

Дальнейшие наши рассуждения совпадают с выводами [6], т.е. имеет место

Утверждение 2. Пусть $\varepsilon > 0$. Если $u_{+\varepsilon}, u, u_{-\varepsilon}$ — суть решения соответствующих краевых задач

$$-(pu'_{+\varepsilon})' + ru_{+\varepsilon} = f + \varepsilon, \quad (41)$$

$$-(pu')' + ru = f, \quad (42)$$

$$-(pu'_{-\varepsilon})' + ru_{-\varepsilon} = f - \varepsilon \quad (43)$$

с однородными краевыми условиями, то

$$u_{-\varepsilon} < u < u_{+\varepsilon}. \quad (44)$$

Теорию двойственности мы привлекаем с одной целью — для достоверности соблюдения строгих неравенств типа (44).

Зададимся двумя положительными числами ε и ξ , причем $\varepsilon \gg \xi$. После этого с привлечением теории двойственности решаем последовательно три задачи (41)-(43) с точностью ξ (в метрике гильбертова пространства H_A) до выполнения условия (29):

$$|u_n - u_0| \leq \sqrt{J^+(u_n) - J^-(v_n)} < \xi.$$

Строгость неравенств (44) контролируется в процессе счета по мере стремления ε и ξ к нулю.

Литература: 1. Михлин С.Г. Проблема минимума квадратичного функционала. М.-Л.: ГИТТЛ, 1952. 216 с. 2. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. М.: Наука, 1970. 512 с. 3. Ректорис К. Вариационные методы в математической физике и технике. М.: Мир, 1985. 590 с. 4. Калиниченко В.И., Коцый А.Ф., Ропавка А.И. Численные решения задач

теплопроводности. Харьков: Вища шк., 1987. 112 с. 5. Канторович В.Л., Крылов В.И. Функциональный анализ. М.: Наука, 1977. 742 с. 6. Калиниченко В.И., Пан Н.П., Сова А.В. Верхние и нижние приближения в первой краевой задаче для самосопряженных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка // Коммунальное хозяйство городов. 2000, №23. С.228-237. 7. Наймарк М.А. Линейные дифференциальные операторы. М.: Наука, 1969. 528 с.

Поступила в редколлегию 21.05.2001

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Гнесин В.И.

Калиниченко Виталий Иванович, канд. физ.-мат. наук, научный руководитель ВЦ Харьковского национального университета им. В.Н.Каразина. Научные интересы: численные методы в краевых задачах математической физики. Адрес: Украина, 61111, Харьков, ул. Познанская, 8, кв.83, тел. 63-21-65.

Пан Николай Павлович, начальник информационно-вычислительного центра Харьковской государственной академии городского хозяйства. Научные интересы: сети ЭВМ, системы управления базами данных. Адрес: Украина, 61110, Харьков, пр.Тракторостроителей, 108, кв.153, тел.47-65-00.

Афанасьев Вадим Алексеевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики ХНУРЭ. Научные интересы: специальные функции математической физики. Адрес: Украина, 61168, Харьков, ул.Героев труда, 10, кв.24. тел.68-15-05.

Сова Анна Васильевна, канд. физ.-мат. наук, профессор кафедры высшей математики ХНУРЭ. Научные интересы: радиоэлектроника, распределение радиоволн. Адрес: Украина, 61204, Харьков, ул. Асхарова, 15-А, кв.22, тел.37-18-31.

УДК 681.3.06

УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ

ШОСТАК В.Ф., ШОСТАК И.В., КУЗЬМЕНКО О.Ю.

Рассматривается проблема управления в реальном времени сложными объектами с неполной априорной информацией. Предлагается концепция интеллектуальных интегрированных систем, сочетающих преимущества традиционных и интеллектуальных методов управления. Описывается особая стратегия вывода на знаниях, позволяющая учесть неопределенность состояния объекта в достаточно удаленные от текущего моменты времени.

В процессе функционирования сложных объектов часто возникают нештатные режимы, которые могут приводить к авариям, катастрофам и, как следствие, к чрезвычайным ситуациям (ЧС).

