабая формализуемость управленческих задач в сложных организационно-технологических системах требует применения экспертных логико-лингвистических моделей управления и соответствующих им алгоритмов логического вывода [1]. Среди последних наиболее широкое распространение получили алгоритмы, основанные на известном принципе резолюции Дж. Робинсона [2]. Однако все они обладают рядом существенных недостатков, основным из которых является слабая целенаправленность действия, обусловленная наличием эвристических элементов. Вследствие этого в процессе анализа логико-лингвистической модели формируется большой объем промежуточной информации, которая в дальнейшем не используется, но резко увеличивает затраты машинного времени.

Явно выраженный комбинаторный характер процедуры логического вывода, а также стремление придать ей большую целенаправленность обусловили попытку привлечь к выработке решений на основе экспертных моделей управления алгоритм направленного перебора вариантов. Наряду с существенным сокращением объема вычислений, это придаст экспертной системе управления дополнительные возможности, которых она была лишена при использовании традиционных методов логического вывода:

а) формирование комплексных управленческих решений, предусматривающих одновременную реализацию некоторого набора элементарных управляющих операций;

б) оптимизация искомых управленческих решений по заданному критерию.

Реализация такого подхода требует унификации структуры экспертных моделей ситуационного управления, разработки процедуры их преобразования к каноническому виду экстремальных комбинаторных задач, модификации алгоритма направленного перебора вариантов. Именно это является целью данного исследования.

2. Формализация задачи ситуационного управления

Предлагаемый подход к выработке решений в системах ситуационного управления базируется на следующих предположениях.

Объектом управления (ОУ) является сложная организационно-технологическая система, состоящая из n взаимодействующих подсистем σ_j, $j = \overline{1,n}$. Состояние ОУ в каждый момент времени описывается *u*-мерным вектором значений его характеристик $z = \left(z_p;\ p = \overline{1,u}\right)$.

Если текущие значения всех характеристик ОУ одновременно принадлежат заранее установленным допустимым диапазонам, это означает, что объект управления находится в нормальном состоянии и в каких-либо управляющих воздействиях нет необходимости. Выход хотя бы одной из характеристик за допустимые пределы свидетельствует о переходе ОУ в аномальное состояние, что требует оперативного принятия управленческого решения, способного вернуть объект управления в нормальное состояние.

Экспертная модель управления сложным объектом строится по традиционной схеме <ситуация> $\rightarrow$ <действие>. Предполагается, что экспертами заранее определено множество наиболее типичных, но достаточно простых аномальных (сбойных, нештатных) ситуаций $\left\{S_q;\ q = \overline{1,v}\right\}$, каждая из которых задается принадлежностью значений некоторого набора характеристик состояния ОУ к тем или иным диапазонам:

$$S_q : \bigwedge_{p \in P_q} \left(z_p \in Z_{qp}\right);\ q = \overline{1,v}\ ,$$

где P_q – множество номеров характеристик состояния ОУ, значения которых являются определяющими для q-й ситуации;

Z_{qp} – множество значений p-й характеристики состояния ОУ, соответствующих аномальной ситуации S_q .

В случае невозможности количественного измерения той или иной характеристики состояния ОУ допускается описание ее значений качественными категориями.

Экспертная модель ситуационного управления, построенная по указанной схеме, имеет следующую структуру:

$$S_q \rightarrow \bigvee_{r \in R_q} \bigwedge_{i \in I_r} \bigwedge_{j \in J_{ri}} X_i\left(\sigma_j\right);\ q = \overline{1,v}\ , \tag{1}$$

где R_q – множество, элементы которого идентифицируют возможные способы воздействия на ОУ в q-й нештатной ситуации;

I_r – множество элементарных управляющих операций, одновременная реализация которых предусматривается r-м способом воздействия на ОУ;

J_{ri} – множество номеров подсистем ОУ, к которым применяется *i*-я управляющая операция согласно *r*-у способу воздействия;

$X_i(\sigma_j)$ – предикат, описывающий *i*-ю управляющую операцию, применяемую к j-й подсистеме ОУ.

