

Нейронные сети для планирования решения задач теории автоматического управления¹

М. Ф. Степанов

Саратовский государственный технический университет

Показана возможность планирования решения задач анализа и синтеза систем автоматического управления (САУ) с помощью планирующих искусственных нейронных сетей, автоматически порождаемых на основе аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач теории автоматического управления. В качестве иллюстрации рассмотрен пример синтеза и анализа САУ с заданными характеристиками.

Обусловленная потребностями практики не-процедурность постановки задач в системах анализа и синтеза САУ, предназначенных для инженеров-проектировщиков, приводит к проблеме планирования решения поставленной пользователем задачи.

В работе [1] эта проблема сведена к поиску в формализме многоуровневой аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ (теории автоматического управления) доказательства теоремы, в форме которой представляется задача пользователя. Как и все формальные логические системы, такой подход обладает рядом недостатков. Один из наиболее важных заключается в пресловутом "проклятии размерности", не позволяющем решать задачи практической сложности, поскольку перебор релевантных вариантов оказывается недопустимо длительным. К тому же такие системы не обладают свойством массового параллелизма как, например, нейронные сети, которые в биологической природе демонстрируют эффективную параллельную обработку информации в процессе решения задач практически произвольной степени сложности. Интерес к нейронным сетям возник достаточно давно, однако основные направления применения искусственных нейронных сетей [2] не охватывают задачи планирования действий. Одна из причин такого положения состоит в сложности задач планирования, относящихся к классу NP-полных задач, для которых неизвестно лучшего алгоритма решения, чем полный перебор. Обычно системы планирования представляют собой узко специализирован-

ные системы с исчерпывающей логикой, в которых алгоритм решения, а часто и используемые им знания зафиксированы разработчиком в тексте программы. Применение полноценных систем автоматического доказательства теорем осложняется необходимостью работы в полной первопорядковой логике, что приводит к трудностям не только технического характера в силу ее "полуразрешимости". Традиционные эвристические приемы и правила, сокращающие перебор, могут иногда привести и к потере решения. Для систем анализа и синтеза САУ это неприемлемо. К тому же ТАУ бурно развивается, и системы анализа и синтеза САУ должны быть открытыми, гибкими, развивающимися. Для придания им таких свойств необходимо решить проблему создания средств, допускающих массовый параллелизм в ходе планирования решения задач синтеза и анализа САУ и гарантирующих нахождение решения, если оно существует. Данная работа направлена на решение указанной проблемы с помощью планирующих искусственных нейронных сетей, автоматически порождаемых на основе аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ.

Поиск плана решения задачи в системах анализа и синтеза САУ, предназначенных для инженеров, осуществляется планирующей подсистемой интеллектуального решателя (И-решателя) задач ТАУ [1], представляющей собой иерархически связанную совокупность решающих органов, конструктивные особенности которых отражают следующие теоремы.

Теорема 1. *Решающая подсистема И-решателя задач синтеза и анализа САУ допускает параллельное решение подзадач исходной задачи.*

¹Статья рекомендована к печати Программным комитетом Второй международной конференции по проблемам управления (Москва, 2003 г.).



Доказательство следует из рассмотрения порядка функционирования решающей подсистемы И-решателя задач ТАУ, представляющей собой трехранговую систему иерархически связанных решающих органов. Решающие органы старших рангов решают свою задачу, сводят ее к подзадачам и ставят их перед решающими органами младших рангов, которые либо решают их, либо сообщают о неудаче. Поскольку каждый решающий орган использует в качестве знаний собственный фрагмент многоуровневой аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ, по построению непересекающийся со знаниями других решающих органов, то собственно процесс решения одним решающим органом поставленной перед ним задачи не связан с процессом решения другой задачи другим решающим органом. Следовательно, эти процессы независимы и могут протекать одновременно, т. е. параллельно.