Предупреждение, преодоление и ликвидация последствий ЧС представляет собой ряд взаимосвязанных проблем, охватывающих вопросы возникнове-

ния и развития ЧС, а также комплекс мероприятий организационного и технологического характера, направленных на борьбу с ЧС. Указанные проблемы сравнительно мало изучены, их развитие, как правило, невозможно точно предсказать, что приводит к большим трудностям при их ликвидации.

ЧС принято рассматривать как слабоструктурированный нестационарный объект, обладающий рядом проблематичных для традиционного управления свойств, таких как уникальность, определяемая конкретными условиями возникновения и развития ЧС, высокая динамичность, неполнота описания объекта, индивидуальность лица, принимающего решения (ЛПР), проявляющаяся в ходе формирования и принятия решения. Процесс развития ЧС подвержен многочисленным внешним и параметрическим возмущениям, о которых обычно имеется неполная априорная информация. Управление в ЧС требует учета большого числа взаимосвязанных параметров, изменение которых, как правило, носит стохастический и нечеткий характер.

В этих условиях разработка адекватной математической модели и, следовательно, применение традиционных методов идентификации ЧС в целом как объекта управления представляет значительные трудности. Кроме того, при использовании традиционных методов весьма затруднительно учесть

и использовать эвристические и интуитивные алгоритмы, накопленные специалистами в области ликвидации ЧС в результате многолетней практической деятельности. Вместе с тем управление в таких организационно-технических системах, как ЧС, является сложным творческим процессом, где ключевая роль принадлежит ЛПР.

У ЛПР подсознательно, на основе опыта формируется собственная система предпочтений относительно критерия управления в условиях ЧС, ограничений и релевантности отдельных параметров, которая зачастую не согласуется (частично или полностью) с традиционной технологией ликвидации ЧС (например, тушение лесного пожара).

В связи с этим особый интерес представляет проблема создания систем управления ликвидацией ЧС, в которых наряду с традиционными методами будут реализованы методы искусственного интеллекта, способные учитывать и обобщать знания и опыт многих специалистов.

Такие системы могут быть построены в форме интеллектуальной интегрированной системы поддержки принятия решений (ИИСППР), имеющей двухуровневую иерархическую структуру. На нижнем уровне ИИСППР реализуются традиционные методы управления, а верхний уровень представляет собой динамическую экспертную систему (ДЭС).

ИИСППР пригодна для решения следующих важных проблем, связанных с ликвидацией ЧС:

- 1) учет уникальности возникновения и протекания конкретной ЧС в процессе управления ее ликвидацией;
- 2) использование при формировании управляющих воздействий всей необходимой информации о состоянии ЧС и окружающей среды;
- 3) обработка в реальном времени больших объемов необходимой информации;
- 4) обобщение в базе знаний опыта экспертов, полученного ими в процессе многолетней работы, включая их интуитивные представления о процессах ликвидации ЧС.

ИИСППР включает следующие основные функциональные модули: блок мониторинга переменных объекта; базу данных (БД) значений переменных объекта; блок реализации традиционных методов управления; базу знаний (БЗ); модуль отражения текущего состояния объекта в БЗ; модуль вывода на знаниях (ВНЗ); подсистему объяснений; интерфейс с пользователем (ЛПР); подсистему приобретения знаний.

В данной системе в общем случае реализуются три информационных контура обратной связи с объектом: традиционный контур управления, включающий систему мониторинга, БД, средства реализации традиционных методов; интеллектуальный контур управления, охватывающий БД, модуль отражения текущего состояния объекта в БЗ, ДЭС и ЛПР; экспертный контур управления, в состав которого входят эксперты вместе с источниками информации, подсистема приобретения знаний,

ДЭС, ЛПР и система реализации управления на объекте.