Выражения (1), адаптированные к конкретному объекту управления, могут служить основой базы знаний экспертной системы ситуационного управления.

Реальные ситуации, возникающие в организационно-технологических системах, как правило, значительно сложнее тех, которые априорно предусматриваются экспертами. Поэтому выработке управленческого решения предшествует настройка модели (1) на сложившуюся ситуацию. Структура выражений (1) позволяет свести такую настройку к фиксации значений компонентов булевого вектора $b = \left(b_q;\ q = \overline{1,v}\right)$ согласно формуле

$$b_q = \begin{cases} 1,\ если\ (\forall_p \in P_q)(z_p \in Z_{qp}) \\ 0 - в\ противном\ случае \end{cases}; \quad q = \overline{1,v}.$$

Использование алгоритма направленного перебора для выработки управленческого решения на основе экспертной модели (1) требует построения соответствующей ей алгебраической комбинаторной модели. Для этого каждому предикату $X_i(\sigma_j)$ сопоставляются бивалентные переменные $x_{ij} \in \{0,1\};\ i = \overline{1,m};\ j \in J_i$,

где $m = \left| \bigcup\limits_{q=1}^{v} \bigcup\limits_{r \in R_q} I_r \right|; \quad J_i = \bigcup\limits_{q=1}^{v} \bigcup\limits_{r \in R_q} J_{ri}$.

Смысл булевых переменных $x_{ij};\ i = \overline{1,m};\ j \in J_i$ интерпретируется следующим образом: если в результате решения управленческой задачи, сведенной к комбинаторной форме, некоторая переменная $x_{i^* j^*}$ принимает значение 1, это означает, что в сложившейся ситуации необходимо реализовать i^*-ю управляющую операцию в отношении j^*-й подсистемы ОУ; при $x_{i^* j^*} = 0$ данное утверждение неверно.

Тогда логико-лингвистической модели (1) после настройки на ситуацию можно сопоставить систему алгебраических уравнений следующей структуры:

$$\sum_{r \in R_q} \prod_{i \in I_r} \prod_{j \in J_{ri}} x_{ij} = b; \quad q = \overline{1,v}. \tag{2}$$

Переход к алгебраической модели предоставляет возможность оптимизировать искомое управленческое решение по заданному критерию. В качестве такого критерия могут выступать суммарные финансовые издержки на реализацию управленческого решения, расходы разного рода материально-технических ресурсов, затраты времени на возвращение ОУ в нормальное состояние и др. В большинстве случаев критерий искомого управленческого решения выражается линейной функцией вида

$$f(x) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j \in J_i} c_{ij} x_{ij} \to \min, \tag{3}$$

где c_{ij} – величина, характеризующая, например, стоимость реализации *i*-й управляющей операции в отношении j-й подсистемы ОУ.

Следовательно, задача выработки управленческого решения на основе экспертной модели (1) сводится к отысканию вектора значений булевых переменных $x = \left(x_{ij};\, i = \overline{1,m};\ j \in J_i\right)$, обращающих в минимум критериальную функцию (3) при соблюдении системы ограничений (2).

Задача (2)–(3) относится к классу экстремальных комбинаторных задач с нелинейной структурой, унимодулярной матрицей коэффициентов и свободных членов. Это дает основание считать, что для ее решения целесообразно использовать алгоритм направленного перебора вариантов [3], адаптированный под структуру математических выражений (2).