Теорема 2. *Каждый решающий орган решающей подсистемы И-решателя задач ТАУ допускает параллельное решение задач на каждом из трех своих уровней представления знаний.*

Доказательство следует из рассмотрения процесса решения задачи решающим органом. Каждый решающий орган имеет три уровня представления знаний (2-й, 1-й и 0-й), на каждом из которых используется собственная теория решений. Каждая задача, поставленная перед решающим органом, вначале решается на 2-м уровне представления знаний посредством сведения ее к подзадачам 1-го уровня. Каждая задача 1-го уровня также решается посредством сведения ее к подзадачам 0-го уровня. Поскольку по построению многоуровневой аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ знания каждого уровня представления знаний решающего органа различны, то процесс поиска решения в пределах каждого уровня не связан с соответствующими процессами на других уровнях, а поэтому может выполняться независимо от них и одновременно, т. е. параллельно.

В силу теорем 1 и 2 наименьшим, функционирующим независимо от других фрагментом планирующей подсистемы является отдельно взятый уровень представления знаний решающего органа. Следовательно, решением проблемы повышения производительности И-решателя является обладающий свойством массового параллелизма метод поиска решения задачи в одноуровневой теории решений, доставляющей знания отдельного уровня представления знаний решающего органа. Такие возможности предоставляют планирующие искусственные нейронные сети [3].

Планирующая искусственная нейронная сеть состоит из двух взаимодействующих фрагментов [3]: собственно *решающей искусственной нейронной*

сети и архивной искусственной нейронной сети. Их функционирование координируется *устройством синхронизации.* Решающая искусственная нейронная сеть осуществляет обратный поиск решения поставленной перед ней задачи в формализме $T_{k,p}^r$ (p -й теории решений k -го уровня r -го ранга многоуровневой аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ) с последующим сохранением построенного плана решения задачи в архивной искусственной нейронной сети. Устройство синхронизации планирующей искусственной нейронной сети выдает сигналы, координирующие работу компонентов решающей искусственной нейронной сети и архивной искусственной нейронной сети. Выходом решающей искусственной нейронной сети является набор операций, подлежащих включению в план решения задачи посредством записи в архивную искусственную нейронную сеть. На вход устройства синхронизации от решающей искусственной нейронной сети также поступает список текущих целей решения задач. Если список целей пуст, то устройство синхронизации останавливает процесс поиска решения, прекращая вырабатывать синхронизирующие сигналы. Это происходит также в случае исчерпания максимально допустимого количества шагов поиска, свидетельствующего об отсутствии решения поставленной задачи. Решающая искусственная нейронная сеть состоит из трех слоев. Нейроны 0-го слоя лишь хранят атрибуты решаемой задачи для их последующего использования нейронами других слоев. Нейроны 1-го слоя задают сложные отношения, нереализуемые простыми весовыми коэффициентами на одном нейроне, но являющиеся необходимыми условиями активации нейронов 2-го слоя. Нейроны 2-го слоя моделируют предметы соответствующего фрагмента многоуровневой модели множества формализованных задач ТАУ, их свойства и характеристики, выступающие в качестве текущих целей текущих решаемых задач. Нейроны 3-го слоя моделируют операции, выполняемые над предметами, их свойствами и характеристиками.

Архивная искусственная нейронная сеть представляет собой два слоя нейронов (1-й слой — нейроны-данные и 2-й слой — нейроны-операции), коэффициенты связей аксон-синапс которых и представляют собой форму записи плана решения задачи, построенного решающей искусственной нейронной сетью. Поскольку решающая искусственная нейронная сеть обладает собственной динамикой, то необходимо исследовать ее свойства, такие как сходимости решений и устойчивость процесса поиска решения задачи.

