УДК 519.816(045)

А.Е. ЛИТВИНЕНКО

АЛГОРИТМЫ ВЫВОДА РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. Предложены унифицированные формы моделей представления знаний в экспертных системах управления. Доказано, что при количественном измерении характеристик состояния объекта управления задача вывода управленческого решения сводится к исследованию задачи комбинаторной оптимизации с линейной структурой и двусторонними ограничениями-неравенствами. Приведен алгоритм решения подобных задач, реализующий идею направленного перебора вариантов.

Ключевые слова: экспертные системы, управление, логические модели, алгоритмы, вывод решений, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение уровня сложности технических устройств и технологий, ускорение экономических и социально-политических процессов обусловили постепенную трансформацию современного общества информатизации в общество знаний. Это, в свою очередь, приводит к необходимости создания разнообразных по своему предназначению информационных систем с искусственным интеллектом, в частности, экспертных систем управления. В большинстве случаев математическая основа таких систем — логические модели представления знаний (модели управления) с соответствующими этим моделям алгоритмами логического вывода управленческих решений [1–10].

Практика показывает, что основные сложности при разработке подобных систем возникают именно на этапе построения логических моделей, поскольку единой методики их формирования в настоящее время не существует. Разнообразие форм моделей управления обусловливает дополнительные трудности, связанные с необходимостью разработки новых алгоритмов логического вывода, ориентированных на конкретную модель либо на ее адаптацию к структуре известных методов. В качестве последних чаще всего используется громоздкий и отличающийся информационной избыточностью метод резолюции Дж. Робинсона, первоначально предназначающийся для автоматического доказательства теорем [10].

В то же время сравнительный анализ логических моделей, используемых в различных экспертных системах управления, дает основание для построения некоторых математических конструкций, которые можно считать унифицированными формами представления знаний для широкого круга практических задач. Такие формы позволят упорядочить процедуру опроса экспертов, автоматизировать процесс формирования баз знаний, выбрать (или разработать) простые, но достаточно эффективные алгоритмы вывода управленческих решений.

ПРОСТЕЙШИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ

Наиболее простые логические модели управления строятся по схеме «ситуация» $\to$ «действие». При этом под ситуацией обычно понимают «набор значений признаков, описывающих состояние объекта управления (ОУ) в некоторый момент времени» [11], т.е. ситуация отождествляется с состоянием ОУ. Такая трактовка данного термина ограничивает область применения подобных моделей, поскольку выбор управляющего воздействия зависит не только от состояния ОУ, но и от того, какими ресурсами располагает система управления в момент принятия решения. Поэтому более конструктивна схема «ресурс» & «действие» $\rightarrow$ «результат», в которой «действие» — выполнение одной или нескольких управляющих операций, «ресурс» — средства, необходимые для реализации каждой такой операции, а требуемый «результат» определяется в зависимости от состояния ОУ.

Пусть $z = (z_i \,|\, i = \overline{1, m})$ — вектор характеристик состояния ОУ.

Логическую модель управления, построенную по описанной схеме, можно представить формулой

$$(\forall\, i = \overline{1, m})\ (\forall\, j \in J_i)\ [M_j^P \rightarrow D(z_i, a_{ij})], \tag{1}$$

где $M_j^P = R^P(r_j^P, s_j^P) \,\&\, X(u_j, r_j^P)$; $R^P(r_j^P, s_j^P) = \underset{p \in P_j}{\wedge} R(r_{jp}, s_{jp})$; J_i — множество номеров управляющих операций, выполнение которых приводит к изменению значения i-й характеристики состояния ОУ; u_j — идентификатор j-й управляющей операции; P_j — множество типов ресурсов, необходимых для реализации j-й управляющей операции; r_{jp} — идентификатор ресурса p-го типа, необходимого для реализации j-й управляющей операции; s_{jp} — показатель состояния ресурса r_{jp} (факт его наличия или количество); a_{ij} — показатель изменения значения характеристики z_i состояния ОУ под влиянием j-й управляющей операции; $R(r_{jp}, s_{jp})$ — предикат, который после настройки модели на ситуацию соответствует факту наличия (если $R(r_{jp}, s_{jp}) = 1$) или отсутствия (если $R(r_{jp}, s_{jp}) = 0$) ресурса p-го типа, необходимого для реализации управляющей операции u_j; $X(u_j, r_j^P)$ — предикат, означающий выполнение (при $X(u_j, r_j^P) = 1$) управляющей операции u_j с использованием всех необходимых ресурсов r_{jp}, $p \in P_j$; $D(z_i, a_{ij})$ — предикат, показывающий изменение (при $D(z_i, a_{ij}) = 1$) значения i-й характеристики состояния ОУ в результате реализации управляющей операции u_j.