По признаку быстродействия эти контуры могут быть упорядочены в иерархическую структуру, у которой нижний уровень занимает самый быстрый, традиционный контур. Более медленный интеллектуальный контур занимает второй уровень. На верхнем же уровне размещается самый медленно действующий экспертный контур, позволяющий отображать в БЗ научные достижения в соответствующей отрасли, а также обобщать собственный опыт функционирования интеллектуальной системы управления. Очевидно, что верхний уровень имеет возможность корректировать работу нижнего уровня, поскольку он использует больший объем знаний для решения задач в соответствующей отрасли.

Функционирование указанных контуров обеспечивает ряд преимуществ рассмотренной системы управления:

- высокую эффективность принимаемых решений за счет максимального использования существующей в БЗ экспертной информации;
- возможность применения в ДЭС интуитивных представлений экспертов в виде нечетких знаний;
- совместное использование традиционных технологий принятия решений и интеллектуальных методов, что обеспечивает повышение быстродействия и эффективности работы системы.

Особое значение имеет тот факт, что алгоритмы и методы работы интеллектуального и экспертного контуров в системе мало зависят от области применения ИИСППР, благодаря чему возможно создание унифицированных инструментальных программных средств, пригодных для разработки интеллектуальных систем управления разнообразными объектами. При создании ИИСППР на основе ДЭС возникает ряд новых проблем, в числе которых:

- 1) отражение в БЗ в реальном времени текущего состояния объекта и окружающей среды;
- 2) сокращение времени ВНЗ;
- 3) управление объектом в условиях неполной информации.

Проблема отражения текущего состояния объекта в БЗ продукционного типа решена в работе [1] путем создания специального интерфейса между БД, содержащей данные мониторинга, и БЗ, в которой размещены знания экспертов. Конструктивно такой интерфейс представляет собой фрагмент БЗ, включающий совокупность метаправил, которые, с одной стороны, отражают состав БД, наполняемый системой мониторинга, а с другой – структуру продукционной БЗ, определяемой переменными, входящими в состав предикатов antecedентов правил продукции БЗ.

Сокращение времени вывода на знаниях достигается путем динамической декомпозиции БЗ и выделения в каждый момент времени функционирования объекта только тех правил, которые могут быть использованы для формирования решения в текущий момент времени [1].

Одной из наиболее актуальных проблем при управлении процессом ликвидации ЧС является формирование управляющих воздействий при неполной априорной информации о возмущениях, которые будут действовать на объект в достаточно удаленные от текущего моменты времени. Специфика стратегий ВНЗ (прямой и обратной) [3] не позволяет непосредственно использовать их при управлении объектом с неполной информацией в реальном времени. Результатом прямого ВНЗ в БЗ является последовательность управляющих операций $\{D(\tau)\}$, $\tau \in T$, $\nu \in V$, каждая из которых начинается в определенный момент реального времени τ на временном интервале T решения задачи для достижения цели функционирования системы (выполнения целевых предикатов). Особенность этой стратегии состоит в том, что в сформированные решения могут быть включены управляющие операции, совсем не связанные с целевыми предикатами. Кроме этого, по мере удаления в будущее от текущего момента реализации решения τ^* направленность прямого ВНЗ на удовлетворение целевых предикатов дополнительно ухудшается вследствие ошибок прогнозирования случайных возмущений, которые влияют на результат ВНЗ. Поэтому решение, полученное прямым ВНЗ, может, в общем случае, содержать излишние управляющие операции, выполнение которых не является обязательным для достижения целей функционирования системы.

Существенно и то, что операции, предложенные в сформированном решении для будущих моментов времени, удаленных от текущего (при котором формировалось решение), могут быть ошибочными из-за погрешностей прогнозирования случайных возмущений.

Таким образом, стратегия прямого вывода в общем случае может включить в ВНЗ излишнее количество управляющих операций на объекте, поэтому на достаточно удаленных от τ^* — по моментах времени возможны ошибочные действия. Этот недостаток отсутствует в стратегии обратного вывода, при которой процесс начинается от целевого предиката и в связи с этим полученное решение содержит только управляющие операции, связанные с целевыми предикатами. Однако сформированное решение зависит от погрешностей прогноза случайных возмущений $\bar{Z}(\tau)$ на всем интервале от текущего момента τ^* времени до момента $\tau^{(u)}$ достижения цели. Кроме того, в процессе функционирования сложного объекта в экстремальном режиме может измениться цель ВНЗ, и обратную стратегию вывода можно будет применить, лишь изменив предварительно целевой предикат.