Введем обозначения: $s_i(z) = \langle \phi_z; y_i; \partial_i; o_i; n_z \rangle$ — состояние планирующей искусственной нейрон-

ной сети на i -м шаге решения задачи z ; $\phi_z = \langle u_z, p_z, m_z \rangle$ — формулировка задачи z ; u_z — исходные данные задачи z ; p_z — требуемый результат задачи z ; m_z — требования к результату решения задачи z ; y_i — вектор состояний нейронов 1-го слоя (условия) решающей искусственной нейронной сети на i -м шаге решения задачи z ; d_i — вектор состояний нейронов 2-го слоя (данные) решающей искусственной нейронной сети на i -м шаге решения задачи z ; o_i — вектор состояний нейронов 3-го слоя (операции) решающей искусственной нейронной сети на i -м шаге решения задачи z ; $n_z = \langle u_z, o_z^a \rangle$ — план решения (состояние архивной искусственной нейронной сети) для задачи z ; o_z^a — вектор состояний нейронов 2-го слоя архивной искусственной нейронной сети (список операций) для задачи z .

Множество *начальных* состояний планирующей искусственной нейронной сети, соответствующих задаче z , определим как $S_z^H = \{s | s(z) = \langle \phi_z; [0]; [0]; [0]; [0] \rangle\}$, где символы "[0]" обозначают векторы соответствующей размерности с нулевыми элементами.

Заключительными будем называть состояния $S_z^3 = \{s | s(z) = \langle \phi_z; y_z; d_z; o_z; n_z \rangle\}$, достигнутые по окончании процесса поиска решения задачи z .

Среди заключительных выделим множество *целевых* состояний

$$S_z^u = \{s | s(z) = \langle \phi_z; [0]; [0]; [0]; n_z \rangle\} \subset S_z^3, \quad (1)$$

достижение которых свидетельствует об успешном построении плана решения n_z задачи z .

Достижение заключительных состояний вида

$$s(z) = \langle \phi_z; y_z; d_z; o_z; n_z \rangle \notin S_z^u, \quad d_z \neq [0], \quad (2)$$

свидетельствует об отсутствии решения задачи.

Сходимость процесса поиска решения, применительно к планирующей искусственной нейронной сети, означает, что для каждой задачи z , имеющей решение в соответствующей теории решений, планирующая искусственная нейронная сеть перейдет из заданного начального состояния $s_H(z) = \langle \phi_z; [0]; [0]; [0]; [0] \rangle \in S_z^H$ в соответствующее целевое $s_U(z) = \langle \phi_z; [0]; [0]; [0]; n_z \rangle \in S_z^u$, о чем свидетельствует

Теорема 3. *Для сходимости процесса поиска решения задачи в решающей искусственной нейронной сети необходима полнота в смысле Робинсона используемого фрагмента многоуровневой аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ.*

Доказательство. В многоуровневой аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ формулировка задачи, подлежащей решению, содержит только константы, и, следовательно, описывается замкнутой формулой теории решений. Поэтому вместо полноты в смысле Гёделя необходимо говорить о полноте в смысле Робинсона [4]: аксиоматическая теория T полна, если для любой замкнутой формулы F , определенной в словаре множества аксиом A теории T , имеет место либо $A \vdash F$, либо $A \vdash \neg F$ (запись вида $A \vdash F$ означает выводимость F из A , символ \neg означает отрицание). В нашем случае это означает, что либо решение задачи будет получено, либо нет. Для планирующей искусственной нейронной сети оба случая приведут к остановке решающей искусственной нейронной сети в связи с тем, что устройство синхронизации прекратит выработку сигналов синхронизации. Покажем это. В первом случае это происходит в связи с тем, что решение задачи найдено, о чем свидетельствует пустой список текущих целей. Во втором — в связи с исчерпанием максимально допустимого количества шагов поиска. В решающей искусственной нейронной сети достижение конечного состояния соответствует переходу всех нейронов 1-го, 2-го и 3-го слоев решающей искусственной нейронной сети в заторможенное состояние. Нейроны 3-го слоя будут заторможены, если будут заторможены нейроны 2-го, отвечающие результатам соответствующих операций многоуровневой аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ. Нейроны 2-го слоя активируются лишь в случае, если они соответствуют требуемым результатам либо исходной задачи, либо текущей решаемой подзадачи, в том числе и элементарной, решаемой текущей выбранной операцией, соответствующей активированному нейрону 3-го слоя. В свою очередь, активированный нейрон 3-го слоя посредством обратных связей приведет, в конечном счете, к торможению активировавших его нейронов 2-го слоя. Если поставленная задача имеет решение, то для каждой литеры из списка текущих целей найдется хотя бы одна аксиома теории решений, в сукцедент которой она входит. Для планирующей искусственной нейронной сети это означает, что нейрон 2-го слоя, отражающий указанную литеру, активизирует нейрон 3-го слоя, отражающий соответствующую аксиому, что приведет затем к торможению рассматриваемого нейрона 2-го слоя, а за ним и нейрона 3-го слоя. Таким образом, для задачи, имеющей решение, заключительное состояние планирующей искусственной нейронной сети будет иметь вид (1), а значит, является целевым. В противном случае для задачи, не имеющей решения, при отсутствии подходящих аксиом теории реше-