Пусть $(z_i^{(1)}, z_i^{(2)})$ — диапазон допустимых значений характеристики z_i, $i = \overline{1, m}$, а z_{i^*} — значение характеристики состояния ОУ, находящееся за пределами допустимого диапазона: $z_{i^*} \notin (z_{i^*}^{(1)}, z_{i^*}^{(2)})$, $1 \le i^* \le m$.

Алгоритм отыскания управляющей операции, способной привести значение характеристики z_{i^*} в допустимый диапазон, предусматривает выполнение следующих действий.

1. Формирование множества номеров управляющих операций, способных привести значение данной характеристики в допустимый диапазон $J_{i^*}^D = \{ j \in J_{i^*} : z_{i^*}^{(1)} \le z_{i^*} + a_{i^*, j} \le z_{i^*}^{(2)} \}$. Если $J_{i^*}^D = \varnothing$, вычисления прекращаются, в противном случае выполняется п. 2 данного алгоритма.

2. Формирование подмножества номеров управляющих операций, входящих в состав множества $J_{i^*}^D$, для реализации которых имеются необходимые ресурсы: $J_{i^*}^R = \{ j \in J_{i^*}^D : R^P(r_j^P, s_j^P) = 1 \}$. Если $J_{i^*}^R = \varnothing$, вычисления прекращаются, в противном случае выполняется п. 3 данного алгоритма.

3. Выбор управляющей операции u_{j^*}, $j^* \in J_{i^*}^R$, подлежащей реализации.

Если подмножество $J_{i^*}^R$ состоит из единственного элемента j^*, то именно он и определяет управляющую операцию u_{j^*}, подлежащую реализации. При $|J_{i^*}^R|>1$ для реализации выбирается наиболее предпочтительная (по заданному критерию) управляющая операция u_{j^*}, $j^* \in J_{i^*}^R$.

Если $J_{i^*}^D = \varnothing$, то модель (1) не предусматривает ни одной управляющей операции, которая без привлечения других операций может привести значения характеристики z_{i^*} в допустимый диапазон. В этом случае целесообразно рассматривать возможность одновременной реализации нескольких управляющих операций u_j, $j \in J_{i^*}$, приводящих к изменению значения рассматриваемой характеристики.

Если $J_{i^*}^R = \varnothing$, то ни для одной управляющей операции, способной привести значение характеристики z_{i^*} в допустимый диапазон, не существует необходимых ресурсов. В такой ситуации задача не имеет решений.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМБИНАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ ЕДИНСТВЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Логическая модель управления для случая одновременного выполнения нескольких операций в целях изменения значения единственной характеристики состояния ОУ строится по формуле

$$(\forall\, i = \overline{1, m})[\bigvee_{j \in J_i} M_j^P \to D(z_i, a_{ij})]. \qquad (2)$$

Алгоритм отыскания комбинации управляющих операций для приведения в допустимый диапазон значения единственной характеристики состояния ОУ предусматривает последовательное выполнение следующих действий.

1. Формирование множества номеров управляющих операций, способных изменять (увеличивать или уменьшать) значения характеристики z_{i^*} состояния ОУ, для реализации которых имеются необходимые ресурсы $J_{i^*}^R = \{j \in J_{i^*} : R^P(r_j^P, s_j^P) = 1\}$. Если $J_{i^*}^R = \varnothing$, то модель (2) не предусматривает возможности требуемого изменения значения характеристики z_{i^*} в сложившейся ситуации ввиду отсутствия необходимых ресурсов. В этом случае вычисления прекращаются. Если $J_{i^*}^R \neq \varnothing$, то выполняется п. 2 данного алгоритма.

