УДК 519.853

В.П. Шибицкий, Н.Н. Шибицкая, Н.Н. Савчук

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ДЕКОМПОЗИЦИЕЙ И РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Проведен структурный анализ интеллектуальной системы управления на основе ее множественной модели и теории математической классификации. Предложена методика распараллеливания алгоритмов анализа технической системы по ее собственным частотам и принцип построения интеллектуального регулятора.

В процессе сертификации сложных динамических систем, особенно при управлении информационной системой [1,2], принципиальное значение приобретает знание их точного математического описания. При идентификации системы и построении ее математической модели происходит сжатие информации. В связи с этим возникает проблема сохранения структурных отношений между базисными координатами системы.

Перспективным направлением в построении оптимальных алгоритмов моделирования характеристик многосвязных динамических систем является разработка единой информационной основы численных и структурных методов анализа систем [3, 4]. В связи с этим актуальной становится разработка экспертных подходов и оптимальных алгоритмов генерации управляющих воздействий.

Рассмотрим структурную модель технической системы на основе теоретико-множественных понятий [5] множества и отношения. Пусть заданы множества: информационных объектов $x_i \in X$, типов отношений $q_i \in Q$ и абстрактное множество V.

Декартово произведение $X_x = X \times X$ представляет все пары (x_i, x_j) элементов из X, исключая диагональ (рис.1). Функцию на множестве пар $\{x_i, x_j\}$ и множестве V можно представить в виде графа (рис.2).

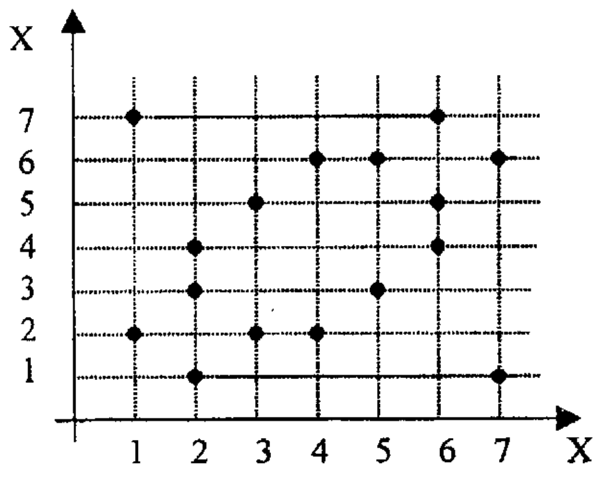


Рис.1

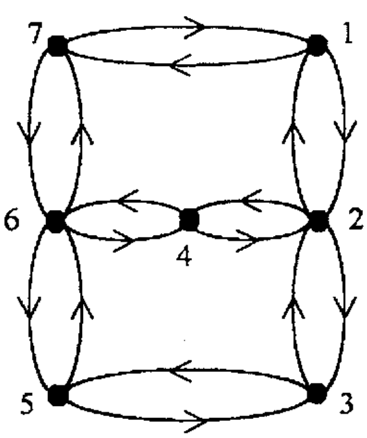


Рис.2

Элемент $q_i \in Q$ фиксирует отношения в паре $\{x_i, x_j\}$ и определяет ветвь графа (рис.2) в виде функции $v_i = q_i\ (x_i, x_j)$ с областью определения на множестве элементов $(x_i, x_j) \in X_x$ и областью значений в виде множества V. При этом область определения X_x является нечеткой. Приведенные условия позволяют определить структуру системы следующим образом.

Определение. Структурой H назовем бинарное отношение $H \subset X_x \times V$ и такое, что для любых пар $\{x_i, x_j\}$ декартового произведения элементов множества X определена функция $V = Q\ (X_x^*)$, в которой область ее определения $X_x^* \subset X$ является нечеткой. Для формирования нечеткого множества X_x^* требуется функция принадлежности

$$\mu_V(x_i, x_j) = \begin{cases} 1, \text{ если для } (x_i, x_j) \text{ определено } q_i \in Q; \\ 0, \text{ если для } (x_i, x_j) \text{ не определено } q_i \in Q. \end{cases}$$

Это означает, что элементу множества V взаимно однозначно соответствует только один элемент множества X_x.