ний для некоторых возбужденных нейронов 2-го слоя не активизируются нейроны 3-го слоя и, следовательно, возбужденные нейроны 2-го слоя в конечном счете не будут заторможены. Таким образом, заключительное состояние планирующей искусственной нейронной сети будет иметь вид (2), не являющийся целевым. Следовательно, для каждой задачи z , имеющей решение, планирующая искусственная нейронная сеть построит план решения n_z задачи z либо сообщит о неудаче в противном случае. Теорема доказана.

Для обеспечения сохранения разрешимости многоуровневой аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ решающая искусственная нейронная сеть должна гарантировать нахождение решения задачи за *конечное* число шагов либо вырабатывать отказ, если решение поставленной задачи не существует в рамках используемой теории решений, о чем свидетельствует

Теорема 4. *Для любой задачи, поставленной на планирующей искусственной нейронной сети, справедливо:*

- *целевое состояние вида (1) планирующей искусственной нейронной сети достигается за конечное число шагов, не превышающее увеличенное на единицу число операций в плане решения задачи, если она имеет решение в используемом фрагменте аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ;*
- *заключительное состояние вида (2) планирующей искусственной нейронной сети достигается за конечное число шагов, равное увеличенному на единицу числу операций в используемом фрагменте аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ, если поставленная задача не имеет решения.*

Доказательство. Докажем вначале первое утверждение. В силу теоремы 3 для всякой задачи, имеющей решение в многоуровневой аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ, будет найдено ее решение в виде упорядоченной совокупности операций многоуровневой аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ. В решающей искусственной нейронной сети за один шаг поиска решения задачи может быть активирован, как минимум, один (может быть и более) нейрон 3-го слоя. Следовательно, конечная последовательность операций, приводящая к решению поставленной задачи, будет построена за конечное число шагов решающей искусственной нейронной сети в связи с конечностью числа нейронов 3-го слоя.

Пусть для решения поставленной задачи требуется выполнить n операций. Если на каждом шаге работы решающей искусственной нейронной сети активируется лишь один нейрон, то очевидно, что

для построения плана решения задачи из n операций потребуется $n + 1$ шагов работы решающей искусственной нейронной сети, из которых один — последний — требуется для торможения последних активированных нейронов 2-го слоя — текущих целей. Как только нейроны 2-го слоя будут заторможены, то возникнет сигнал "*цель пуста*" и процессы в решающей искусственной нейронной сети будут остановлены устройством синхронизации. Если же на каждом шаге работы решающей искусственной нейронной сети активируется более одного нейрона 3-го слоя, то, очевидно, для формирования плана решения задачи потребуется меньшее число шагов.