2. Определение комбинации управляющих операций, реализация которых способна привести значение характеристики z_{i^*} состояния ОУ в диапазон допустимых значений.

Данная задача комбинаторная. Поэтому ее решение базируется на построении алгебраической модели, адекватной логической модели (2), с учетом состава подмножества $J_{i^*}^R$ управляющих операций, предназначенных для изменения значения характеристики z_{i^*} состояния ОУ и имеющих необходимые для этого ресурсы.

Для построения такой алгебраической модели каждому предикату $X(u_j; r_j^P)$ ставится в соответствие булева переменная $x_j \in \{0, 1\}$, $j \in J_{i^*}^R$, после чего формируется двустороннее неравенство

$$z_{i^*}^{(1)} \le z_{i^*} + \sum_{j \in J_{i^*}^R} a_{i^*, j}\, x_j \le z_{i^*}^{(2)}. \qquad (3)$$

Смысл булевых переменных заключается в следующем: если в результате решения неравенства (3) оказывается, что некоторая переменная $x_{j'} = 1$, то управляющая операция $u_{j'}$ подлежит реализации; при $x_{j'} = 0$ данное утверждение несправедливо, $j' = J_{i^*}^R$. Для решения двустороннего неравенства (3) можно использовать описанный далее алгоритм, реализующий стратегию направленного перебора вариантов.

ПОБОЧНЫЙ ЭФФЕКТ

Побочный эффект может проявляться в том, что управляющие операции $j \in J_{i^*}^R$, реализуемые в целях приведения значения какой-либо характеристики z_{i^*} в допустимый диапазон, могут повлечь недопустимые изменения значений других характеристик z_i, $i \in I_1^E(i^*)$, состояния ОУ, где $I_1^E(i^*) = \{i \in \{1, \ldots, m\} \setminus \{i^*\} : J_{i^*}^R \cap J_i^R \neq \varnothing\}$. Чтобы этого не произошло, неравенство (3) необходимо дополнить аналогичными выражениями, относящимися к каждой из характеристик z_i, $i \in I_1^E(i^*)$, в отдельности.

В свою очередь, реализация управляющих операций, компенсирующих негативные изменения значений характеристик z_i, $i \in I_1^E(i^*)$, может привести к недопустимым отклонениям другой группы характеристик состояния ОУ z_i, $i \in I_2^E(i^*)$, не связанных общими управляющими операциями непосредственно с характеристикой z_{i^*}, и т.д.

Для определения полного множества $I^E(i^*)$ характеристик состояния ОУ, которые могут изменить свои значения в результате выполнения управляющих операций, направленных на приведение значения характеристики z_{i^*} в допустимый диапазон, используется следующая пошаговая процедура.

Вначале принимается $I_0^E(i^*) = \{i^*\}$; $J_0^E(i^*) = J_{i^*}^R$. Далее на каждом l-м шаге последовательно определяются множества

$$I_l^E(i^*) = \{i \in \{1, \ldots, m\} : J_i^R \cap J_{l-1}^R(i^*) \neq \varnothing\};$$

$$J_l^R(i^*) = \bigcup_{i \in I_l^E(i^*)} J_i^R, \; l = 1, 2, \ldots$$

Процедура завершается, если $J_l^R(i^*) = J_{l-1}^R(i^*)$ или, что эквивалентно, $I_l^E(i^*) = I_{l-1}^E(i^*)$.

Сформированное описанным способом множество $I^E(i^*) = I_l^E(i^*)$ содержит номера всех характеристик состояния ОУ (включая z_{i^*}), значения которых могут изменяться в результате выполнения управляющих операций, направленных на приведение значения характеристики z_{i^*} в допустимый диапазон.