Предлагаемое определение структуры системы эквивалентно понятию абстрактного графа, а не топологического. При исследовании технических систем множество типов отношений заменяется множеством типов параметров или передаточных функций.

Для определения множественной модели системы вводится множество типов параметров Q. Тогда систему можно зафиксировать в виде отношения двух множеств: H и Q. При этом будем считать, что f - взаимно однозначное отображение V на Q, представляющее собой множество упорядоченных пар (v, q), которое является бинарным отношением: $f \subset X \times Q$. Отображение f есть функция распределения элементов v по параметрам q.

Для построения математических моделей и алгоритмов анализа технических систем целесообразно представить систему в виде композиции структуры H и параметров Q.

Системой назовем бинарное отношение

$$S \subset X_x \times Q,$$

определяемое композицией структуры H и функции распределения параметров f:

$$S = f \circ H. \tag{1}$$

Структура H есть отношение с областью определения X и областью значений на V (рис.1). Для функции f множество V является областью определения, поэтому композиция (1) возможна. Эта операция должна выполняться в порядке $f \circ H$.

Системой можно также назвать некоторый объект, однозначно определяемый структурой, множеством параметров, функцией распределения, и обозначить:

$$S = (H, Q, f).$$

Аргументы H, Q, f находятся во взаимном отношении, которое для фиксированных H, Q, f определяет одну и только одну систему S. Учет типов параметров при определении структуры позволяет перейти к классам эквивалентных структур.

При разработке алгоритмов структурного анализа технических и интеллектуальных систем необходимо формально определить базисные элементы: путь, контур и дерево. Из определения структуры H и системы S следует, что любая ее часть является собственным подмножеством исходного множества.

Предлагаемая модель системы позволяет применить методы декомпозиции и распараллеливания вычислительных процессов с целью построения более эффективных алгоритмов анализа и синтеза как технических, так и интеллектуальных систем.

Рассмотрим формирование базисных элементов системы. Важным понятием структурного анализа является дерево. На основании приведенных определений структуры системы докажем теорему о существовании системы формальных критериев определения дерева.

Теорема. Деревом D структуры H является собственное подмножество $D \subset H$ связных элементов, число которых должно быть на единицу меньше, чем в X и совпадать с H на множестве X. Таким образом, можно утверждать, что подмножество D является нечетким по отношению к базисному множеству H с функцией принадлежности $\mu_D(v_i)$:

$$\mu_D(v_i) = \begin{cases} 1, \text{если } \{x_i, x_j\}_k \cap X_D = x_i \text{ или } x_j; \\ 0, \text{если } \{x_i, x_j\}_k \cap X_D = \varnothing \text{ или } \{x_i, x_j\}. \end{cases},$$

где k изменяется от 1 до n-1, n - число узлов системы.

Требование связности элементов в D и совпадения D с H на множестве X эквивалентно отсутствию циклов.

Доказательство. Пусть имеются пустые множества X, D и задано исходное множество H. Из множества H выбираем один элемент $v_i \in V$ и заносим в множество D. По определению структуры в виде бинарного отношения элементу множества H соответствует взаимно однозначно пара узлов $\{x_i, x_j\}$. Следовательно, в пустое множество X можно включить эту пару узлов. При этом соблюдается условие: число элементов в D на единицу меньше числа элементов X. Следующий элемент из множества H, заносимый в D, должен обеспечить включение в X только одного элемента x_i, что подтверждает условие связности и определяет значение $\mu_D(v_i)$. В противном случае равенство числа элементов в D и X дает цикл, что противоречит определению дерева.

Таким образом, множество D будем считать сформированным, если заполнено множество X и выполняется условие, что число элементов в D на единицу меньше числа элементов в X. Следовательно, D является аналогом дерева.