3. Алгоритмизация задачи выработки управленческого решения

Данный алгоритм предусматривает последовательное дробление исходного множества G вариантов решения задачи (2)–(3), производимое до тех пор, пока не будет найдено оптимальное решение или установлен факт несовместности системы ограничений (2). Разбиение множества G и последующих его подмножеств осуществляется путем фиксации значений искомых переменных. Для дальнейшего разбиения на каждом этапе решения задачи выбирается то подмножество вариантов, которому соответствует минимальная оценка критериальной функции. Выделяемые подмножества вариантов подвергаются формальному анализу с целью максимально сузить область дальнейшего поиска, сократить объем обрабатываемой информации и тем самым ускорить процесс получения искомого результата.

Полное множество G вариантов решения системы (2) состоит из 2^N векторов значений переменных $x_{ij};\, i = \overline{1,m};\ j \in J_i$, где $N = \sum_{i=1}^{m} \left|J_i\right|$.

Предположим, к началу некоторого этапа решения задачи в полном множестве вариантов выделены λ непересекающихся подмножеств G_k, содержащих допустимые векторы значений искомых переменных, $k = \overline{1,\lambda}$.

Абстрагируясь от физического смысла рассматриваемой задачи и учитывая, что искомые переменные имеют двойную индексацию, введем следующие обозначения:

I_k^0 и I_k^1 – множества первых индексов искомых переменных, получивших в векторах подмножества G_k значения 0 и 1 соответственно:

$$I_k^0 = \left\{i : 1 \le i \le m,\ \exists j\left[\left(1 \le j \le n_i\right) \&\left(x_{ij} = 0\right)\right]\right\};$$

$$I_k^1 = \left\{i : 1 \le i \le m,\ \exists j\left[\left(1 \le j \le n_i\right) \&\left(x_{ij} = 1\right)\right]\right\};$$

I_k – множество первых индексов искомых переменных, значения которых в векторах подмножества G_k не зафиксированы:

$$I_k = \{i : 1 \le i \le m,\ J_{ik} \ne \varnothing\};$$

J_{ik}^0 и J_{ik}^1 – множества вторых индексов переменных x_{ij}, $i \in I_k^0$ и x_{ij}, $i \in I_k^1$, соответственно получивших в векторах подмножества G_k значения 0 и 1:

$$J_{ik}^0 = \{i : 1 \le j \le n,\ x_{ij} = 0\},\quad i \in I_k^0;$$

$$J_{ik}^1 = \{i : 1 \le j \le n,\ x_{ij} = 1\},\quad i \in I_k^1;$$

J_{ik} – множество вторых индексов переменных x_{ij}, $i \in I_k$, значения которых в векторах подмножества G_k не зафиксированы:

$$J_{ik} = \{1, \ldots, n_i\} \setminus \left(J_{ik}^0 \cup J_{ik}^1\right),\quad i \in I_k.$$

Набор значений переменных x_{ij}, $i \in I_k^0 \cup I_k^1$, $j \in J_{ik}^0 \cup J_{ik}^1$ такой, что

$$\left(\forall i \in I_k^0\right)\left(\forall j \in J_{ik}^0\right)\left(x_{ij} = 0\right) \& \left(\forall i \in I_k^1\right)\left(\forall j \in J_{ik}^1\right)\left(x_{ij} = 1\right),$$

будем называть частичным планом k-го подмножества вариантов, а любой набор значений переменных x_{ij}, $i \in I_k$, $j \in J_{ik}$, удовлетворяющих условию бивалентности $x_{ij} \in \{0,1\}$, – дополняющим планом данного подмножества G_k.

Подстановка частичного плана каждого k-го $(1 \le k \le \lambda)$ подмножества вариантов в исходную модель (2)–(3) преобразует ее к частной форме, соответствующей данному подмножеству. Для представления такой частной формы на множествах R_q, I_r, J_{ri} выделяются следующие подмножества:

$$R_{qk}^0 = \left\{ r \in R_q : (\exists i \in I_r)\left(J_{ri} \cap J_{ik}^0 \ne \varnothing\right)\right\};\ R_{qk}^1 = \left\{ r \in R_q : (\exists i \in I_r)\left(J_{ri} \subseteq J_{ik}^1\right)\right\};$$