С учетом побочного эффекта логическая модель управления имеет вид

$$(\forall i^* = \overline{1, m})[\bigvee_{j \in J_{i^*}} M_j^P \to \bigwedge_{i \in I^E(i^*)} D(z_i, a_{ij})]. \tag{4}$$

В систему двусторонних неравенств, соответствующую данной логической модели, включаются выражения, аналогичные по своей структуре выражениям (3), но сформированные для всех значений $i \in I^E(i^*)$. Для решения этой системы, определяющего комбинацию управляющих операций, способных привести значения характеристики z_{i^*} в допустимый диапазон, можно использовать приведенный далее алгоритм, реализующий стратегию направленного перебора вариантов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМБИНАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ МНОЖЕСТВА ХАРАКТЕРИСТИК

Пусть I^* — множество номеров характеристик состояния ОУ, значения которых находятся вне допустимых диапазонов. При отсутствии побочного эффекта логическую модель управления можно представить в виде (2), а при его наличии — в виде (4). Соответствующие системы неравенств формируются из выражений вида (3), записываемых в первом случае отдельно для каждого $i \in I^*$, а во втором — для каждого $i \in I^E(I^*)$, где $I^E(I^*)$ — множество номеров всех характеристик состояния ОУ, значения которых могут изменяться в результате управляющих операций, реализуемых в целях приведения совокупности значений характеристик z_i, $i \in I^*$, в допустимый диапазон.

Для определения множества $I^E(I^*)$ используется описанная ранее пошаговая процедура, при выполнении которой вначале принимается $I_0^E(I^*) = I^*$; $J_0^E(I^*) = \bigcup_{i \in I^*} J_{i^*}^R$. Далее на каждом l-м шаге последовательно определяются множества

$$I_l^E(I^*) = \{i \in \{1, \ldots, m\} : J_i^R \cap J_{l-1}^R(I^*) \neq \varnothing\};$$

$$J_l^R(I^*) = \bigcup_{i \in I_l^E(I^*)} J_i^R, \; l = 1, 2, \ldots$$

Процедура завершается нахождением множества $I_l^E(I^*) = I_{l-1}^E(I^*) = I^E(I^*)$.

Задача отыскания комбинации управляющих операций, способных привести ОУ в нормальное состояние, многовариантная и, следовательно, оптимизационная. Поэтому в математическую модель данной задачи, помимо системы двусторонних неравенств (3), необходимо включить критериальную функцию

$$f(x) = \sum_{j \in J^X} c_j x_j, \tag{5}$$

где J^X — множество идентификаторов рассматриваемых управляющих операций, $J^X = \bigcup_{i \in I^X} J_i^R$; I^X — множество номеров характеристик состояния ОУ, такое что $I^X = I^*$ при отсутствии побочного эффекта и $I^X = I^E(I^*)$ — при его наличии; c_j, $j \in J^X$, — коэффициенты, показывающие степень предпочтения тех или иных управляющих операций (например, затраты на их реализацию, технологические преимущества и т. п.); x — вектор независимых булевых переменных: $x = (x_j | j \in J^X)$, $x_j \in \{0, 1\}$, $j \in J^X$. Поскольку минимум функции $f(x)$ достигается при тех же значениях аргументов, что и максимум противоположной ей по знаку функции, в дальнейшем, не теряя общности, считаем, что критериальную функцию (5) необходимо максимизировать.

Систему двусторонних ограничений-неравенств целесообразно представить в более компактной форме

$$b_i^{(1)} \le \sum_{j \in J_i^R} a_{ij} x_j \le b_i^{(2)}, \ i \in I^X, \tag{6}$$

где $b_i^{(1)} = z_i^{(1)} - z_i$; $b_i^{(2)} = z_i^{(2)} - z_i$, $i \in I^X$.

В формальной постановке задача сводится к отысканию вектора значений булевых переменных $x = (x_j \mid j \in J^X)$, обращающих в максимум критериальную функцию (5) при соблюдении системы ограничений-неравенств (6).