Такое определение дерева позволяет задачу анализа технических систем рассматривать как задачу классификации структурных элементов системы и формировать классы структур с распараллеливанием вычислительного процесса.

По отношению ко всему множеству деревьев класс K формируется относительно критериев эквивалентности $n_i \in N$, является нечетким и требует функцию принадлежности $\mu_k(D)$ для элементов из множества деревьев, включаемых в подмножество K.

Подмножество K_i по отношению к множеству деревьев определяется следующей функцией принадлежности:

$$\mu_{Kj}(D_i) = n_j \in N, \quad D_i \in K_i,$$

где $i = 1, k$, где k - число деревьев $D_i \in D$, а $j = 1, g$, где $g = |N|$ - число классов $K_i \subset D$.

Построение интеллектуальных систем управления требует высокого уровня абстрагирования данных и процессов их обработки. При этом практическое значение приобретает разработка эффективных алгоритмов генерации возможных стратегий управления с учетом регламентируемого суммарного объема запрашиваемых данных и формирования последовательности запросов системы. Для того, чтобы запросы выполнялись в естественной последовательности, обычно используют методы управления выводом, определяемые последовательностью поиска на графе [4, 6].

Для реализации алгоритма генерации деревьев будем использовать стек-списковую модель. Элементом стек-списка является запись, состоящая из полей NV - номер ветви, NY - номер узла, NS - ссылка на элемент стека, из которого достигнут узел NY.

Процесс генерации деревьев графа (см.рис.2) можно разбить на следующие этапы: формирование стек-списка (рис.3,*а*); исключение последнего и формирование нового элемента (рис.3,*б*); сжатие стек-списка (рис.3,*в*).

Алгоритмический процесс генерации деревьев в заданной структуре (см. рис.3) можно представить в виде движения по некоторому дереву на рис.4.

При движении по дереву в прямом направлении заполняется стек-список (рис.3,*а*). После исключения последнего элемента стек-списка для формирования нового дерева выполняется обратный ход с целью отыскания ветви, образующей дерево, и определения текущего значения функции $\mu_D(v_i)$ (рис.3,*б*).

NV	NY	NS
0	1	0
1	2	1
2	3	2
5	5	3
8	6	4
6	4	5
7	7	5

а

NV	NY	NS
0	1	0
1	2	1
2	3	2
5	5	3
8	6	4
6	4	5
3	7	1

б

NV	NY	NS
0	1	0
1	2	1
2	3	2
5	5	3
8	6	4
7	7	5
4	4	2

в

Рис.3

Эффективное решение интеллектуальными системами крупномасштабных задач, связанных с созданием распределенных систем принятия решений с открытой сетевой структурой, можно получить за счет объединения блоков решения задач в "коллективы", позволяющие эффективно и согласованно решать более крупную задачу.

Задача оптимизации информационного потока путем его структурирования на дискретные элементы обуславливает актуальность разработки алгоритмов структурного анализа интеллектуальных систем.

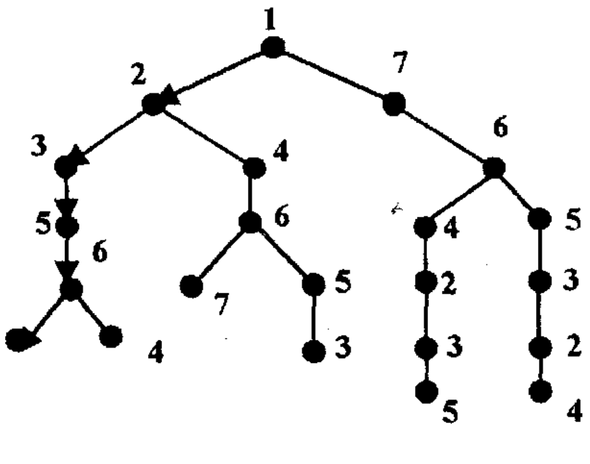
Один из подходов к решению крупномасштабных задач состоит в разбиении целостной задачи на множество подзадач, решаемых совместно взаимосвязанными интеллектуальными системами. Это позволяет увеличивать быстродействие системы в целом за счет использования параллелизма операций, основанного на методе диакоптики.