$$R_{qk} = R_q \setminus \left(R_{qk}^0 \cup R_{qk}^1\right);\quad q = \overline{1, v};\qquad I_{rk} = \{i \in I_r : J_{ri} \cap J_{ik} \ne \varnothing\},\quad r \in R_{qk};$$

$$J_{rik} = J_{ri} \cap J_{ik};\quad r \in R_{qk},\quad i \in I_{rk}.$$

Ограничение системы (2), которому не удовлетворяет хотя бы один из дополняющих планов подмножества G_k, называется активным по отношению к планам данного подмножества вариантов. Множество Q_k номеров таких ограничений определяется согласно формуле

$$Q_k = \{q :\ 1 \le q \le v;\ R_{qk} \ne \varnothing\}.$$

С учетом введенных обозначений алгебраическую модель (2)–(3), приведенную в соответствие k-му подмножеству вариантов, можно представить в следующей форме:

$$f_k(x) = \sum_{i \in I_k^1} \sum_{j \in J_{ik}^1} c_{ij} + \sum_{i \in I_k} \sum_{j \in J_{ik}} c_{ij} x_{ij} \to \min; \tag{4}$$

$$\sum_{r \in R_{qk}} \sum_{i \in I_{rk}} \prod_{j \in J_{rik}} x_{ij} = b_q;\quad q \in Q_k. \tag{5}$$

Алгоритм решения экстремальной комбинаторной задачи (2)–(3), реализующий стратегию направленного перебора вариантов, предусматривает выполнение на каждом этапе вычислительного процесса следующей последовательности действий.

3.1. Выбор подмножества вариантов, подлежащего разбиению

Для дальнейшего разбиения выбирается подмножество вариантов G_{k*}, $1 \le k* \le \lambda$, которому соответствует минимальная оценка критериальной функции [4]

$$\xi(G_{k*}) = \min\{\xi(G_k); 1 \le k \le \lambda\},$$

где $\xi(G_k) = \min\limits_{x \in G_k} f(x)$.

Такой критерий выбора отвечает стремлению достичь искомого результата вычислений за минимальное количество шагов алгоритма.

3.2. Выбор переменной, значения которой подлежат фиксации

Для данной операции целесообразно выбрать переменную, фиксация значений которой приводит или может в дальнейшем привести к существенному упрощению системы ограничений (5), соответствующей подмножеству вариантов G_{k*}. Таким свойством может обладать переменная, не имеющая (или имеющая минимальное количество) сомножителей в одном из произведений переменных, входящих в уравнения системы (4). Поэтому сначала на множестве

$$R_{k*} = \bigcup_{q \in Q_{k*}} R_{qk*}$$

устанавливается элемент $r* \in R_{k*}$, идентифицирующий произведение переменных с минимальным количеством сомножителей:

$$\rho_{r*k*} = \min\{\rho_{rk*}, \quad r \in R_{k*}\},$$

где $\rho_{rk} = \sum\limits_{i \in I_{rk}} |J_{rik}|$.

Затем для присваивания значений выбирается любая переменная x_{i*j*} из множества $\{x_{ij}, \quad i \in I_{r*k*}, \quad j \in J_{r*ik*}\}$.

3.3. Разбиение подмножества вариантов G_{k*}

Путем фиксации значений переменной x_{i*j*} подмножество G_{k*} разбивается на два непересекающихся подмножества вариантов G^0_{k*} и G^1_{k*}. Во всех планах первого из них $x_{i*j*} = 0$, в планах второго – $x_{i*j*} = 1$. Эти значения поочередно подставляются в уравнения (5), вследствие чего формируются две новые системы ограничений, соответствующие двум новым подмножествам вариантов G_{k*}^0 и G_{k*}^1.

3.4. Анализ подмножеств вариантов G_{k*}^0 и G_{k*}^1

В основе формального анализа любого подмножества вариантов G_k, $1 \le k \le \lambda$ лежат четыре следующие утверждения, очевидность которых освобождает от необходимости их доказательства.