Множество действий $D_{\tau^*}^{\Gamma}$, выполнение которых на временном интервале $[\tau^*, \tau^{(u)}]$ гарантирует достижение цели, можно приближенно оценить объединением подмножеств:

$$D_{\tau^*}^{\Gamma} \cong \bigcup_{\eta \in H} \{D_{\nu}(\bar{Z}_{\eta}^{\Pi}(\tau)), \tau \in [\tau^*, \tau^{(u)}], \nu \in V, (1)$$

где $\bar{Z}_{\eta}^{\Pi}(\tau)$ — одна из возможных прогнозируемых реализаций случайного процесса $\bar{Z}(\tau)$ на интервале $[\tau^*, \tau^{(u)}]$; H — достаточно представительное подмножество порядковых индексов действий, прогнозируемых реализацией случайного процесса на интервале $[\tau^*, \tau^{(u)}]$ в текущий момент времени τ^* ; $D_{\nu}(\bar{Z}_{\eta}^{\Pi}(\tau))$ — действия, выполняемые с момента τ при \bar{Z}_{η}^{Π} -й прогнозируемой реализации случайного возмущения; V — множество порядковых индексов действий.

В связи с этим при управлении сложным объектом в экстремальном режиме целесообразно применить особую стратегию ВНЗ, совмещающую достоинства прямого и обратного вывода. Алгоритм, реализующий эту процедуру, включает следующие шаги:

1. Прогноз значения целевого предиката и момента его достижения $\tau^{(u)}$.
2. Прогноз на интервале $[\tau^*, \tau^{(u)}]$ возмущений $\bar{Z}^{\Pi}(\tau)$.
3. Формирование на интервале $[\tau^*, \tau^{(u)}]$ обратной стратегией ВНЗ семейства множеств действий $D_{\tau^*}^{\Gamma}$ для прогнозируемых возмущений.
4. Определение временного интервала Δ , на котором имеется достаточно полная информация о возмущениях.
5. Формирование с помощью прямой стратегии ВНЗ последовательности действий $\hat{D}_{\tau^*}^{\Gamma}, \hat{D}_{\tau^*}^{\Gamma} \supset D_{\tau^*}^{\Gamma}$, суммарная длительность которых не превышает Δ .
6. Реализация действий из множества $\hat{D}_{\tau^*}^{\Gamma}$ на объекте.
7. Если целевой предикат удовлетворен — окончание работы, в противном случае — переход к шагу 1 при значении текущего момента времени $\tau^* + \Delta$.

Рассмотрим часть ИИСППР ликвидации лесных пожаров, включающую: фрагмент БД, который содержит значения предикатов ($P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{14}, P_{15}, P_{16}, P_{17}, P_{18}, P_{19}, P_{20}$) и действий ($D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8, D_9, D_{10}$); систему мониторинга, отслеживающую скорость и направление ветра в очаге пожара (ОП), а также фрагмент БЗ, состоящий из пятнадцати правил продукции:

1. ЕСЛИ поступил сигнал о пожаре в южной части зоны объекта И ветер северный, ТО установить скорость ветра в зоне ОП, ТОГДА скорость ветра в зоне ОП установлена.
2. ЕСЛИ скорость ветра в зоне ОП установлена И скорость ветра в зоне ОП $V_B < 5$ м/с, ТО установить скорость распространения кромки ОП по фронту, ТОГДА скорость распространения кромки ОП по фронту $V_{\Pi} < 10$ м/мин.

3. ЕСЛИ скорость ветра в зоне ОП установлена И скорость ветра в зоне ОП $5 \leq V_B \leq 10$ м/с, ТО установить скорость распространения кромки ОП по фронту, ТОГДА скорость распространения кромки ОП по фронту $10 \leq V_{\Pi} < 15$ м/мин.