Для доказательства второго утверждения теоремы учтем тот факт, что устройство синхронизации планирующей искусственной нейронной сети останавливает работу решающей искусственной нейронной сети, если было сделано число шагов, превышающее число нейронов 3-го слоя решающей искусственной нейронной сети, даже в том случае, если "*цель не пуста*"; т. е. и при наличии возбужденных нейронов 2-го слоя. Отсутствие сигнала "*цель пуста*" при остановленной решающей искусственной нейронной сети свидетельствует об отсутствии решения поставленной задачи. Таким образом, утверждения теоремы справедливы.

В решающей искусственной нейронной сети применяется метод поиска решений, при котором искусственная нейронная сеть возбуждается атрибутами поставленной задачи и возвращается в исходное невозбужденное состояние (нулевое состояние) лишь в случае нахождения плана решения поставленной задачи.

В качестве *примера* рассмотрим планирование решения (с помощью фрагмента многоуровневой аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ, приведенного в Приложении) следующей комбинированной задачи синтеза и анализа САУ: вычислить частотные характеристики САУ, обеспечивающей частотные и инженерные показатели точности управления при действии внешних возмущений.

В формализме аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ данная задача записывается в виде выражения:

$$\text{условия} \rightarrow \text{данные} \Rightarrow \text{результат} \leftarrow \text{требования} \\ \text{к результату.}$$

С учетом обозначений, отраженных в словаре используемого фрагмента многоуровневой аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ (см. Приложение) постановка данной задачи имеет вид:

$$\rightarrow \text{П3.}\Phi_4, \text{П2.}\Phi_2, \text{П5.}\Phi_4, \text{П1.}\Phi_1, \text{П1.}\Phi_2, \text{П8.}\text{X}_2, \\ \text{П8.}\text{X}_3 \Rightarrow \text{П6.}\text{X}_4 \leftarrow \text{O}_2, \text{O}_3.$$

Атрибуты задачи

Исходные данные: П3.Ф4, П2.Ф2, П5.Ф4, П1.Ф1, П1.Ф2, П8.Х2, П8.Х3.
 Требуемый результат: П6.Х4.
 Требования к результату: О2, О3.

Протокол решения задачи

Шаг 1. Текущие цели: П6.Х4 ← О2, О3.
 Активированные аксиомы: ДО2, ДО3, ДХ04.
 Шаг 2. Текущие цели: П2.Ф1, П3.Ф1, П4.Ф1, П7.Ф2, П6.Х2 ← О2, О3.
 Активированные аксиомы: ДП01, ДП06, ДХ02.
 Шаг 3. Текущие цели: П7.Ф1 ← О2, О3.
 Активированные аксиомы: ДП08.
 Шаг 4. Текущие цели: П3.Ф5, П7.Ф4, П8.Ф4, П3.С2 ← О2, О3.
 Активированные аксиомы: ДА03, ДП02, ДП12, ДП14, ДС01.
 Шаг 5. Текущие цели: П3.Ф3, П4.Ф2, П5.Ф2, П8.Ф1, П8.Ф2 ← О4.
 Активированные аксиомы: ДО4, ДП04, ДП09, ДП11, ДП13.
 Шаг 6. Текущие цели: П3.Ф2, П4.Ф3, П5.Ф2, П3.С3, П6.С2 ← О2, О3.
 Активированные аксиомы: ДА04, ДА06, ДП05.
 Шаг 7. Текущие цели: пусто.
 Активированные аксиомы: нет. Решение получено.

Построенный план решения задачи (упорядоченный список операций): ДП01, ДП02, ДА04, ДА06, ДА03, ДП09, ДП05, ДП14, ДП04, ДП11, ДП13, ДП12, ДС01, ДП08, ДП06, ДХ02, ДО4, ДО2, ДХ04, ДО3.

Таким образом, для построения плана из 20-ти операций потребовалось лишь 7 шагов поиска планирующей искусственной нейронной сети, последний из которых необходим лишь для проверки условия завершения работы.