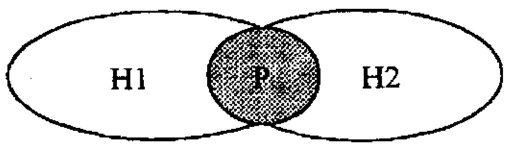
На основании приведенных математических моделей исследуем алгоритм формирования классов эквивалентных структур (деревьев) с декомпозицией и распараллеливанием вычислительного процесса.

Рассмотрим формальные правила разбиения структуры H на части H_1, $H_2 \subset H$ и зададим критерии объединения поддеревьев $D_1 \subset H_1$, $D_2 \subset H_2$.

В результате объединения подмножеств $D_1 \cup D_2 = D$ получаем дерево D.

При разбиении системы H на части H_1, H_2 необходимо соблюдать условие: $H_1 \cap H_2 = P$ и P есть связное подмножество, являющееся аналогом дерева (рис.5).





$H_1 \cap H_2 = P$

Рис.4

Рис.5

Рассмотрим правила объединения поддеревьев относительно подмножества P с целью формирования классов эквивалентных структур.

Утверждение 1. Если подмножество ветвей $P \subset D_i$, D_j является общим для этих деревьев D_i, D_j, то в результате: $D_i \cup D_j = D$.

Доказательство. Для заданной структуры H с множеством узлов X можно сформировать части H_i, $H_j \subset H$, каждая из которых имеет свое подмножество узлов X_i, $X_j \subset X$, где $n_i = | X_i |$, $n_j = | X_j |$ - число узлов, при этом $X_i \cup X_j = X$. Пересечение H_i ! H_j равно некоторому подмножеству ветвей P с подмножеством узлов $X_{ij} = X_i \cap X_j$, где $n_{ij} = | X_{ij} |$ - число узлов общей части.

Следовательно, число узлов структуры H равно: $n = n_i + n_j - n_{ij}$.

При генерации поддеревьев $D_i \subset H_i$, $D_j \subset H_j$ поддеревья D_i , D_j определены на подмножествах узлов X_i и X_j соответственно, и их объединение $X_i \cup X_j = X$ дает полное множество узлов X. Это свидетельствует о том, что операция $D_i \cup D_j = D$ удовлетворяет критерию совпадения искомого дерева D на множестве X с исходной структурой H.

Для дерева D с числом ветвей $d = | D |$ должен соблюдаться критерий $d = n - 1$. Рассмотрим доказательство этого случая. Будем считать, что подмножество P является поддеревом. Число ветвей в поддеревьях D_i , D_j и P соответственно равно: $d_i = n_i - 1$, $d_j = n_j - 1$, $d_{ij} = n_{ij} - 1$. При объединении поддеревьев число d ветвей дерева D равно:

$$d = d_i + d_j - d_{ij} = (n_i - 1) + (n_j - 1) - (n_{ij} - 1) = n - 1,$$ что соответствует определению.

В результате объединения связных подструктур D_i и D_j, совпадающих с исходной структурой H на множестве узлов X и удовлетворяющих критерию $d = n - 1$, формируется связная структура D (на основании теоремы).

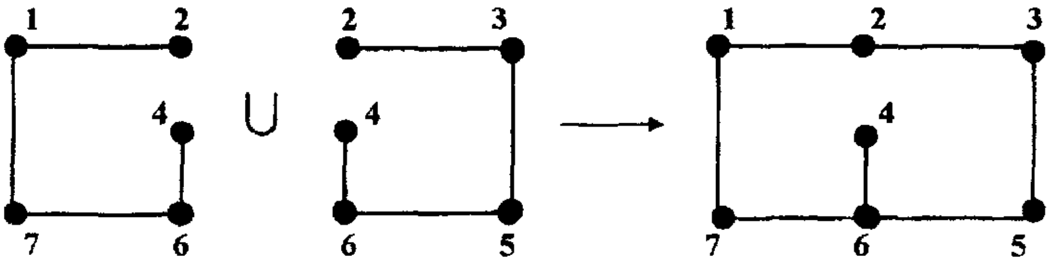
Утверждение 2. Если пересечение D_i, D_j ! P равно пусто, то объединение $D_i \cup D_j$ дает цикл.