Рассматриваемая задача имеет линейную структуру и относится к задачам комбинаторной оптимизации. Для ее решения можно использовать алгоритм, реализующий идею направленного перебора вариантов, адаптированный к структуре системы двусторонних ограничений-неравенств [9]. Метод направленного перебора предусматривает последовательное дробление полного множества G вариантов решения задачи, проводимое до тех пор, пока не устанавливается оптимальный план или факт несовместности системы ограничений. Получаемые в результате разбиения новые подмножества вариантов подвергаются формальному анализу в целях снижения объемов обрабатываемой информации, сокращения количества шагов алгоритма, приводящих к искомому результату, и, как следствие, минимизации продолжительности решения задачи. Такой эффект достигается за счет выявления и исключения из дальнейшего рассмотрения подмножеств, не содержащих допустимых планов, удаления из математической модели ограничений, утративших свойство активности по отношению к планам рассматриваемого подмножества вариантов, а также за счет установления безальтернативных переменных и присваивания им единственных допустимых значений.

Предположим, к началу некоторого этапа решения задачи (5), (6) в полном множестве G вариантов выделены λ непересекающихся подмножеств G_k, $k = \overline{1, \lambda}$, содержащих допустимые планы. Пусть $J_k^1 \subseteq J^X$ — множество номеров независимых переменных, получивших в планах k-го подмножества вариантов значение 1, а $J_k \subseteq J^X$ — множество номеров переменных, значения которых в G_k не зафиксированы. Аналогичные множества, относящиеся к критериальной функции (5) и каждому ограничению системы (6), определяются по формулам

$$J_{0k}^1 = J^X \cap J_k^1; \ J_{0k} = J^X \cap J_k; \ J_{ik}^1 = J_i^R \cap J_k^1; \ J_{ik} = J_i^R \cap J_k, \ i \in I^X.$$

Модель (5), (6), приведенная в соответствие k-му подмножеству вариантов, имеет вид

$$f_k(x) = \sum_{j \in J_{0k}^1} c_j + \sum_{j \in J_{0k}} c_j x_j \to \max, \tag{7}$$

$$b_{ik}^{(1)} \le \sum_{j \in J_{ik}} a_{ij} x_j \le b_{ik}^{(2)}, \ i \in I_k, \tag{8}$$

где $x = (x_j \mid j \in J_k)$, $x_j \in \{0, 1\}$, $j \in J_k$; $b_{ik}^{(p)} = b_i^{(p)} - \sum_{j \in J_{ik}^1} a_{ij}$, $p \in \{1, 2\}$, $i \in I_k$;

I_k — множество номеров ограничений системы (8), активных по отношению к планам подмножества вариантов G_k.

Для анализа модели (7), (8) на множествах J_{0k} и J_{ik}, $i \in I_k$, выделяются следующие подмножества: $J_{0k}^3 = \{j \in J_{0k} : c_j > 0\}$ — множество номеров независимых переменных, входящих в критериальную функцию (7) с положительными коэффициентами; $J_{ik}^2 = \{j \in J_{ik} : a_{ij} < 0\}$ и $J_{ik}^3 = \{j \in J_{ik} : a_{ij} > 0\}$ — множества номеров независимых переменных, которые входят в *i*-е ограничение системы (8) с отрицательными и положительными коэффициентами соответственно; $J_{ik}^2(j') = \{j'\} \bigcup \{j \in J_{ik}^2 : a_{ij} \le a_{ij'}\}$ — множество номеров независимых переменных, входящих в *i*-е ограничение системы (8) с отрицательными коэффициентами, не превышающими значения $a_{ij'}$; $J_{ik}^3(j'') = \{j''\} \bigcup \{j \in J_{ik}^3 : a_{ij} \ge a_{ij''}\}$ — множество номеров независимых переменных, которые входят в *i*-е ограничение системы (8) с положительными коэффициентами, не меньшими, чем $a_{ij''}$.

Пусть $\sigma_{ik}^{(2)}$ и $\sigma_{ik}^{(3)}$ — суммы отрицательных и положительных коэффициентов *i*-го ограничения системы (8) соответственно: $\sigma_{ik}^{(p)} = \sum_{j \in J_{ik}^p} a_{ij}$, $p \in \{2, 3\}$, $i \in I_k$.