В исследовательских целях был разработан программный комплекс "ЕИ-решатель-2001 на базе ПИНС" [5], представляющий собой реализацию И-решателя задач ТАУ на основе планирующей искусственной нейронной сети, получившую название естественно-интеллектуальный решатель (ЕИ-решатель) задач ТАУ. Данный программный комплекс позволяет задавать и корректировать знания в виде аксиоматической теории, по которой автоматически генерируется планирующая искусственная нейронная сеть. Постановка задачи осуществляется с учетом обозначений, устанавливаемых в словаре аксиоматической теории пользователем-исследователем. Процесс решения задачи можно проследить по шагам, просматривая состояния нейронов всех слоев решающей искусственной нейронной сети и текущий построенный план решения задачи. Рассмотренный в данной работе пример был решен с помощью программного комплекса "ЕИ-решатель-2001 на базе ПИНС".

Для практических нужд проектирования САУ изложенный подход реализован в системе анализа и синтеза САУ "ИНСТРУМЕНТ-3м-И", имеющей

два основных варианта реализации "Среда исследователя" и "Среда инженера". Первый из них предоставляет средства создания, коррекции и отладки моделей множества задач, в форме которых исследователями представляются знания о методах решения задач синтеза и анализа САУ. Второй позволяет инженеру-проектировщику решать непроцедурно поставленные практические задачи синтеза и анализа САУ в соответствии с типовым сценарием работы: задание исходных данных — моделей известных компонентов САУ; указание искомого результата решения задачи и требований, накладываемых на него; автоматическое решение задачи с предварительным построением плана решения; анализ полученных результатов и т. д.

В И-решателе задач ТАУ перед каждым решающим органом ставится совокупность подзадач, решение которых в целом и составляет искомый план решения исходной задачи. Поэтому актуально исследование особенностей организации взаимодействия планирующих искусственных нейронных сетей в рамках многоуровневой аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ.

ПРИЛОЖЕНИЕ
Фрагмент аксиоматической теории автоматических решений формализованных задач ТАУ
**Алфавит теории решений.
 Отношения, свойства и характеристики предметов**

Имя	Наименование
О2	Выполняются требования к точности САУ
О3	Выполняются требования к обобщенной частоте среза САУ
О4	На движениях замкнутой САУ минимизируется интегральный критерий
П3.С1	Управления и возмущения аддитивны
П3.С2	Модель объекта управления в форме «вход – выход» не содержит производных управлений
П3.С3	Число управлений совпадает с числом возмущений
П6.С1	Измеряемые переменные совпадают с регулируемыми
П6.С2	Число управлений совпадает с числом регулируемых переменных
П6.Х2	Установившаяся ошибка САУ
П6.Х3	Значение интегрального критерия качества
П6.Х4	Частотные характеристики САУ
П8.Х1	Цель управления (требования к времени регулирования)
П8.Х2	Цель управления (требования к точности)
П8.Х3	Цель управления (требования к обобщенной частоте среза)



**Алфавит теории решений.
Формы математических моделей предметов**

Имя	Наименование
П1.Ф1	Возмущения внешние
П1.Ф2	Начальные отклонения
П2.Ф1	Измерительное устройство в форме Коши
П2.Ф2	Измерительное устройство в форме Лагранжа
П3.Ф1	Объект управления в форме Коши
П3.Ф2	Объект управления в форме Коши канонической
П3.Ф3	Объект управления в форме Коши расширенной
П3.Ф4	Объект управления в форме Лагранжа
П3.Ф5	Объект управления в форме "вход — выход" по регулируемым переменным
П3.Ф6	Объект управления в форме "вход — выход" по измеряемым переменным
П4.Ф1	Исполнительный механизм в форме Коши
П4.Ф2	Исполнительный механизм в расширенной форме Коши
П4.Ф3	Исполнительный механизм в канонической форме Коши
П5.Ф1	Регулируемые переменные в форме Коши
П5.Ф2	Регулируемые переменные в канонической форме Коши
П5.Ф3	Регулируемые переменные в расширенной форме Коши
П5.Ф4	Регулируемые переменные в форме Лагранжа
П6	Система автоматического управления
П7.Ф1	Управляющее устройство в форме "вход — выход"
П7.Ф2	Управляющее устройство в форме Коши
П7.Ф3	Управляющее устройство в форме Лагранжа
П7.Ф4	Управляющее устройство в статической форме
П8.Ф1	Цель управления (функционал (1) по регулируемым переменным)
П8.Ф2	Цель управления (функционал (1) по переменным состояниям объекта управления)
П8.Ф3	Цель управления (функционал (2) по регулируемым переменным)
П8.Ф4	Цель управления (функционал (2) по переменным состояниям объекта управления)