Доказательство. Пусть поддеревья D_i, D_j являются подмножествами множеств H_i, H_j и совпадают с H_i, H_j на множествах X_i, X_j с числом узлов n_i, n_j соответственно. На основании теоремы число ветвей поддеревьев D_i, D_j равно $(n_i - 1)$, $(n_j - 1)$ соответственно. При объединении D_i и D_j число d ветвей искомого дерева определяется арифметической суммой $(n_i - 1) + (n_j - 1)$, что противоречит определению дерева. Следовательно, в этом случае булева сумма поддеревьев D_i, D_j дает цикл.

Утверждение 3. Если пересечение D_i , $D_ы$! P равно некоторым подмножествам B_i, B_j и $B_i \cup B_j \neq P$, то объединение $D_i \cup D_j$ дает цикл.

Доказательство. По утверждению 1 подмножество P должно удовлетворять определению дерева. Если $B_i \cup B_j \neq P$, то операция $D_i \cup D_j \cup (B_i \cup B_j)$ даст некоторое подмножество D^*, для которого не выполняется условие $d = n - 1$, что противоречит определению дерева.

Например, рассмотрим случай формирования цикла (рис.6,*а*) для графа (рис.6,*б*) по утверждению 3. Пусть D_i , D_j ! P равно некоторым подмножествам B_i, $B_j \subseteq P$ и их объединение $B_i \cup B_j = P$. Для формирования полного дерева D из поддеревьев D_i, D_j необходимо выполнить следующие булевы операции.



а *б*

$V = \{a, b, c, d, e, g, f, n\}$ $X = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$

$a \rightarrow \{1,2\}$ $c \rightarrow \{1,7\}$ $e \rightarrow \{3,5\}$ $f \rightarrow \{6,7\}$

$b \rightarrow \{2,3\}$ $d \rightarrow \{2,4\}$ $g \rightarrow \{4,6\}$ $n \rightarrow \{5,6\}$

Рис.6

Исключаем из объединяемых деревьев части B_i, B_j:

$$D_i - B_i = D_i^*,\ D_j - B_j = D_j^*.$$

Выделяем в подмножествах B_i, B_j общую часть: $B_i \cap B_j = B_{ij}$.

Далее, в результате объединения формируем дерево

$$D_i^* \cup D_j^* \cup B_{ij} = D.$$

Предлагаемые формальные операции формирования дерева D для модели графа (рис.6,*б*) проиллюстрированы на рис.7.

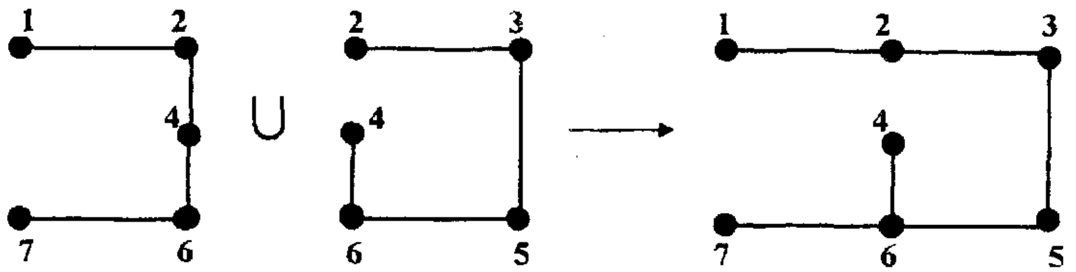


Рис.7

В случае, когда это пересечение $B_i \cap B_j$ равно пусто, возникает цикл (рис.8).