4. ЕСЛИ скорость ветра в зоне ОП установлена И скорость ветра в зоне ОП $V_B > 10$ м/с, ТО установить скорость распространения кромки ОП по фронту, ТОГДА скорость распространения кромки ОП по фронту $V_{\Pi} > 15$ м/мин.

5. ЕСЛИ скорость распространения кромки ОП по фронту $V_{\Pi} < 10$ м/мин, ТО идентифицировать тип пожара, ТОГДА тип пожара низовой средний.

6. ЕСЛИ скорость распространения кромки ОП по фронту $10 \leq V_{\Pi} < 15$ м/мин, ТО идентифицировать тип пожара, ТОГДА тип пожара низовой сильный.

7. ЕСЛИ скорость распространения кромки ОП по фронту $V_{\Pi} > 15$ м/мин, ТО идентифицировать тип пожара, ТОГДА тип пожара верховой И объект в опасности.

8. ЕСЛИ пожар низовой средний, ТО направить ресурсы для тушения к ОП, ТОГДА ресурсы для тушения расположены у ОП.

9. ЕСЛИ пожар низовой сильный, ТО распределить и направить ресурсы для тушения к южной границе объекта и вдоль препятствий по флангам ОП, ТОГДА ресурсы для тушения распределены и расположены на южной границе объекта и вдоль препятствий по флангам ОП.

10. ЕСЛИ пожар верховой, ТО все наличные ресурсы для тушения сосредоточить у южной границы объекта, ТОГДА ресурсы для тушения развернуты на южной границе объекта.

11. ЕСЛИ объект в опасности, ТО начать эвакуацию людей и движимого имущества с объекта, ТОГДА люди и движимое имущество с объекта эвакуированы.

12. ЕСЛИ ресурсы для тушения расположены у ОП, ТО остановить пожар, ТОГДА пожар остановлен.

13. ЕСЛИ ресурсы для тушения распределены и расположены на южной границе объекта и вдоль препятствий по флангам ОП, ТО провести охват зоны ОП по фронту и флангам, ТОГДА охват зоны ОП по фронту и флангам проведен.

14. ЕСЛИ охват зоны ОП по фронту и флангам проведен, ТО остановить пожар, ТОГДА пожар остановлен.

15. ЕСЛИ объект в опасности И ресурсы для тушения развернуты на южной границе объекта И люди и движимое имущество с объекта эвакуированы, ТО создать опорную полосу для пуска встречного огня, ТОГДА опорная полоса для пуска встречного огня создана.

Значение “истина” предикатов из множества $\{P_i\}$, $i=1, 20$ свидетельствует о возникновении в процессе развития или ликвидации лесного пожара следующих условий: P_1 – поступил сигнал о пожаре в южной части зоны объекта; P_2 – ветер северный; P_3 – скорость ветра в зоне ОП установлена; P_4 – скорость ветра в зоне ОП $V_B < 5$ м/с; P_5 – скорость

ветра в зоне ОП $5 \leq V_B \leq 10$ м/с; P_6 – скорость ветра в зоне ОП $V_B > 10$ м/с; P_7 – скорость распространения кромки ОП по фронту $V_{\Pi} < 10$ м/мин; P_8 – скорость распространения кромки ОП по фронту $10 \leq V_{\Pi} < 15$ м/мин; P_9 – скорость распространения кромки ОП по фронту $V_{\Pi} > 15$ м/мин; P_{10} – пожар низовой средний; P_{11} – пожар низовой сильный; P_{12} – пожар верховой; P_{13} – объект в опасности; P_{14} – ресурсы для тушения расположены у ОП; P_{15} – ресурсы для тушения распределены и расположены на южной границе объекта и вдоль препятствий по флангам ОП; P_{16} – ресурсы для тушения развернуты на южной границе объекта; P_{17} – люди и движимое имущество с объекта эвакуированы; P_{18} – пожар остановлен; P_{19} – охват зоны ОП по фронту и флангам проведен; P_{20} – опорная полоса для пуска встречного огня создана.