Предполагается, что $\sigma_{ik}^{(p)} = 0$, если $J_{ik}^p = \varnothing$, $p \in \{2, 3\}$.

Свойства k-го ($k = \overline{1, \lambda}$) подмножества вариантов решения задачи (5), (6) формулируются в виде следующих утверждений.

Утверждение 1. Подмножество G_k не содержит допустимых планов, если для некоторого ограничения $i \in I_k$ выполняется условие $(\sigma_{ik}^{(3)} < b_{ik}^{(1)}) \vee (\sigma_{ik}^{(2)} > b_{ik}^{(2)})$.

Утверждение 2. Ограничение $i \in I_k$ не является активным по отношению к планам подмножества G_k, если для него выполняется условие $(\sigma_{ik}^{(2)} \ge b_{ik}^{(1)}) \vee \vee (\sigma_{ik}^{(3)} \le b_{ik}^{(2)})$.

Утверждение 3. Если $J_{ik}^3 \ne \varnothing$ и для некоторого $j'' \in J_{ik}^3$ выполняется условие $\sigma_{ik}^{(3)} \ge b_{ik}^{(1)} > \sigma_{ik}^{(3)} - a_{ij''}$, то из дополняющих планов подмножества G_k допустимыми могут быть лишь те, в которых $[\forall\, j \in J_{ik}^3(j'')](x_j = 1)$.

Утверждение 4. Если $J_{ik}^2 \ne \varnothing$ и для некоторого $j' \in J_{jk}^2$ выполняется условие $\sigma_{ik}^{(2)} \le b_{ik}^{(2)} < \sigma_{ik}^{(2)} - a_{ij'}$, то из дополняющих планов подмножества G_k допустимыми могут быть лишь те, в которых $[\forall\, j \in J_{ik}^2(j')](x_j = 1)$.

Утверждение 5. Если $J_{ik}^2 \ne \varnothing$ и для некоторого $j' \in J_{ik}^2$ выполняется условие $\sigma_{ik}^{(3)} \ge b_{ik}^{(1)} > \sigma_{ik}^{(3)} + a_{ij'}$, то из дополняющих планов подмножества G_k допустимыми могут быть лишь те, в которых $[\forall\, j \in J_{ik}^2(j')](x_j = 0)$.

Утверждение 6. Если $J_{ik}^3 \ne \varnothing$ и для некоторого $j'' \in J_{ik}^3$ выполняется условие $\sigma_{ik}^{(2)} \le b_{ik}^{(2)} < \sigma_{ik}^{(2)} + a_{ij''}$, то из дополняющих планов подмножества G_k допустимыми могут быть лишь те, в которых $[\forall\, j \in J_{ik}^3(j'')](x_j = 0)$.

Алгоритм направленного перебора вариантов предусматривает выполнение на каждом этапе решения задачи (5), (6) следующей последовательности действий.

1. Выбор подмножества вариантов, подлежащего дальнейшему разбиению, для чего выбирается подмножество G_{k^*}, которому соответствует максимальная оценка критериальной функции $\xi(G_{k^*}) = \max\{\xi(G_k), k = \overline{1, \lambda}\}$, где $\xi(G_k) = \sum_{j \in J_{0k}^1} c_j + \sum_{j \in J_{0k}^3} c_j$.

2. Выбор переменной x_{j^*}, $j^* \in J_{0k^*}$, значения которой подлежат фиксации и которая входит в критериальную функцию $f_{k^*}(x)$ с максимальным коэффициентом $c_{j^*} = \max\{c_j; j \in J_{0k^*}\}$.

3. Разбиение подмножества вариантов на два непересекающихся подмножества. С помощью фиксации значений выбранной переменной x_{j^*} подмножество G_{k^*} разбивается на два непересекающихся подмножества: $G_{k^*}^0$ и $G_{k^*}^1$. В планах первого из них $x_{j^*} = 0$, в планах второго $x_{j^*} = 1$.

4. Анализ подмножеств вариантов $G_{k^*}^0$ и $G_{k^*}^1$. Процедура анализа любого k-го подмножества вариантов решения задачи комбинаторной оптимизации заключается в последовательной проверке выполнения условий каждого сформулированного утверждения для всех ограничений системы (8). В зависимости от результатов этой проверки в цикле анализа осуществляется определенная последовательность действий.