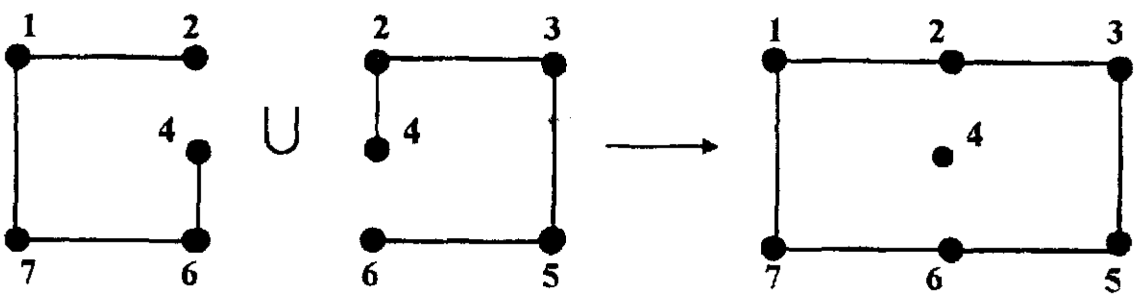


Рис.8

Предложенная математическая модель системы и ее структуры в виде специального множества позволяют на основе диакоптики построить алгоритмы формирования классов эквивалентных структур систем различной физической природы с распараллеливанием вычислительного процесса.

Современные компьютерные системы являются универсальным средством конструирования регуляторов управления информационными потоками в интеллектуальных системах [2]. При этом сигналами управления являются информационные объекты, представляющие собой многоуровневую информационную структуру с различными характеристиками (рис.9).

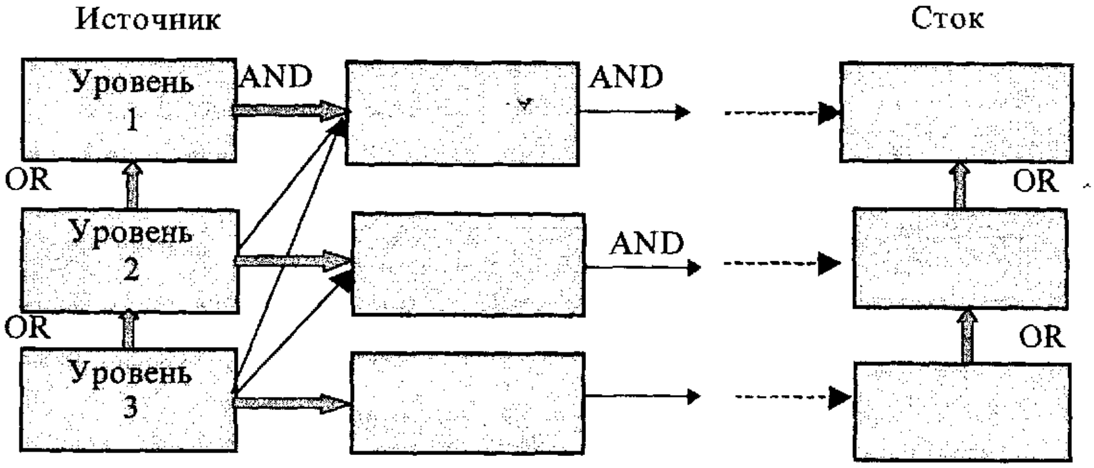


Рис.9

Для моделирования динамики информационных процессов требуется построить траекторию движения по информационным объектам на графе "И" - "ИЛИ" в зависимости от источника и стока и в целом сформировать информационный поток.

Проблему управления информационным потоком целесообразно решать на основе методов теории классификации и кластерного анализа.

Решение проблемы автоматической классификации можно считать эквивалентным идентификации функции, которая отображает структуру подобия, определенную на выборочном множестве, в разбиение этого выборочного множества и определении структурных свойств подмножеств так, чтобы достигалась указанная неформальная цель классификации.