Утверждение 1. Система ограничений (5) несовместна, если для некоторого $q \in Q_k$ выполняется условие

$$\left(\left|R_{qk}^1\right| > b_q\right) \vee \left(R_{qk}^1 = \varnothing\right) \& \left(R_{qk} = \varnothing\right) \& \left(b_q = 1\right).$$

Утверждение 2. Ограничение $q \in Q_k$ системы (5) не является активным по отношению к планам подмножества G_k, если для него выполняется условие

$$\left(R_{qk} = \varnothing\right) \& \left[\left(R_{qk}^1 = \varnothing\right) \& \left(b_q = 0\right) \vee \left(\left|R_{qk}^1\right| = 1\right) \& \left(b_q = 1\right)\right].$$

Утверждение 3. Если для некоторого ограничения $q \in Q_k$ системы (5) выполняется условие

$$\left(R_{qk}^1 = \varnothing\right) \& \left(\left|R_{qk}\right| = 1\right) \& \left(b_q = 1\right),$$

то из дополняющих планов подмножества вариантов G_k допустимыми могут быть лишь те, в которых $\prod\limits_{i \in I_{rk}} \prod\limits_{j \in J_{rik}} x_{ij} = 1$, $r \in R_{qk}$.

Утверждение 4. Если для некоторого ограничения $q \in Q_k$ системы (5) выполняется условие

$$\left(R_{qk}^1 = \varnothing\right) \& \left(\left|R_{qk}\right| = 1\right) \& \left(b_q = 0\right),$$

то из дополняющих планов подмножества вариантов G_k допустимыми могут быть лишь те, в которых $\prod\limits_{i \in I_{rk}} \prod\limits_{j \in J_{rik}} x_{ij} = 0$, $r \in R_{qk}$.

Процедура анализа подмножества вариантов G_k, $1 \le k \le \lambda$ заключается в последовательной проверке выполнения условий каждого из сформулированных утверждений для всех ограничений системы (5). В зависимости от результатов этой проверки в цикле анализа осуществляется та или иная совокупность действий.

1. Если для некоторого ограничения системы (5) выполняется условие утверждения 1, то анализируемое подмножество вариантов G_k исключается из дальнейшего рассмотрения как не содержащее допустимых планов, а процедура анализа на этом завершается. В противном случае осуществляется переход к следующему пункту данной процедуры.

2. Ограничение $q^{/} \in Q_k$, для которого выполняется условие утверждения 2, исключается из системы (5), поскольку оно не способно влиять на выбор дополняющего плана анализируемого подмножества вариантов G_k. После этого корректируется состав множества Q_k, элементы которого идентифицируют ограничения, активные по отношению к планам данного подмножества. Обновленный состав указанного множества определяется согласно формуле $Q_k^{/} = Q_k \setminus \{q'\}$.

3. Если для некоторого ограничения $q \in Q_k^{/}$ системы (5) выполняется условие утверждения 3, то переменным x_{ij}, $r \in R_{qk}$, $i \in I_{rk}$, $j \in J_{rik}$ присваиваются значения 1. Эти значения подставляются во все активные (по отношению к планам подмножества G_k) уравнения (5). После этого производится повторный цикл анализа k-го подмножества вариантов, начиная с первого пункта. Проверку выполнения условия утверждения 1 для данного ограничения в повторном цикле можно опустить.

В противном случае осуществляется переход к следующему пункту процедуры анализа подмножества G_k.

4. Если для некоторого ограничения $q \in Q_k^{/}$ системы (5) выполняется условие утверждения 4 и при этом $|I_{rk}| = |J_{rik}| = 1$, то переменной x_{ij}, $r \in R_{qk}$, $i \in I_{rk}$, $j \in J_{rik}$ присваивается значение 0. Это значение подставляется во все активные (по отношению к планам подмножества G_k) уравнения (5). После этого производится повторный цикл анализа k-го подмножества вариантов, начиная с первого пункта. Проверка выполнения условия утверждения 1 для данного ограничения в повторном цикле опускается.