Аксиомы теории решений

Имя	Условия	Исходные данные	Требуемый результат	Требования
ДА03	—	П3.Ф5	П3.С2	—
ДА04		П3.Ф1, П4.Ф1	П3.С3	
ДА06		П5.Ф1, П4.Ф1	П6.С2	
ДО2		П8.Х2, П6.Х2	О2	
ДО3		П8.Х3, П6.Х4	О3	
ДО4		П3.Ф1, П2.Ф1, П5.Ф1, П7.Ф2, П1.Ф2, П8.Ф1	О4	

Имя	Условия	Исходные данные	Требуемый результат	Требования
ДП01	—	П3.Ф4, П2.Ф2, П5.Ф4	П3.Ф1, П4.Ф1, П2.Ф1, П5.Ф1	—
ДП02		П3.Ф1, П4.Ф1, П5.Ф1	П3.Ф5	
ДП04		П3.Ф2, П4.Ф3, П5.Ф2, П8.Ф4	П3.Ф3, П4.Ф2, П5.Ф3, П8.Ф2	
ДП05	П3.С2	П3.Ф5	П3.Ф2, П4.Ф3, П5.Ф2	
ДП06	—	П7.Ф1	П7.Ф2	
ДП08		П7.Ф4, П3.Ф5, П8.Ф4	П7.Ф1	
ДП09		П3.С3, П6.С2	П8.Х2, П1.Ф1, П5.Ф1, П4.Ф1	
ДП11	—	П8.Ф1, П5.Ф2	П8.Ф2	
ДП12		П8.Ф2, П3.Ф5, П8.Х3	П8.Ф4	
ДП13		П3.Ф2, П4.Ф3, П8.Ф4	П3.Ф3, П4.Ф2, П8.Ф2	
ДП14		П3.Ф5, П8.Ф1, П8.Х3, П5.Ф2	П8.Ф4	
ДС01		П3.Ф3, П4.Ф2, П8.Ф2	П7.Ф4	О4
ДХ02		П3.Ф1, П4.Ф1, П2.Ф1, П5.Ф1, П7.Ф2, П1.Ф1	П6.Х2	—
ДХ04		П3.Ф1, П4.Ф1, П2.Ф1, П7.Ф2	П6.Х4	

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов М. Ф. Автоматическое решение формализованных задач теории автоматического управления. — Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000.
2. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. — М.: Мир, 1992.
3. Степанов М. Ф. Планирующие искусственные нейронные сети в самоорганизующихся интеллектуальных системах управления // Докл. Рос. акад. естеств. наук. Поволж. межрегион. отделение. — 1999. — № 1. — С. 73—99.
4. Робинсон А. Введение в теорию моделей и метаматематику алгебры. — М.: Наука, 1967.
5. Степанов М. Ф. Автоматическое решение задач линейной теории автоматического управления на основе планирующих искусственных нейронных сетей // Тр. VIII Всерос. конф. "Нейрокомпьютеры и их применение НКП-2002" с междунар. участием / Ин-т пробл. упр. — М., 2002. — С. 369—383.

☎ (8452) 52-64-60

E-mail: mfstepanov@mail.ru