Если для некоторого ограничения $i \in I_k$ выполняется условие утверждения 1, подмножество G_k исключается из дальнейшего рассмотрения.

Ограничения $i \in I_k$, для которых выполняется условие утверждения 2, удаляются из системы (8), а их номера — из состава множества I_k. Скорректированное таким образом множество номеров ограничений, активных по отношению к дополняющим планам подмножества вариантов G_k, будем обозначать I'_k.

Если для i-го ограничения $(i \in I'_k)$ выполняется условие одного из утверждений 3–6, то указанным в них безальтернативным переменным присваиваются единственные допустимые значения. Эти значения подставляются во все ограничения $i \in I'_k$, после чего осуществляется повторный цикл анализа подмножества G_k.

Проверку выполнения условий утверждений 3–6 для очередного i-го ограничения $(i \in I'_k)$ рекомендуется начинать, рассматривая в качестве $a_{ij'}$ и $a_{ij''}$ минимальный (отрицательный) и максимальный (положительный) коэффициенты соответственно $a_{ij'} = \min\{a_{ij}, j \in J_{ik}^2\}$ и $a_{ij''} = \max\{a_{ij}, j \in J_{ik}^3\}$. Впоследствии, если при таком выборе $a_{ij'}$ и $a_{ij''}$ условия указанных утверждений выполняются, в качестве этих параметров целесообразно использовать соответственно

$$a_{ij''} = \min\{a_{ij}, j \in J_{ik}^3 : \sigma_{ik}^{(3)} - a_{ij''} \geq b_{ik}^{(1)}\},$$

$$a_{ij'} = \max\{a_{ij}, j \in J_{ik}^2 : \sigma_{ik}^{(2)} - a_{ij'} \leq b_{ik}^{(2)}\},$$

$$a_{ij'} = \max\{a_{ij}, j \in J_{ik}^2 : \sigma_{ik}^{(2)} - a_{ij'} \geq b_{ik}^{(1)}\},$$

$$a_{ij''} = \min\{a_{ij}, j \in J_{ik}^3 : \sigma_{ik}^{(3)} - a_{ij''} \leq b_{ik}^{(2)}\}.$$

Такой выбор параметров $a_{ji'}$ и $a_{ji''}$ обеспечивает отсечение от G_k наибольших по мощности подмножеств вариантов, не содержащих допустимых планов.

Процедура анализа подмножества вариантов G_k завершается, если доказывается, что оно не содержит допустимых планов; система ограничений (8) не содержит активных ограничений $(I'_k = \varnothing)$; в результате присваивания значений безальтернативным переменным формируется полный допустимый план x; в последнем цикле анализа данного подмножества ни одной из безальтернативных переменных не присваиваются конкретные значения.

После завершения процедуры анализа подмножеств $G_{k^*}^0$ и $G_{k^*}^1$ оставшиеся в поле рассмотрения подмножества вариантов заново нумеруются числами натурального ряда от 1 до λ'. Очевидно, что $\lambda' = \lambda - 1$, если оказывается, что оба подмножества: $G_{k^*}^0$ и $G_{k^*}^1$, не содержат допустимых планов; $\lambda' = \lambda$, если допустимые планы отсутствуют лишь в одном из них; $\lambda' = \lambda + 1$, если факт отсутствия допустимых планов не установлен ни для одного из рассмотренных подмножеств вариантов.

Вычислительный процесс завершается в двух случаях: если доказывается факт несовместности системы ограничений (6), о чем свидетельствует равенство $\lambda' = 0$; если отыскивается вектор значений искомых переменных x^*, придающий критериальной функции (5) значение, не меньшее из возможных, $f(x^*) \geq \max \{\xi(G_k),\ k = \overline{1, \lambda'}\}$.