Технологические операции (действия) $\{D_j\}$, $j=1, 10$ по ликвидации пожара: D_1 – установить скорость ветра в зоне ОП; D_2 – вычислить скорость распространения кромки ОП по фронту; D_3 – идентифицировать тип пожара; D_4 – направить ресурсы для тушения к ОП; D_5 – распределить и направить ресурсы для тушения к южной границе объекта и вдоль препятствий по флангам ОП; D_6 – все наличные ресурсы для тушения сосредоточить у южной границы объекта; D_7 – начать эвакуацию людей и движимого имущества с объекта; D_8 – остановить пожар; D_9 – провести охват зоны ОП по фронту и флангам; D_{10} – создать опорную полосу для пуска встречного огня.

В формализованном виде правила продукции из описанного выше фрагмента БЗ выглядят следующим образом:

1. ЕСЛИ $P_1=1$ И $P_2=1$, ТО D_1 , ТОГДА $P_3=1$.
2. ЕСЛИ $P_3=1$ И $P_4=1$, ТО D_2 , ТОГДА $P_7=1$.
3. ЕСЛИ $P_3=1$ И $P_5=1$, ТО D_2 , ТОГДА $P_8=1$.
4. ЕСЛИ $P_3=1$ И $P_6=1$, ТО D_2 , ТОГДА $P_9=1$.
5. ЕСЛИ $P_7=1$, ТО D_3 , ТОГДА $P_{10}=1$.
6. ЕСЛИ $P_8=1$, ТО D_3 , ТОГДА $P_{11}=1$.
7. ЕСЛИ $P_9=1$, ТО D_3 , ТОГДА $P_{12}=1$ И $P_{13}=1$.
8. ЕСЛИ $P_{10}=1$, ТО D_4 , ТОГДА $P_{14}=1$.
9. ЕСЛИ $P_{11}=1$, ТО D_5 , ТОГДА $P_{15}=1$.
10. ЕСЛИ $P_{12}=1$, ТО D_6 , ТОГДА $P_{16}=1$.
11. ЕСЛИ $P_{13}=1$, ТО D_7 , ТОГДА $P_{17}=1$.
12. ЕСЛИ $P_{14}=1$, ТО D_8 , ТОГДА $P_{18}=1$.
13. ЕСЛИ $P_{15}=1$, ТО D_9 , ТОГДА $P_{19}=1$.
14. ЕСЛИ $P_{19}=1$, ТО D_8 , ТОГДА $P_{18}=1$.
15. ЕСЛИ $P_{13}=1$ И $P_{16}=1$ И $P_{17}=1$, ТО D_{10} , ТОГДА $P_{20}=1$.

На рисунке представлен фрагмент ИАГ [2], отражающий процесс ВНЗ с использованием предложенной выше процедуры. Момент достижения цели (остановки пожара) зависит в данном случае от прогноза случайного возмущения – скорости ветра в зоне ОП.

Таким образом, описанная процедура позволяет оценивать в реальном времени влияние случайных возмущений на процесс ВНЗ и, в соответствии с

этим, эффективно учитывать неполноту информации о состоянии сложного объекта в экстремальном режиме.

Литература: 1. Шостак И.В. Текущее состояние базы знаний в динамических экспертных системах управления сложными объектами // Радиоэлектроника и информатика. 2000. №3. С. 68-71. 2. Шостак В.Ф. Модели и методы управления сложными технологическими комплексами в нештатных (экстремальных) режимах работы в АСУ ТП // Автоматика и телемеханика. 1994. №10. РАН, М. С. 158-164.