Рассмотрение вопроса в такой (эквивалентной) формулировке показывает, что всякий раз, когда классификация строится с использованием четких множеств, проблема оказывается неразрешимой, так как она равносильна определению изоморфизма между двумя неизоморфными структурами [4].

Кластеризация информационных потоков позволяет решить задачу формирования оптимального управляющего воздействия. Функции управления информационным потоком может выполнять интеллектуальный регулятор (рис.10), позволяющий обеспечить достижение на заданном интервале времени требуемых значений изменения регулируемых величин.

Задачу регулирования в интеллектуальных системах целесообразно решать не путем изменения параметров регулятора, а с помощью генерации информационных элементов с различными параметрами Q. При этом система применяет вычислительные или логические операций и выбирает такую структуру информационных элементов, из имеющихся в распоряжении, при которой удовлетворяется заданный критерий качества работы всей системы. Это достигается с помощью подключения и отключения различных элементов в некоторой логической последовательности с запоминанием более удачных структур (см. рис.9).

Возможен случай изменения структуры регулятора по заранее заданному закону в зависимости от анализа условия протекания процессов и от значения отклонения регулируемой величины и ее производных. Подобное изменение структуры относится не к самоорганизации, а к нелинейным законам регулирования, применяющимся в оптимальных автоматических системах.