Начинать решение целесообразно с анализа полного множества G вариантов. В определенных случаях это позволяет априорно установить факт несовместности системы ограничений (7) или отсечь от G подмножество вариантов, не содержащее допустимых планов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные унифицированные формы логических моделей позволяют свести задачи принятия решений в экспертных системах управления к исследованию математических моделей задач комбинаторной оптимизации. Подобные задачи относятся к NP-классу. Это означает, что теоретическая оценка продолжительности их решения в лучшем случае экспоненциально зависит от размерности математической модели. Однако анализ подмножеств вариантов, основанный на сформулированных утверждениях, позволяет существенно сократить количество шагов алгоритма, приводящих к конечному результату, и тем самым уменьшить затраты машинного времени. Практика показывает, что выявление и отсеивание подмножеств вариантов, не содержащих допустимых планов, исключение из дальнейшего рассмотрения ограничений, утративших свойство активности, в сочетании с присваиванием единственных допустимых значений безальтернативным независимым переменным обеспечивают высокую степень целенаправленности поиска и нахождение искомого управленческого решения за приемлемое время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Logman M. The LOGMAN model: A logical brand management model. *Journal of Product & Brand Management.* 2004. Vol. 13, N 2. P. 94–104. https://doi.org/10.1108/10610420410529726.
2. Giblin C., Liu Alice Y., Müller S., Pfitzmann B., Zhou X. Regulations expressed as logical models (REALM). In: *Proc. of the 2005 conference on Legal Knowledge and Information Systems: JURIX 2005. The Eighteenth Annual Conference*. 2005. P. 37–48.
3. Мейтус В.Ю. Проблемы построения интеллектуальных систем. Уровни интеллекта. *Кибернетика и системный анализ.* 2018. Т. 54, № 4. С 32–44.
4. Хиленко В.В., Стржелецки Р., Котуляк И. Решение проблемы динамической адаптивности систем искусственного интеллекта, осуществляющих управление динамическими техническими объектами. *Кибернетика и системный анализ*. 2018. Т. 54, № 6. С 18–26.
5. Анисимов А.В., Марченко А.А., Землянский В.Р. Эволюционный метод построения систем искусственного интеллекта. *Кибернетика и системный анализ*. 2019. Т. 55, № 1. С 3–13.

6. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. Москва: Вильямс, 2007. 1152 с.
7. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. Москва: Наука, 2006. 333 с.
8. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. Москва: Вильямс, 2007. 1410 с.
9. Литвиненко А.Е. Метод направленного перебора в системах управления и диагностирования. Київ: Наук.-вид. центр НБУВ. 2007. 328 с.
10. Вагин В.Н. Дедукция и обобщение в системах принятия решений. Москва: Наука, 1988. 384 с.
11. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. Москва: Наука, 1990. 272 с.

Надійшла до редакції 18.04.2019

О.Є. Литвиненко

АЛГОРИТМИ ВИВЕДЕННЯ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ УНІФІКОВАНИХ ЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ КЕРУВАННЯ

Анотація. Запропоновано уніфіковані форми моделей представлення знань в експертних системах керування. Доведено, що за кількісного вимірювання характеристик стану об'єкта керування задача виведення управлінського рішення зводиться до дослідження задачі комбінаторної оптимізації з лінійною структурою і двосторонніми обмеженнями-нерівностями. Наведено алгоритм розв'язання подібних задач, який реалізує ідею спрямованого перебору варіантів.

Ключові слова: експертні системи, керування, логічні моделі, алгоритми, виведення рішень, оптимізація.

A. Litvinenko

ALGORITHMS FOR SOLUTIONS INFERENCE BASED ON UNIFIED LOGICAL CONTROL MODELS

Abstract. Unified forms of knowledge representation models in expert control systems are proposed. It is proved that at quantitative measurement of the characteristics of the state of the controlled object, the task of deriving a control solution is reduced to the investigation of a combinatorial optimization problem with a linear structure and two-sided inequality constraints. An algorithm for solving such problems is given, which implements the idea of directional selection of variants.

Keywords: expert systems, control, logical models, algorithms, inference of decisions, optimization.

Литвиненко Александр Евгеньевич,
доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Национального авиационного университета, Киев, e-mail: litvinen@nau.edu.ua.