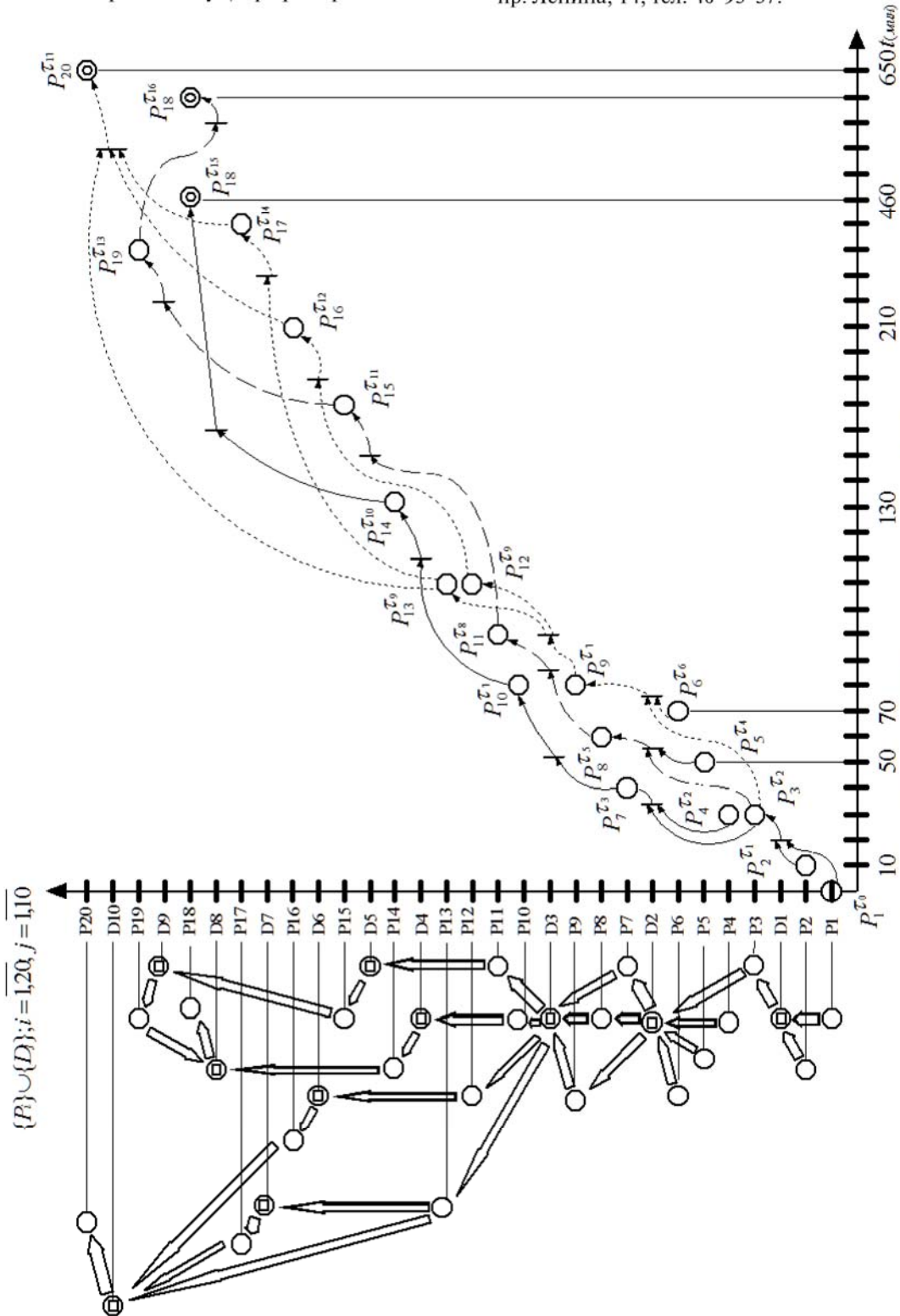
Поступила в редколлегию 19.06.2001

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Авраменко В.П.

Шостак Владимир Федорович, д-р техн. наук, профессор кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ. Научные интересы: инженерия знаний, теория принятия решений. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-37.

Шостак Игорь Владимирович, канд. техн. наук, докторант Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". Научные интересы: инженерия знаний, теория принятия решений. Адрес: Украина, 61070, Харьков, ул. Чкалова, 17, тел. 44-27-35.

Кузьменко Ольга Юрьевна, студентка гр. ИИС-96-1 ХНУРЭ. Научные интересы: методология разработки экспертных систем. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-37.



Процесс ВНЗ в виде фрагмента ИАГ