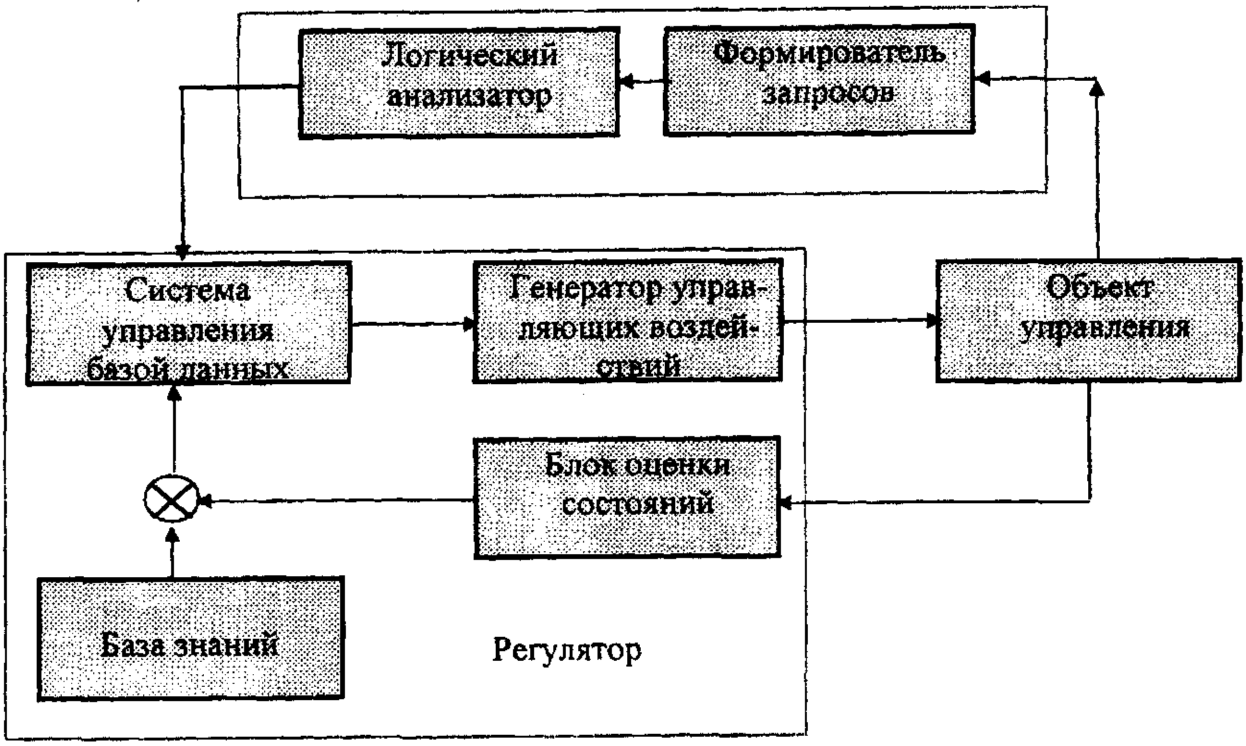


Рис. 10

Интеллектуальных системы можно отнести к классу самоорганизующихся систем управления. В такие системы должен быть включен анализатор с целью обеспечения в определенных пределах заданного качества. В качестве анализатора может применяться математическая или эталонная модель объекта с желаемыми свойствами. Достоинством такой системы является только первоначальная установка на объект самоорганизующейся системы. Затем система может работать на основании выработанных ранее законов изменения регулируемой величины.

Список литературы

1. *Шевелев А.Г.* Идентификация динамических объектов с многими регулируемыми величинами // Проблемы моделирования и цифровой обработки сигналов // Сб. науч. тр. – К.: КМУГА, 1996.– С.26–30.

2. *Шибицкая Н.Н.* Метод идентификации объектов в эргатической системе управления процессом обучения // Кибернетика и вычислительная техника. Вып. № 121. – К.: , 1999. – С. 52 – 58 .

3. *Нагорный Л.Я.* Декомпозиция и распараллеливание алгоритмов решения систем нелинейных уравнений большой размерности. – К.: Знание, 1981. – 26 с.

4. *Нечеткие* множества и теория возможностей. Последние достижения // Пер. с англ. /Под ред. Р.Р.Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.

5. *Шибицкий В.П. Шибицька Н.М, Савчук Н.М.* та ін. Обчислювальна техніка і програмування / Навч. посібник. – К.: КМУЦА, 1998. – 184 с.

6. *Алгоритмы* и программы решения задач на графах и сетях / М.И. Нечипуренко, В.К. Попков, С.М. Майнагашев и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 515 с.

Стаття надійшла до редакції 4 травня 1998 року.

В'ячеслав Петрович Шибицький (1944) закінчив Київський інститут інженерів цивільної авіації в 1967 році. Кандидат технічних наук, доцент кафедри основ обчислювальної техніки та бортових обчислювальних пристроїв Київського міжнародного університету цивільної авіації. Автор більше 60 наукових праць. Напрямок наукової діяльності - комп'ютерна інженерія, моделювання електронних систем та систем управління.

Vyacheslav P. Shibitsky (b. 1944) graduated from Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers (1967). PhD (Eng), ass. professor of Fundamentals of Computer Machines and On-Board Computers Department of Kyiv International University of Civil Aviation. Author of more than 60 publications in the field of computer engineering and simulation of electronic systems and control systems.

Наталія Миколаївна Шибицька (1965) закінчила Тол'ятінський політехнічний інститут за спеціальністю інженер-електрик в 1987 році. Після закінчення аспірантури Київського міжнародного університету цивільної авіації направлена на педагогічну роботу на кафедру теоретичної електротехніки. Автор більш як 30 робіт у галузі комп'ютерних навчальних систем.

Nataliya M. Shybytska (b.1965) graduated from Toliatty Polytechnical Institute on speciality of engineer-electrician (1987). After graduation from post-graduate courses of Kyiv International University of Civil Aviation was appointed to pedagogical work as a lecturer of the Theoretical Electrical Engineer Department. Author of more than 30 publications in the field of computer systems of training.

Микола Миколайович Савчук (1969) закінчив Київський міжнародний університет цивільної авіації в 1995 році. Аспірант кафедри основ обчислювальної техніки та бортових обчислювальних пристроїв Київського міжнародного університету цивільної авіації. Напрямок наукової діяльності – розробки в галузі комп'ютерної інженерії. Автор п'яти наукових праць.

Mykola M. Savtchuk(b. 1969) graduated from Kyiv International University of Civil Aviation (1995). Post-graduate of Fundamentals of Computer Machines and On-board Computers Department of Kyiv International University of Civil Aviation. Specializes in the field of computer engineering. Author of 5 publications.