В противном случае процедура анализа подмножества вариантов G_k завершается.

Описанная процедура поочередно выполняется в отношении новых подмножеств вариантов G_{k*}^{0} и G_{k*}^{1}. После этого (если искомое решение не найдено) все оставшиеся в поле рассмотрения подмножества вариантов заново перенумеровываются, начиная с единицы.

3.5. Проверка условий окончания вычислительного процесса

Вычислительный процесс завершается после нахождения оптимального решения экстремальной комбинаторной задачи (2)–(3) или установления факта несовместности системы ограничений (2).

Можно утверждать, что булевый вектор $x^* = \left(x^*_{ij};\, i = \overline{1,m};\ j \in J_i\right)$, удовлетворяющий системе ограничений (2), является оптимальным решением задачи (2)–(3), если для него выполняется условие

$$f(x^*) \le \min\left\{\xi(G_k);\ k = \overline{1, \lambda^{/}}\right\}, \tag{6}$$

где $\lambda^{/}$ – количество подмножеств вариантов, оставшихся в поле рассмотрения к концу данного этапа вычислительного процесса.

Формальным признаком несовместности системы ограничений (2) служит отсутствие подмножеств вариантов, оставшихся в поле рассмотрения после выполнения процедуры анализа, то есть $\lambda' = 0$.

Если на текущем этапе условия окончания вычислительного процесса не выполняются, то осуществляется следующий этап реализации описанного алгоритма.

Начинать решение задачи (2)–(3) целесообразно с анализа полного множества вариантов G. В некоторых случаях это позволяет без процедуры разбиения установить факт несовместности системы ограничений или, по крайней мере, существенно сузить область дальнейшего поиска решений.

Вектор значений искомых переменных $x*$, являющийся оптимальным решением задачи (2)–(3), определяет комбинацию элементарных управляющих операций, которые необходимо реализовать в сложившейся ситуации с целью перевода ОУ в нормальное состояние. Отсутствие допустимых решений задачи (2)–(3) свидетельствует о противоречивости и, следовательно, практической непригодности экспертной модели ситуационного управления (1).

4. Выводы

По сравнению с существующими методами вывода управленческих решений на основе логико-лингвистических моделей изложенный метод обладает следующими преимуществами:

– уменьшением объемов обрабатываемой информации и, как следствие, сокращением продолжительности решения управленческих задач;

– способностью нахождения комплексных решений, предусматривающих одновременную реализацию нескольких элементарных управляющих операций;

– возможностью оптимизации управленческих решений по заданным критериям.

Приведенный алгоритм направленного перебора обладает свойством полноты, обусловленным тем, что ни одно из выделяемых подмножеств вариантов не исключается из поля рассмотрения до установления факта несовместности соответствующей ему системы ограничений.

Алгоритм реализован в среде Delphi 3.0 с использованием языка Object Pascal.

Описанный метод выработки управленческих решений ориентирован на использование в системах ситуационного управления кризисных центров аэропортов. Большинство управленческих задач, возникающих в кризисных ситуациях, вписывается в достаточно простую формальную схему (1), что и позволяет использовать для их решения алгоритм направленного перебора вариантов.

Распространение изложенного метода на более сложные случаи, когда приходится учитывать взаимное влияние друг на друга подсистем объекта управления, является перспективным направлением дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
2. Вагин В.Н. Дедукция и обобщение в системах принятия решений. – М.: Наука, 1988. – 384 с.
3. Литвиненко А.Е. Метод решения экстремальных комбинаторных задач с нелинейной структурой // Кибернетика. – 1983. – № 5. – С. 83 – 87.
4. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій. – К.: ЗАТ ВІТОЛ, 2000. – 687 с.